



**НАВЧАЛЬНІ
ВИДАННЯ**

Заблудський М.М., Червінський Л.С.

ЗАКОНОМІРНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ

Навчальний посібник

Заблодський М.М., Червінський Л.С.

ЗАКОНОМІРНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ

Навчальний посібник

**Київ
2025**

УДК 621.313

312

*Рекомендовано до видання вченою радою ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження Національного університету біоресурсів і природокористування України
(Протокол № від « » 2025 р.)*

Рецензенти:

Шевченко Валентина Володимирівна, д.т.н., професор, професор кафедри електричних машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Трегуб Микола Іларіонович, д. т. н., професор, завідувач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Білоцерківського національного аграрного університету

Горобець Валерій Григорович, д.т.н., професор, професор кафедри інженерії енергосистем НУБіП України.

З-12 Закономірності енергетичних перетворень: навчальний посібник / М.М. Заблодський, Л.С. Червінський– К.: Видавництво «Компрінт», 2025. – 231 с.

ISBN

Зміст навчального посібника відповідає навчальній програмі дисципліни «Закономірності енергетичних перетворень» підготовки докторів філософії з електроенергетики, електротехніки та електромеханіки.

Висвітлені основні закони й тенденції розвитку генерації та перетворення енергії. Розглянуті закономірності електромеханічних перетворень, управління енергетичними процесами взаємодії поліфункціональних перетворювачів з навантажувально-охолоджуючим середовищем, оптичних та фотоелектрокаталітичних технологій перетворення енергії. Наведені електротехнології конверсії біомаси, підготовки та спалювання паливних сумішей.

УДК 621.313

© Заблодський М.М., Л.С. Червінський, 2025

© НУБіП України

ISBN

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ



Заблодський Микола Миколайович

Доктор технічних наук, професор кафедри електротехніки, електромеханіки та електротехнологій Національного університету біоресурсів і природокористування України. Викладає дисципліни «Електричні машини», «Управління енергоефективністю електромеханічних перетворювачів енергії», «Поліфункціональні електромеханічні перетворювачі енергії технологічного призначення» та «Теорія електромеханічного перетворення енергії». Наукові

інтереси пов'язані з розробкою поліфункціональних електромеханічних перетворювачів енергії, дослідженням енерго- та ресурсощадних технологій на їх основі для отримання речовин з новими властивостями; технологіями конверсії біомаси у високоякісний біогаз за скороченим терміном ферментації під впливом електромагнітного поля; технологіями енерготехнологічної переробки з гібридною системою енергозабезпечення для переробки побічних продуктів птахівництва у паливо, біологічні корми та добрива. Автор 382 наукових праць, з яких 12 монографій, 10 навчальних посібників, 62 патента і 16 авторських свідоцтв.

zablodskiy@nubip.edu.ua



Червінський Леонід Степанович

Доктор технічних наук, професор кафедри електротехніки, електромеханіки та електротехнологій Національного університету біоресурсів і природокористування України. Викладає дисципліни «Освітлювальні та опромінювальні установки», «Smart - електротехнології в біоінженерії» «Методика дослідження та організація підготовки дисертаційної роботи». Наукові інтереси пов'язані з дослідженням процесів взаємодії електромагнітної енергії

різного спектрального складу з живими організмами та їх керуванням; розробкою і впровадженням Smart - електротехнологій в біоінженерії; енергоефективними електротехнологічними комплексами в аграрному виробництві та енергозбереженням. Автор 283 наукових праць, з яких 2 монографії, 2 підручника, 8 навчальних посібників, 12 авторських свідоцтв, 2 патента.

lchervinsky@nubip.edu.ua

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА

РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ЗАКОНИ Й ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ГЕНЕРАЦІЇ ТА ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ

Висновок

Список використаних джерел

Питання для обговорення та самоперевірки

РОЗДІЛ 2. ЗАКОНОМІРНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ

Висновок

Список використаних джерел

Питання для обговорення та самоперевірки

РОЗДІЛ 3. УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ВЗАЄМОДІЇ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НАВАНТАЖУВАЛЬНО-ОХОЛОДЖУЮЧИМ СЕРЕДОВИЩЕМ **3**

Висновок

Список використаних джерел

Питання для обговорення та самоперевірки

РОЗДІЛ 4. ОПТИЧНІ ТА ФОТОЕЛЕКТРОКАТАЛІТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ

Висновок

Список використаних джерел

Питання для обговорення та самоперевірки

РОЗДІЛ 5. ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ КОНВЕРСІЇ БІОМАСИ, ПІДГОТОВКИ ТА СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВНИХ СУМІШЕЙ

Висновок

Список використаних джерел

Питання для обговорення та самоперевірки

ПЕРЕДМОВА

Відповідно до вимог кваліфікаційної характеристики фахівця з вищою освітою третього (освітньо-наукового) ступеня спеціальності G3«Електрична інженерія» з кваліфікацією PhD доктор філософії з електроенергетики, електротехніки повинен мати широку теоретичну і практичну підготовку та володіти знаннями для вирішення питань електроенергетики, електротехніки та електромеханіки. У системі підготовки аспірантів дисципліна «Закономірності енергетичних перетворень» віднесена до циклу спеціальної (фахової) підготовки як обов'язковий компонент ОНП.

У результаті вивчення дисципліни «Закономірності енергетичних перетворень» аспіранти повинні знати:

- конструкцію, принцип дії, теорію, основні фізичні процеси; робочі, механічні та техніко-економічні характеристики, методи випробувань перетворювачів енергії технологічного призначення;

- галузі застосування перетворювачів енергії технологічного призначення і тенденції їх розвитку;

- методи моделювання перетворювачів енергії технологічного призначення ;

- основні методи та засоби підвищення коефіцієнта корисної дії та коефіцієнта потужності перетворювачів енергії технологічного призначення;

Робота з написання навчального посібника розподілилась між авторами так: Заблудський М.М. – розділи 1, 2, 3, 5, Червінський Л.С. – розділ 4.

РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ЗАКОНИ Й ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ГЕНЕРАЦІЇ ТА ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ

1.1. Джерела та форми енергії

Існує велика кількість природних ресурсів і процесів, які можуть бути первинними джерелами енергії. Отже, джерело енергії – це природний об'єкт чи речовина, яка містить енергію, що може бути використана. Штучні об'єкти або речовини можуть бути джерелом енергії завдяки перетворенню різних форм енергії, наприклад, сонячного випромінювання за допомогою сонячних панелей, хімічної енергії в паливі (біопаливо, природний газ) шляхом спалювання, або ядерної енергії в ядерних реакторах. Для цього використовуються відповідні технології, які дозволяють ефективно видобувати, накопичувати та використовувати цю енергію для різних потреб. На рис.1.1 представлені первинні джерела енергії.



Рис.1.1. Джерела енергії

Як бачимо, функції первинних джерел – зберігання енергії в певній формі. Крім традиційних і відомих джерел, останнім часом виявлено нове джерело енергії – природний водень. Вчені вважають, що трильйони тонн цього чистого палива, які поховані під поверхнею Землі, можуть сформувати значне нове джерело енергії. В цілому джерела енергії можна поділити на категорії: відновлювані (сонце, вітер) та невідновлювані (корисні копалини). Джерела енергії використовуються для отримання потрібної нам форми енергії, яка надалі передається пристроям і механізмам для виконання певної роботи. На рис.1.2 представлені відомі на сьогодні форми енергії. Тут також можна виділити дві узагальнені категорії форм енергії:

- кінетична енергія: це енергія об'єктів, що рухаються, до якої можна віднести електричну енергію, променисту енергію, теплову енергію, енергію руху та звукову енергію;

- потенційна енергія: це енергія, що накопичується в будь-якому об'єкті завдяки його положенню або конфігурації. До цієї категорії можна віднести ядерну енергію, гравітаційну енергію, хімічну енергію та накопичену механічну енергію.



Рис.1.2. Форми енергії

Нижче надані характеристики відомих форм енергії:

- електрична енергія: енергія від руху заряджених частинок (іонів, електронів);
- ядерна енергія: енергія, що накопичується в ядрі атома, вивільняється під час поділу (розщеплення) або синтезу (злиття);
- радіантна світлова (радіантна) енергія: енергія, що поширюється у вигляді світла або інших електромагнітних хвиль;
- хімічна енергія: енергія, що накопичується у зв'язках між молекулами.

Прикладами є рідинне паливо, їжа, яку ми споживаємо, та акумуляторні батареї;

- тепла енергія: енергія рухомих молекул, яка дисипує у тепло;
- механічна енергія: енергія, що накопичується в об'єктах (потенційна) або їхньому русі (кінетична);
- гравітаційна енергія: потенційна енергія, яку об'єкт має завдяки своєму положенню в гравітаційному полі, подібному до поля Землі.

Відновлювані джерела енергії – це ресурси, які поповнюються Землею протягом певного періоду часу (сонячна енергія, вітрова енергія, гідроенергетика, геотермальна енергія, біомаса). Зазвичай вони поповнюються зі швидкістю, вищою за швидкість споживання, але навіть якщо ці ресурси є відновлюваними, збільшення споживання може їх виснажити, тому необхідно використовувати методи, які допомагають підтримувати ці ресурси. Технології

сталого перетворення – це методи, які використовують сучасні технології для розумного перетворення енергії, а саме: застосування технічних і організаційних рішень для зберігання надлишкової енергії, такі як акумулятори, розумних мереж для оптимізації розподілу енергії та мінімізації втрат енергії, перетворення надлишку відновлюваної енергії на водень для використання в різних секторах, таких як транспорт і промисловість.

1.2. Процеси та способи перетворення енергії

Процеси перетворення енергії відбуваються природним шляхом з певною закономірністю. Наприклад, енергія перетворюється з оптичного електромагнітного випромінювання в тепло, коли сонячне світло прогріває будинок, а енергія перетворюється з потенційної енергії в кінетичну, коли лист падає з дерева.

Пристрої перетворення енергії частіше спеціально розробляються та виготовляються для перетворення однієї форми енергії в іншу за допомогою одного процесу, при цьому для певного виду перетворень пристрої і засоби можуть відрізнитись не тільки модифікаціями, але і масштабістю. Наприклад, такі компоненти, як термопари, використовуються для вимірювання температури шляхом перетворення мікровоат теплової енергії в електрику, а потужні вугільні електростанції перетворюють гігавати енергії, що зберігається в хімічних зв'язках вугілля, теж в електрику.

Багато датчиків, які застосовуються для побудови контрольно-вимірювальних систем, є пристроями прямого перетворення енергії, включаючи тензодатчики, що використовуються для вимірювання тиску, датчики ефекту Холла, які вимірюють магнітне поле, і п'єзоелектричні датчики, що використовуються для виявлення механічних вібрацій. Електрична енергія, що виробляється в датчику, може бути настільки маленькою, що потрібно посилення.

Безумовно, в пристроях прямого перетворення енергії зустрічаються ефекти, які не є основними для їх роботи. Наприклад, сонячна батарея - це пристрій прямого перетворення енергії, який перетворює оптичне електромагнітне випромінювання в електрику. Хоча деякі сонячні промені, які потрапляють на сонячну батарею, можуть нагріти його замість цього, цей ефект не є основним для роботи сонячних елементів. В той же час, пристрої непрямого перетворення енергії включають низку процесів прямого перетворення енергії. Наприклад, деякі сонячні електростанції передбачають перетворення оптичного електромагнітного випромінювання в електрику шляхом нагрівання рідини для її випаровування. Енергію випаровування і розширення газу використовують для обертання ротору турбіни. При цьому енергія від механічного руху ротора перетворюється в змінний електричний струм в обмотках генератора. Посередником у цьому процесі стає мінливе за часом магнітне поле. Отже, методологія дослідження процесів перетворення енергії не вписується в єдину дисципліну і є міждисциплінарною.

Нижче вказані деякі способи перетворення енергії:

- *спосіб перетворення механічної енергії в електричну і навпаки* передбачає перетворення за допомогою певних засобів. Зазвичай це пов'язано з використанням генераторів, де механічна енергія обертових турбін використовується для індукування електричного струму в обмотках шляхом їх переміщення в магнітному полі. В електричних двигунах при взаємодії електричного струму обмоток з магнітним полем створюється електромагнітний момент і електрична енергія перетворюється на механічну енергію обертання вихідного вала.

- *спосіб перетворення теплової енергії на механічну* застосовується у випадку теплових двигунів або парових двигунів. У парових двигунах тепло подається до води для утворення пари, яка потім приводить у рух турбіну, що генерує механічну енергію.

- *спосіб перетворення хімічної енергії в електричну* передбачає перетворення енергії хімічних зв'язків в електричну енергію за допомогою певних засобів. Це спостерігається при застосуванні акумуляторних батарей та паливних елементів. Хімічні реакції в батареї генерують потік електронів, створюючи електричний струм.

- *спосіб перетворення ядерної енергії в електричну* реалізується при екзотермічній реакції поділу або синтезу. Вироблене тепло використовується для утворення пари, яка приводить в рух турбіни, що виробляють електричну енергію за допомогою генераторів.

- *спосіб перетворення електромагнітної енергії в електричну* з використанням методу індукції для індукування електрорушійної сили (ЕРС) у сусідньому провіднику і застосовується у трансформаторах.

Принцип ефективності застосовується під час виконання будь-якого процесу, особливо це стосується процесів перетворення енергії. Відповідно розробляються методи, які забезпечують перетворення енергії з максимальною ефективністю. Ось деякі методи підвищення ефективності перетворення енергії:

- коефіцієнт корисної дії перетворення енергії визначається як корисна вихідна енергія, поділена на вхідну енергію, тому для підвищення енергоефективності ми можемо зменшити кількість споживаної енергії, досягаючи при цьому того ж рівня енергообслуговування;

- організація регулярних аудитів може допомогти усунути потенційну причину втрат енергії. Це може допомогти проаналізувати і удосконалити моделі споживання енергії з метою мінімізації цих втрат енергії;

- метод використання відхідного тепла – це спосіб використання тепла, що виділяється під час технологічного процесу. Відхідне тепло, що утворюється під час процесів перетворення енергії, може бути використане для таких процесів, як виробництво електрики, нагрівання води тощо.

Галузь перетворення енергії стикається з певними викликами, які формують наступні проблеми:

- такі ресурси, як вугілля та нафта, обмежені в запасах, але вони є основним джерелом

енергії для транспортних засобів, таких як автомобілі та потяги. Водночас дефіцит цих ресурсів значно зріс за останнє десятиліття і управління ними є надскладним завданням;

- через високу вартість виробництва енергії громадяни мають нерівний доступ до енергії;

- через технологічний прогрес та зростання населення виник великий попит на ресурси та перетворення енергії, що не дає Землі достатньо часу для поповнення своїх ресурсів і призводить до руйнування природного балансу;

- зростання соціальних, економічних та політичних конфліктів між країнами та лідерами. Будь-який напад на глобальну енергосистему може мати дуже серйозні наслідки, загрожуючи резервам та зупиняючи постачання в багатьох країнах. Через нерівномірний розподіл енергії багато країн можуть використовувати свої ресурси та стверджувати своє домінування.

Галузь перетворення енергії схильна до значних змін, що супроводжуються швидким розширенням, головним чином завдяки технологіям та періодичним переоцінкам. Враховуючи сучасні тенденції, можна стверджувати, що жоден конкретний вид енергії не домінуватиме над усіма іншими, а зусилля щодо роботи з енергетичними ресурсами будуть направлені на те, щоб загальні системні вимоги задовольнялися найефективнішим чином. З розвитком технологій відбудуться значні розробки в системах генерації та перетворення енергії, що дозволить уникнути значної частини складності процесів, яка зараз існує, і тим самим усунути деякі основні забруднювачі.

1.3. Інновації у сфері відновлюваної енергетики

Інновації у сфері відновлюваної енергетики мають вирішальне значення для досягнення нульових викидів до 2050 року, особливо у важкодоступних для декарбонізації секторах, таких як важка промисловість. Водночас інновації у сфері відновлюваної енергетики в екосистемі мають вирішальне значення для постійного підвищення енергоефективності. Ці вдосконалення допомагають знизити витрати та покращити можливості відновлюваної енергетики, що зрештою збільшує її впровадження. Далі представлені головні інновації у сфері відновлюваної енергетики, які можуть відіграти ключову роль у згаданих процесах.

1.3.1 Плавучі морські вітрові електростанції

На відміну від традиційних морських вітрових електростанцій, які закріплені на морському дні, плавучі вітрові турбіни можна розміщувати на глибших водах, де вітри сильніші та стабільніші. На відміну від наземних вітрових установок, офшорні електростанції можуть бути більшими та ефективнішими завдяки стабільнішому та сильнішому вітру в морі, а також менше впливають на ландшафт та викликають менше соціальних конфліктів. Ця інновація значно розширює потенціал виробництва енергії вітру, особливо в

регіонах, де океан занадто глибокий для звичайних турбін. З оціночного світового потенціалу морської вітроенергетики обсягом 71 000 ГВт доступні 51 000 ГВт лише за допомогою плавучих турбін. На рис.1.3. показана плавуча морська вітрова електростанція з 5 турбінами.

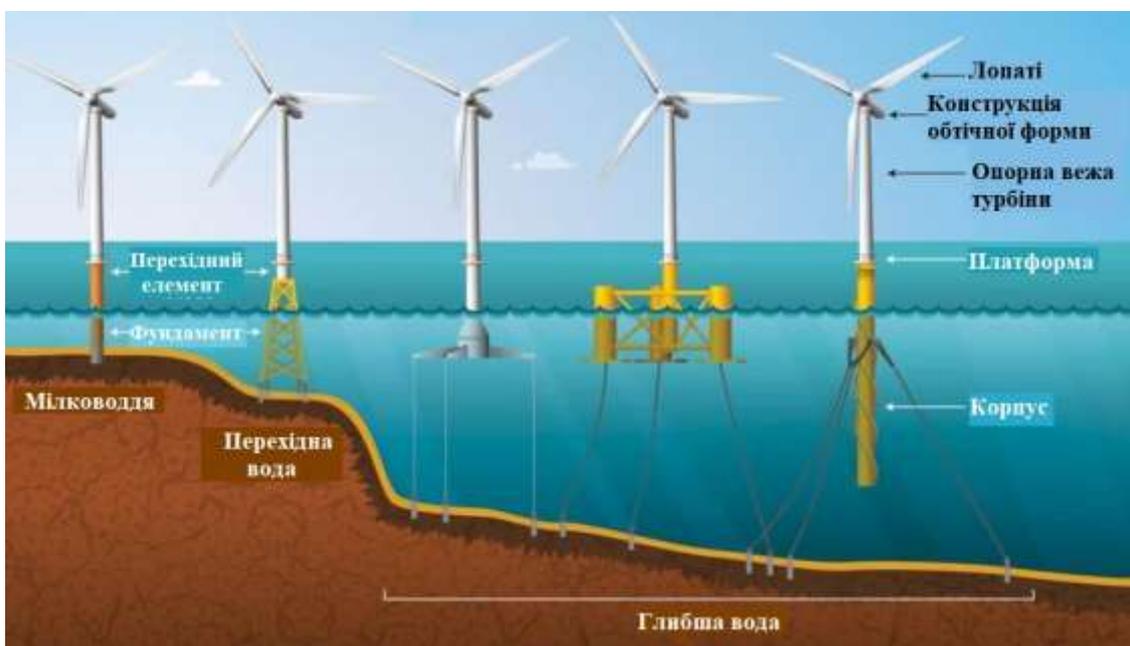


Рис.1.3. Плавуча морська вітрова електростанція

Однак ця технологія все ще перебуває на ранніх стадіях, а проекти переважно перебувають на стадії техніко-економічного обґрунтування. Наприклад, проект Hwind Scotland – це пілотний проект плавучої вітрової електростанції потужністю 30 МВт, який працює з 2017 року. Результати проекту є багатообіцяючими, щороку з моменту його розробки досягається найвищий середній коефіцієнт використання потужності серед усіх морських вітрових електростанцій в Англії. Вітрові турбіни на глибині 95-120 м у воді закріплені трьома присмоктувальними якорями кожна та електрично з'єднані між собою для передачі виробленої електроенергії на берег (довжина кабелю приблизно 30 км).

1.3.2. Надувний вітрогенератор, що літає

Компанією Linyi Yunchuan Energy Technology Co. Ltd. (Китай) розроблена найбільша у світі вітрова турбіна, що літає, яка має основний газовий мішок, наповнений гелієм, з кільцевим крилом, що утворює гігантський повітропровід і використовує стабільні висотні вітри для приведення в рух ротора.



Рис.1.4. Вітроенергетична система -дирижабль S1500

Енергогенеруюча система, що складається з 12 генераторів потужністю 100 кВт, стабільно передає електроенергію на землю через прив'язувальні кабелі. При цьому, вартість кіловат-години може знизитись на 30%. Надувна конструкція також робить енергогенеруючу систему надзвичайно легкою для переміщення на великі відстані. Універсальна надувна турбіна - мобільна електростанція, здатна працювати на висоті до 1 500 метрів, де вітер швидший і стабільніший, ніж на рівні традиційних веж, швидко переміщатися, виробляючи при цьому значні обсяги електроенергії, яка живить побутові прилади без електрики тиждень.

Для масового виробництва вітрових турбін S1500 необхідно подолати ряд викликів: формування нормативно-правової бази та стандартів безпеки, демонстрація стабільності роботи установки в екстремальних погодних умовах, а також довговічності її компонентів.

1.3.3. Водневі паливні елементи для зберігання енергії

Зі зростанням попиту на надійні та стійкі рішення для зберігання енергії вдома, водневі паливні елементи стають реальною альтернативою традиційним літій-іонним акумуляторам для зберігання енергії. Водневі паливні елементи пропонують кілька переваг, включаючи довший термін служби та вищу щільність енергії. Це робить їх особливо придатними для живлення будинків та малого бізнесу, особливо у віддалених районах з обмеженим доступом до мережі. Основні фактори зростання ринку водневих паливних елементів можна сформулювати таким чином:

- * зі зростанням екологічної стурбованості та проблем зміни клімату існує високий попит на чисті джерела енергії, що стимулює ринок водневих паливних елементів. Водневі паливні елементи є чудовим рішенням для важких вантажівок та вантажівок для далекобійних перевезень.

- * зростаючий розвиток гібридних автомобілів сприяє розширенню ринку. Гібридні автомобілі працюють на двигунах внутрішнього згорання. Однак поєднання акумуляторів та водневих паливних елементів підвищує продуктивність цих двигунів, оскільки вони працюють як на акумуляторах, так і на водні, мінімізуючи вплив на навколишнє середовище.

- * зростаючий прогрес у технології водневих паливних елементів стимулює інновації, підвищуючи ефективність та продуктивність. За технологією сьогодні відомі: паливні елементи з протонно-обмінною мембраною; фосфорнокислотні паливні елементи; твердооксидні паливні елементи; паливні елементи з полімерно-обмінною мембраною (PEMFC); паливні елементи прямого метанолу (DMFC); паливні елементи з розплавленого карбонату.

- * зростання урядових ініціатив щодо просування водневої енергетики стимулює зростання ринку.

Гібридна система водневих акумуляторів для автономних будинків на фотоелектричних батареях. Дослідники з Університету прикладних наук Ганзе в Гронінгені в Нідерландах вперше вирішили задачу, як поєднати виробництво водню та зберігання енергії в акумуляторах з фотоелектричними панелями на дахах або невеликими вітровими турбінами в автономних домогосподарствах.

Водневі системи на основі електролізерів з протонно-обмінною мембраною (PEM) мають перевагу швидкого реагування, що підходить для систем зберігання, де воднева система діє як основний накопичувач, а акумулятор — як вторинний накопичувач (рис.1.5). Однак водень, отриманий за допомогою електролізу, необхідно висушити та очистити від слідів води та кисню, перш ніж його можна буде використовувати.

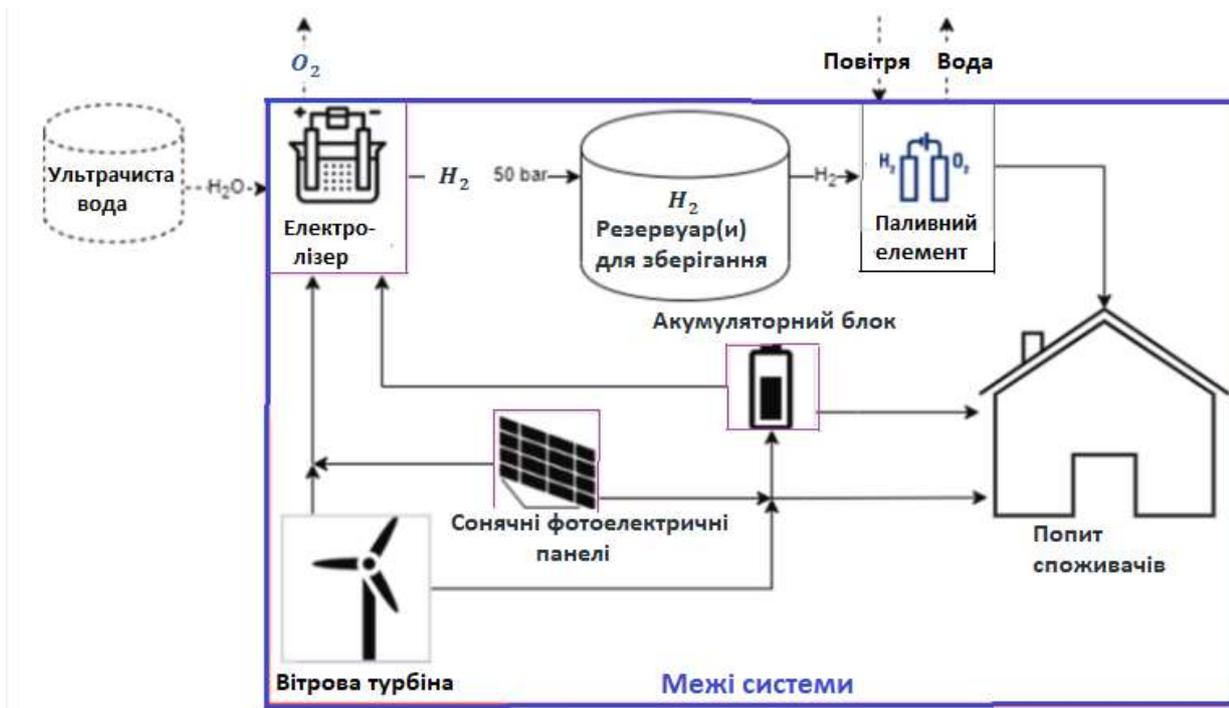


Рис. 1.5. Гібридна система водневих акумуляторів для автономних будинків

Запропонована система призначена для зберігання надлишкової сонячної енергії, при цьому акумулятор служить основним накопичувачем лише тоді, коли виробництво водню негайно недоступне. Вона складається з системи електролізу водню РЕМ потужністю 4,5 кВт, резервуара для зберігання водню об'ємом 0,85 м³, очищувального блоку потужністю 0,8 кВт, водневого паливного елемента РЕМ та літій-іонного акумулятора. Паливний елемент може подавати енергію лише безпосередньо споживачеві та не заряджає акумулятор і не підтримує електролізер, а для роботи електролізеру та паливного елемента потрібні демінералізована вода та повітря відповідно.

Дослідницька група змоделювала роботу системи за допомогою програмного забезпечення Python та використала кілька вхідних даних, щоб вирішити, як зберігати електроенергію за її надлишку. Програмне забезпечення Python використовується для розробки веб-застосунків, аналізу даних, штучного інтелекту, автоматизації та багатьох інших завдань у великих компаніях, таких як Google, Netflix та NASA. Python є інтерпретованою, об'єктно-орієнтованою мовою високого рівня, що підтримує кілька парадигм програмування та має велику екосистему готових бібліотек та інструментів. Серія моделювань показала, що використання виключно енергії вітру було більш економічно ефективним, ніж використання лише сонячної енергії, тоді як комбінація двох джерел дала найкращі результати.

1.3.4. Удосконалені геотермальні системи

Геотермальна енергія давно визнана за свій потенціал як постійне та надійне джерело відновлюваної електроенергії. Однак традиційні геотермальні системи

обмежені регіонами з природними геотермальними резервуарами для виробництва електроенергії. Природна геотермальна система, відома як гідротермальна система, потребує трьох ключових елементів для вироблення електроенергії: тепла, рідини та проникності, тобто коли рідина може вільно рухатися крізь підземну породу. Однак у багатьох районах підземні породи гарячі, але природної проникності або рідин недостатньо. У таких випадках вдосконалена геотермальна система (ВГС) може бути використана для створення штучного резервуара для використання цього тепла і отримання енергії. У системі ВГС рідина закачується глибоко під землю за ретельно контрольованих умов, щоб створити нові тріщини та спричинити повторне відкриття вже існуючих тріщин, створюючи проникність. Підвищена проникність дозволяє рідині циркулювати в більш тріщинуватій гарячій породі, і рідина нагрівається під час циркуляції. На рис. 1.6 представлена модель вдосконаленої геотермальної системи.

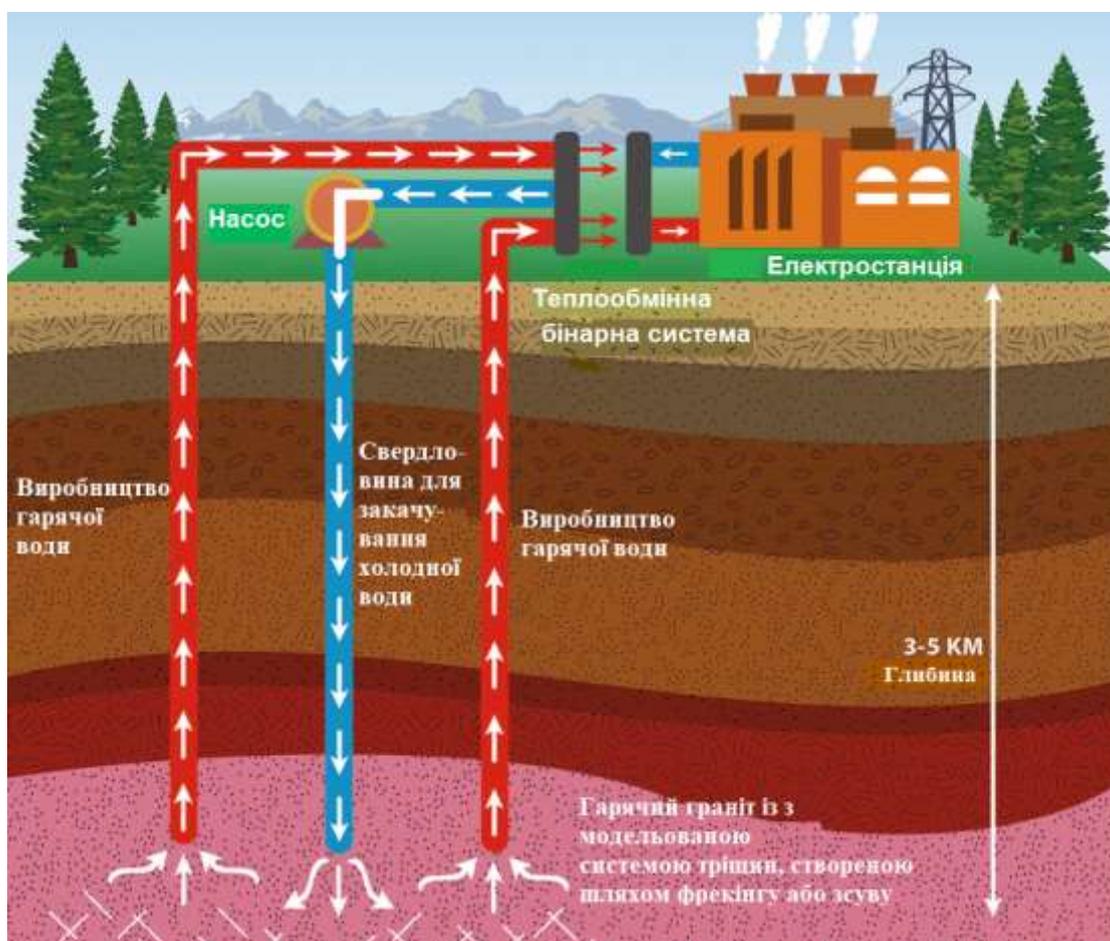


Рис. 1.6. Вдосконалена геотермальна система

Насоси викачують гарячу воду на поверхню, де вона виробляє електроенергію для мережі. ВГС може сприяти розвитку геотермальної енергетики за межами традиційних гідротермальних регіонів, тим самим розширюючи виробництво геотермальної енергії по всій країні. Досягнення ВГС сьогодні демонструються в усьому світі, як у державному, так і в приватному секторах. Технологію ВГС

можна розгортати в районах, де немає типових рідин та проникності під землею, необхідних для традиційної геотермальної енергії.

Геотермальна технологія наступного покоління має значні переваги перед іншими відновлюваними джерелами енергії. По-перше, вона відкриває значний ресурсний потенціал з мінімальними вимогами до землекористування. Вчені Массачусетського технологічного інституту припускають, що геотермальна енергія може вдвічі задовольнити загальний світовий попит на енергію. По-друге, це може забезпечити диспетчеризовану, гнучку електроенергію, яка не залежить від погоди. Геотермальні електростанції наступного покоління можуть збільшувати та зменшувати виробництво протягом кількох хвилин і працювати стільки, скільки необхідно для забезпечення надійності мережі, завдяки вдосконаленому керуванню потоком свердловин та налаштуванням енергосистеми.

1.3.5. Біоенергетика з уловлюванням та зберіганням вуглецю

Біоенергетика з уловлюванням та зберіганням вуглецю (BECCS) – це зростаюча інноваційна технологія у сфері відновлюваної енергії, за якою зазвичай спалюється біомаса для виробництва енергії, одночасно уловлюючи та зберігаючи вуглекислий газ, ефективно зменшуючи вуглецевий слід майже до нуля. BECCS може забезпечувати високотемпературне тепло, що має вирішальне значення для важкої промисловості, яка намагається декарбонізувати свої викиди за допомогою стандартних відновлюваних джерел енергії.

Більшість проектів BECCS все ще перебувають на стадії демонстрації. Незважаючи на зростання обізнаності щодо важливості BECCS для досягнення нульового рівня викидів, рівень впровадження залишається низьким.

Біогенними джерелами, що використовуються для BECCS, можуть бути технологічні викиди, що утворюються в результаті виробництва біопалива та біоводню, або викиди від горіння внаслідок виробництва тепла та електроенергії на електростанціях, заводах з переробки відходів на енергію та промислових підприємствах, що спалюються або спільно спалюються на біомасі (цемент, целюлоза та папір) або використовують біовугілля як відновник (сталь). Як альтернатива зберігання, уловлений CO₂ також може бути використаний як сировина для низки продуктів. Хоча деякі шляхи уловлювання та утилізації вуглецю можуть принести важливі кліматичні переваги, видалення CO₂ може бути досягнуто лише шляхом постійного зберігання.

Хоча біоетанол наразі є провідним застосуванням BECCS, очікується, що буде реалізовано більше проектів в енергетиці та промисловості. До 2030 року близько 30 млн тонн біогенного CO₂ може бути вловлено теплоелектроцентралями, причому понад 80% – спеціалізованими біоелектростанціями, а решта – установками з переробки відходів на виробництво енергії. Більшість цементних заводів, які планують використовувати біомасу та уловлювання і зберігання вуглецю, прагнуть бути в кращому випадку вуглецево нейтральними, а не вуглецево негативними, завдяки частковим показникам уловлювання або частковій заміні викопного палива

біомасою. Відомі проекти, які спрямовані на модернізацію систем уловлювання та зберігання вуглецю на целюлозно-паперових комбінатах. Існують плани щодо водневих установок, які частково або повністю працюватимуть на біомасі з технологією уловлювання та зберігання вуглецю.

1.3.6. Турбіни для припливної енергії та енергії хвиль

Енергія припливів є однією з найбільш стабільних форм відновлюваної енергії, оскільки припливи передбачувані та відбуваються регулярно. Уряди різних країн світу дедалі частіше впроваджують нове законодавство та регуляторні режими для підтримки проектів офшорної енергетики, а також застосовують стратегічні підходи для вирішення проблем, з якими стикається галузь. Офшорна енергетика — це сфера відновлюваної енергетики, яка використовує енергію моря для генерації електроенергії за допомогою морських електростанцій. На рис.1.7 зображена припливна турбіна Orbital Marine.



Рис.1.7. Припливна турбіна Orbital Marine

Тяжіння Місяця і Сонця породжують в Світовому океані приливну хвилю. Висота цієї хвилі максимальна, коли Земля, Місяць і Сонце знаходяться на одній лінії, і мінімальна, коли напрями на Місяць і Сонце складають прямий кут. Унаслідок добового обертання Землі хвиля накопчується на береги материків. Амплітуда приливно-відливних коливань рівня біля берега залежить від рельєфу дна і від форми берегової межі. Максимальна висота приливно-відливних коливань в затоці Фанді на атлантичному побережжі Канади складає 19,6 м. Швидкості приливно-відливних течій досягають 4 м/с, щільність енергії при цьому складає до 4 кВт/м.

Приклад. Підняту на максимальну висоту під час приливу воду можна відокремити від моря греблею або греблею в басейні площею **A**. Якщо потім під

час відливу пропустити цю масу води через турбіни, то можна отримати середнє значення потенційної енергії води на греблі:

$$\bar{E} = \rho A R^2 g / 2 \quad (1.1)$$

де $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ - прискорення вільного падіння на поверхні Землі. Це константа, яка вказує на силу тяжіння, що діє на масу;

R - висота водяного стовпа над умовним рівнем відліку. Для гребель цей рівень часто обирають як найнижчу точку, куди вода може впасти, наприклад, рівень турбін або дно нижче греблі;

ρ – щільність води дорівнює 997 кг / м^3 .

Загальну масу води, що перебуває за греблею можна розрахувати як добуток густини води (ρ) на об'єм води (V), тобто $m = \rho V$. При значеннях $A=10 \text{ км}^2$, $R=4 \text{ м}$ потенційна енергія води на греблі становить $217519,88 \text{ кВт}\cdot\text{год}$. За період, наприклад, $12,447 \text{ год}$ виробляється середня потужність $17,48 \text{ МВт}$.

Проте не лише цей чинник важливий для розвитку приливної енергетики. Необхідно брати до уваги і капітальні витрати, і майбутній прибуток від створення відповідних приливних електростанцій (ПЕС). Високі капіталовкладення, витрачені на будівництво, мабуть, можуть бути виправдані, якщо буде отримана електроенергія, побудовані дороги уздовж гребель, а басейн електростанції буде використаний для накопичення енергії, поліпшення умов судноплавства. Отже, розвиток приливної енергетики сильно пов'язаний з конкретною специфікою районів майбутнього будівництва.

Приливні електростанції мають наступні **переваги**:

– висока передбачуваність режиму роботи. Висота, хід і періодичність приливів в більшості прибережних районів добре описані і проаналізовані завдяки потребам навігації і океанографії. Поведінка приливів може бути передбачена досить точно, з погрішністю менше 4%. Таким чином, приливна енергія виявляється вельми надійною формою поновлюваної енергії;

– не забруднюють атмосферу шкідливими викидами на відміну від теплових станцій;

– не затоплюють земель на відміну від гідроелектростанцій;

– не представляють потенційної небезпеки на відміну від атомних станцій;

– вартість електроенергії найдешевша в енергосистемі (доведено за 35 років на ПЭС Ранс - Франція).

Недоліки ПЕС:

– неспівпадіння основних періодів виникнення приливів (12 годин 25 хв. і 24 години 50 хв.), пов'язаних з рухом Луни, із звичним для людини періодом сонячної доби (24 години), у зв'язку з чим оптимум приливної генерації знаходиться не у фазі з потребами в енергії;

– зміна висоти приливу і потужності приливної течії з періодом в два тижні, що приводить до коливань вироблення енергії;

– необхідність створення потоків води з великою витратою при порівняно малому перепаді висот, що змушує використовувати велике число турбін, що працюють паралельно;

– дуже високі капітальні витрати на спорудження більшості передбачуваних ПЕС.

Для оптимізації виробництва електроенергії **турбіни ПЕС** повинні використовуватися в декількох режимах, вибір яких залежить від необхідної в даний момент потужності, потреб і можливостей інших виробників електроенергії. Існує багато варіантів режимів, але використовуються головним чином наступні:

➤ якщо ПЕС побудована для забезпечення місцевих потреб в енергії, то необхідні страхувальні енергоустановки, що підключаються в період згасання приливів;

➤ якщо ПЕС включена в потужну енергомережу і є порівняно невеликим джерелом в масштабах мережі, то заздалегідь визначені варіації приливної енергії можуть бути пристосовані до потреб енергомережі;

➤ якщо вимоги в приливній енергії не пов'язані жорстко з сонячним періодом, то приливну енергію можна використовувати в природному режимі. Наприклад, якщо електроенергія, що виробляється, ПЕС йде на потреби транспорту — зарядку акумуляторів або виробництво водню, то вона виявляється розв'язаною від інших джерел електроенергії.

Ефективність ПЕС можна збільшити, якщо всі її агрегати при повній воді використовувати в насосному режимі для піднімання рівня в басейні. Припустимо, ми маємо систему, в якій висота приливу 5 м. Підйом рівня навіть на 1 м по відношенню до вищої точки приливу дозволяє забезпечити генерацію при малій воді з перепадом вже 6 м. Навіть якщо насосний режим і режим генерації мають ефективність 50%, вигреш від вироблення електроенергії буде порядку 200%.

ПЕС принципово може працювати як при спустошенні басейну, так і при його наповненні. Оптимальна станція, що використовує гідроагрегати, що реверсують, які, крім того, можна ще використовувати і в насосному режимі для підвищення рівня в басейні, може переробляти до 90% потенційної енергії приливу.

Найбільш перспективними вважаються поточні ПЕС (рис.1.8).



Рис.1.8. Схема поточних електростанцій

У Північній Ірландії до Національних енергомереж підключена перша у світі комерційна приливна електростанція SeaGen потужністю 1,2 мегавата, побудована компанією Marine Current Technologies. Установка складається з двох підводних турбін, що витягають електрику з потужних приливно-відливних течій затоки Стренгфорд Локс. Принцип роботи приливної електростанції схожий з роботою вітрогенератора, тільки замість вітру рушієм турбін є підводна течія. Особливість таких установок – низькі витрати на будівництво у порівнянні з будівництвом плотин. Ротори турбін SeaGen мають 16 метрів в діаметрі і оптимальну швидкість обертання 14 обертів на хвилину. Лопаті роторів оснащені системою управління і можуть обертатися, змінюючи кут атаки. Ротори закріплені на горизонтальній балці, встановленій на чотирьохточкову опору. Опора може міняти висоту над морським дном, піднімаючи установку для ремонту і обслуговування.

Французька компанія Nexans уклала контракт на постачання підводних кабелів для майданчика PacWave South, першого в Сполучених Штатах підключеного до мережі випробувального центру хвильової енергії, розташованого біля узбережжя Орегону. На рис.1.9 зображено тестовий майданчик хвильових пристроїв генерації електричної енергії.

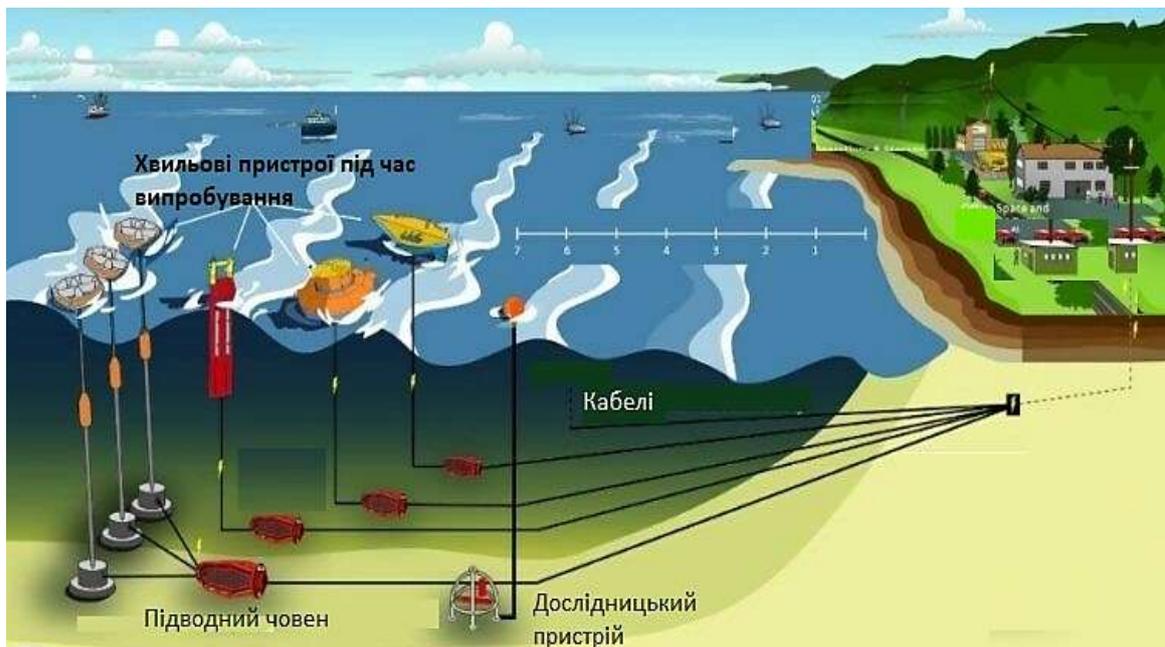


Рис.1.9. Тестовий майданчик хвильових пристроїв генерації електричної енергії PacWave університету штату Орегон

PacWave South складається з чотирьох причалів, які вловлюють енергію, що утворюється внаслідок руху хвиль, і кожен причал вироблятиме до 5 МВт енергії. Компанія RT Casey обрала Nexans для проектування, розробки та виробництва підводних та наземних кабелів напругою 36 кВ, які прокладуть на океанське дно та чотири кабелі змінного струму середньої напруги, які передаватимуть енергію від причалів до берега.

1.3.7. Виробництво зеленого водню шляхом електролізу з використанням відновлюваної енергії

Перспективним рішенням для декарбонізації промисловості та досягнення глобальних кліматичних цілей є виробництво зеленого водню шляхом електролізу з використанням відновлюваної енергії. На відміну від традиційного водню, який виробляється з викопного палива та передбачає уловлювання вуглецю, зелений водень не утворює парникових газів під час виробництва, що робить його повністю чистим. Прогнози показують, що зелений водень може задовольнити до 24% світових енергетичних потреб до 2050 року [9].

Водень є перспективним джерелом палива для енергетичного переходу, але не весь водень однаковий. Зелений водень та блакитний водень – це два основні типи водневих масел, але вони мають дуже різний вплив на навколишнє середовище. З огляду на такий великий розрив у впливі, не дивно, що нафтогазова промисловість підтримує один тип, а прихильники клімату — інший.

Окрім екологічних переваг, водень є високоефективним енергетичним ресурсом. На рис.1.10 предсталена діаграма переваг зеленого водню.

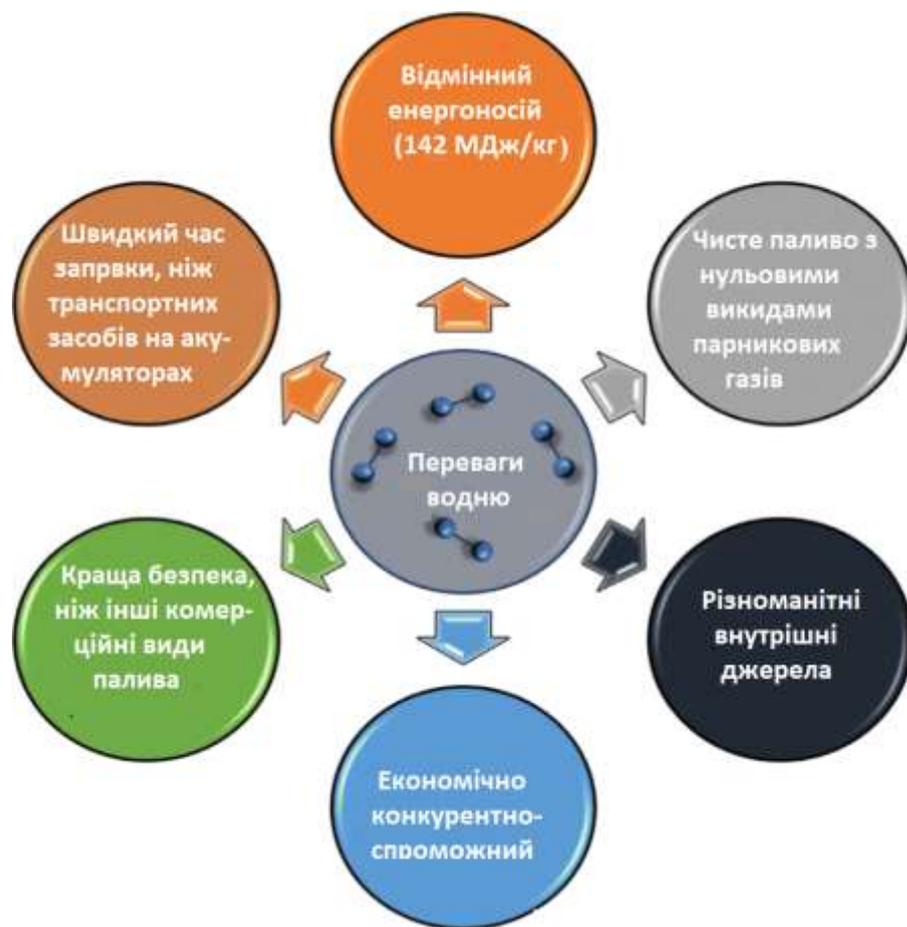


Рис.1.10. Переваги зеленого водню [9]

Незважаючи на свій потенціал, вартість виробництва зеленого водню – наразі від 3 до 8 доларів США за кг – залишається складною. Однак, завдяки технологічному прогресу та збільшенню інвестицій, очікується, що виробничі витрати знизяться до 1–2 доларів США за кг до 2050 року. Ці технологічні досягнення стимулюватимуть зростання виробництва зеленого водню.

1.3.8. Сонячно-теплова електростанція з двома вежами

Китай офіційно запустив свою першу сонячну теплову електростанцію в пустелі Гобі, повідомляє South China Morning Post, передає Azernews [10].

Завод був розроблений державною китайською корпорацією «Три ущелини» та має інноваційний дизайн, що складається з 27 000 дзеркал — геліостатів, які фокусують сонячне світло на двох високих спорудах. Ці вежі мають висоту близько 200 метрів і розташовані приблизно на відстані 1000 метрів одна від одної — новаторська установка в технології сонячної теплової енергії.

Ця система генерує тепло за температури, що досягає близько 570 градусів Цельсія, яке використовується для виробництва пари для приведення в дію турбін, що виробляють електроенергію.



Рис.1.11. Сонячно-теплова електростанція з двома вежами [10]

Інженери підкреслюють, що така конструкція дозволяє електростанції продовжувати виробляти енергію навіть після заходу сонця або в хмарні умови, підвищуючи надійність.

Китайська корпорація «Три ущелини» пояснила, що наявність двох веж оптимізує ефективність станції. Одна вежа працює вранці, а інша — вдень, що підвищує загальну ефективність приблизно на 25% порівняно з традиційними системами з однією вежею. Такий підхід з двома вежами також зменшує кількість необхідних дзеркал, знижуючи витрати на проект.

Експерти вважають, що ця технологія має значний потенціал для розвитку сектору «зеленої» енергетики Китаю. Наразі по всій країні працює 21 комерційна сонячна теплова електростанція, які разом виробляють понад 1,5 мільйона кіловат чистої енергії.

Величезний та сонячний ландшафт пустелі Гобі робить її ідеальним місцем для масштабних сонячних проектів, допомагаючи Китаю використовувати відновлювану енергію, одночасно зменшуючи свій вуглецевий слід та наближаючись до своїх амбітних цілей вуглецевої нейтральності.

1.4. Основні закони генерації та перетворення енергії

1.4.1. Закон збереження енергії (перший закон термодинаміки)

Енергію не можна ні створювати, ні знищувати; вона може лише змінювати свою форму або передаватися з однієї системи в іншу.

Цей закон є фундаментальним у проектуванні енергетичних систем, який забезпечує рівність загальної енергії, що надходить до системи, і загальної енергії, що виходить з системи, плюс будь-яка накопичена енергія. Загальна енергія в ізольованій системі залишається постійною.

Приклад. У двигуні автомобіля відбувається спалювання рідинного або газоподібного палива, внаслідок якого хімічна енергія палива перетворюється на механічну енергію для руху автомобіля. При цьому загальна енергія системи (включаючи тепло та звук) залишається незмінною.

В електроенергетичній галузі закон збереження енергії проявляється як **закон напруги Кірхгофа** (сума напруг у петлі дорівнює нулю). Цей принцип використовується в аналізі енергетичних систем для розуміння того, як змінюється електричний потенціал у колі (рис.1.12).

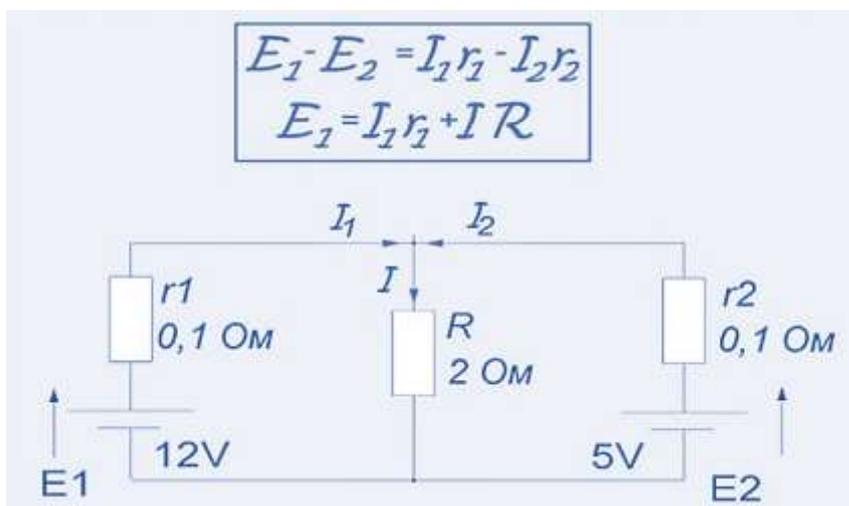


Рис.1.12. Закон напруги Кірхгофа

Закон струму Кірхгофа (сума струмів, що входять у вузол, дорівнює нулю) відображає збереження електричного заряду та енергії (рис.1.13).

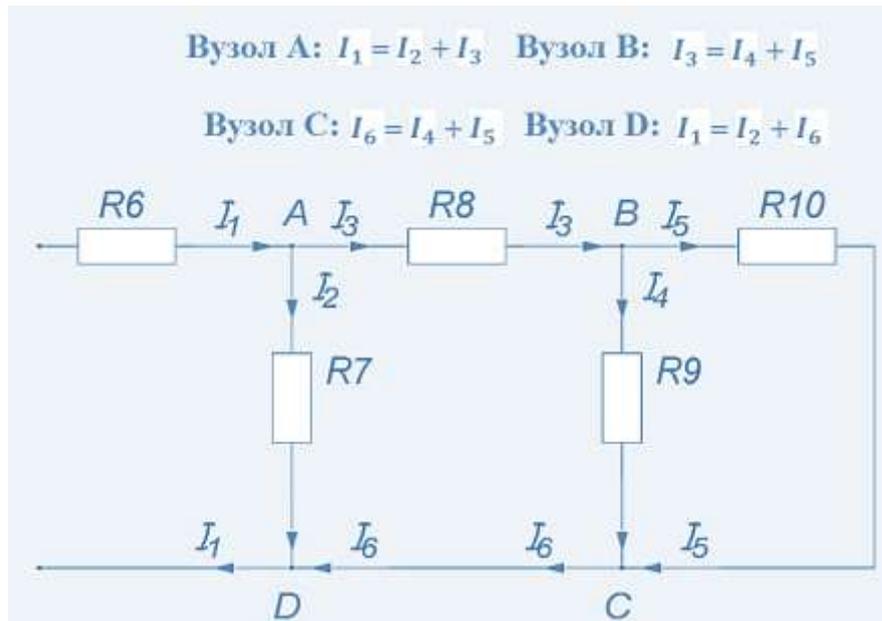


Рис.1.13. Закон струму Кірхгофа

Математичне пояснення закону збереження електричного заряду можна здійснити використовуючи рис. 1.14, де: V - довільний об'єм; S - замкнена обмежувальна поверхня; $\vec{J}_{\text{вл}}$ - густина зовнішнього потоку струму через поверхню S ; $d\vec{a}$ - елемент площі поверхні; $\rho_{\text{вл}}$ - густина заряду. $\rho_{\text{вл}}$

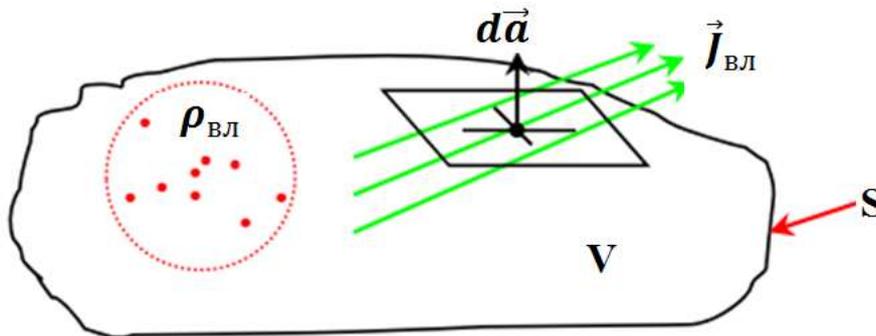


Рис.1.14. Ілюстрація до закону збереження електричного заряду

Визначемо основні параметри і характеристики процесів у запропонованій структурі. Електричний заряд, що міститься в об'ємі V у момент часу t :

$$Q_{\text{вл}}(t) = \int_V \rho_{\text{вл}}(\vec{r}, t) dV, \text{ Кл} \quad (1.2)$$

Через замкнену обмежувальну поверхню S у момент часу t з об'єму V протікає електричний струм:

$$I_{\text{вл}}(t) = \oint_S \vec{J}_{\text{вл}}(\vec{r}, t) d\vec{a}, A \quad (1.3)$$

Цей струм напряму пов'язаний зі зменшенням заряду в об'ємі v :

$$I_{\text{вл}}(t) = -\frac{dQ_{\text{вл}}(t)}{dt}, \text{ Кл/с} \quad (1.4)$$

Отже, закон збереження електричного заряду і відповідні рівняння неперервності в інтегральній та диференціальній формах можна представити у такому вигляді:

$$I_{\text{вл}}(t) = \oint_S \vec{J}_{\text{вл}}(\vec{r}, t) d\vec{a} = -\frac{dQ_{\text{вл}}(t)}{dt} \quad (1.5)$$

або

$$\frac{dQ_{\text{вл}}(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \int_v \rho_{\text{вл}}(\vec{r}, t) dv = \int_v \frac{\partial \rho_{\text{вл}}(\vec{r}, t)}{\partial t} dv \quad (1.6)$$

$$\int_v \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_{\text{вл}}(\vec{r}, t) dv = -\int_v \frac{\partial \rho_{\text{вл}}(\vec{r}, t)}{\partial t} dv \quad (1.7)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_{\text{вл}}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial \rho_{\text{вл}}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (1.8)$$

1.4.2. Другий закон термодинаміки

Другий закон термодинаміки – це закон зростання ентропії в нерівноважених процесах (у стані рівноваги ентропія досягає максимуму). Закон зростання ентропії можна трактувати і як закон зниження якості енергії, згідно якому неможливо відновити або повторно використати високоякісну енергію для виконання корисної роботи. Будучи раз використаною, сконцентрованою, високоякісною енергією потім розсіюється у навколишньому середовищі у вигляді низькопотенційного тепла. При цьому ми можемо впливати лише на зміну ККД даного процесу. Цей закон пояснює, чому перетворення енергії ніколи не бувають на 100% ефективними. Деяка енергія завжди втрачається в процесі у

вигляді невикористаного тепла, збільшуючи загальну неупорядкованість навколишнього середовища. Основні фізичні величини і параметри, що характеризують стан термодинамічної системи, розглянемо на прикладі хімічного процесу.

1.4.3. Енергія хімічних реакцій

Енергія хімічних реакцій може бути представлена двома типами: перший пов'язаний з енергією, що виділяється або поглинається в процесі перетворення реагентів в продукти; другий – пов'язаний з кінетикою реакції, тобто енергією, якою повинні володіти реагуючі молекули, щоб перевершити енергетичний бар'єр для перетворення на продукцію. Вимоги для здійснення і продовження хімічних реакцій формулюються наступним чином:

- наявність внутрішньої енергії речовин, за рахунок якої рухаються молекули і стикаються з іншими молекулами. Отже, зіткнення між реагентами – перша вимога для продовження реакції;
- молекули повинні мати належну орієнтацію (кут) під час зіткнення, від якої залежить ефективність розриву зв'язків;
- крім потенційної хімічної енергії, молекули, що стикаються, повинні мати кінетичну енергію рівну або вище енергії активації, щоб перевершити енергетичний бар'єр активації.

Зміна енергії - один з факторів, що дозволяє орієнтуватись, чи відбувається певна реакція. Для будь-якої хімічної реакції повинні існувати рушійні сили – ентальпія і ентропія.

Ентальпія (або **теплова функція**) — термодинамічний потенціал, що характеризує стан термодинамічної системи. Функція позначається як $H(S, P, N, x_i)$, де у якості основних незалежних приймається ентропія S і тиск P , N — число частинок системи, x_i — інші макроскопічні параметри системи .

Ентропія (S) — фізична величина, яка в спостережуваних явищах і процесах характеризує інфляцію (розсіювання) енергії, зумовлене перетворенням усіх її видів на теплову і рівномірним розподілом тепла між тілами (вирівнювання їхніх температур). Одночасно – це міра ступеня випадковості або розладу системи .

Хімічні реакції мають тенденцію протікати таким чином, щоб збільшити загальну ентропію системи. Для даної речовини ентропія рідкого стану більше, ніж ентропія твердого стану. Так само ентропія газу більше, ніж ентропія рідини. Тому ентропія збільшується в процесах, при яких тверді або рідкі реагенти утворюють газоподібні продукти. Ентропія також збільшується, коли тверді реагенти утворюють рідкі продукти. Ентропія збільшується, коли речовина розпадається на кілька частин. Ентропія збільшується з підвищенням температури, оскільки частинки речовини мають більшу кінетичну енергію. Ентропія, як правило, збільшується в реакціях, в яких загальна кількість молекул продукту перевищує загальну кількість молекул реагентів.

Ентальпія — адитивна функція, тобто ентальпія всієї системи дорівнює сумі ентальпій її складових частин. Із внутрішньою енергією U системи ентальпія зв'язана співвідношенням: $H = U + PV$, де U — внутрішня енергія, P — тиск, V — об'єм.

Ентальпія залежить від тиску та ентропії системи, тобто при незмінних N і x_i її повний диференціал дорівнює $dH = VdP + TdS$, де T — абсолютна температура тіла (системи). Якщо процес проходить при сталому тиску, то приріст ентальпії дорівнює переданій тілу теплоті $dQ = TdS$.

Хімічна реакція, яка виділяє тепло, є екзотермічною, а хімічна реакція, яка поглинає тепло, — це ендотермічна реакція. Утворення зв'язків завжди екзотермічне, а розрив зв'язків — ендотермічне (рис.1.15).

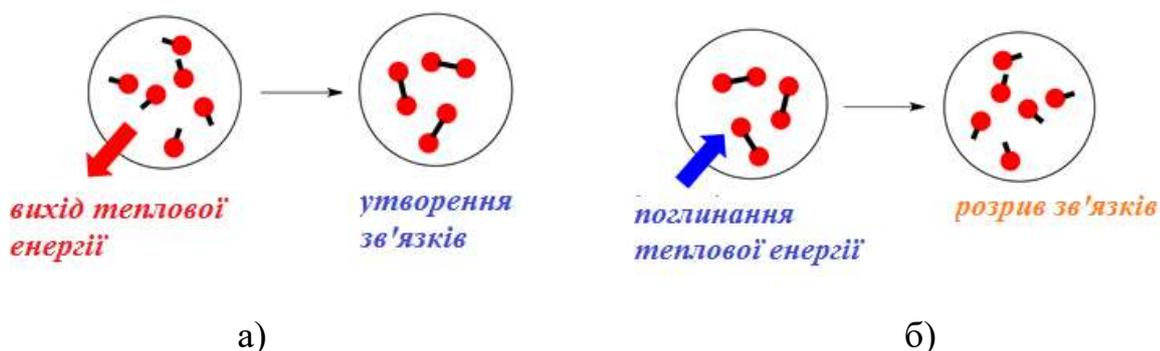
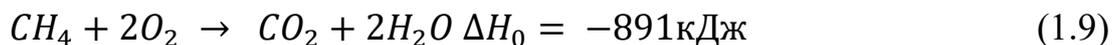


Рис.1.15. Напрями теплової енергії при екзотермічних (а) і ендотермічних хімічних реакціях

Спалювання метану з виділенням тепла є прикладом екзотермічної реакції



В екзотермічній реакції реагенти мають відносно велику кількість енергії порівняно з продуктами.

Прикладом ендотермічної реакції є фотосинтез з утворенням моносахариду

$$6CO_2 + 6H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \quad \Delta H_0 = +2800 \text{ кДж} \quad (1.10)$$

При ендотермічній реакції енергія поглинається під час реакції, і продукти, таким чином, мають більшу кількість енергії, ніж реагенти.

Підвищена температура збільшує середню кінетичну енергію молекул і це, відповідно, збільшує частку молекул з більшою енергією активації (рис.1.16).

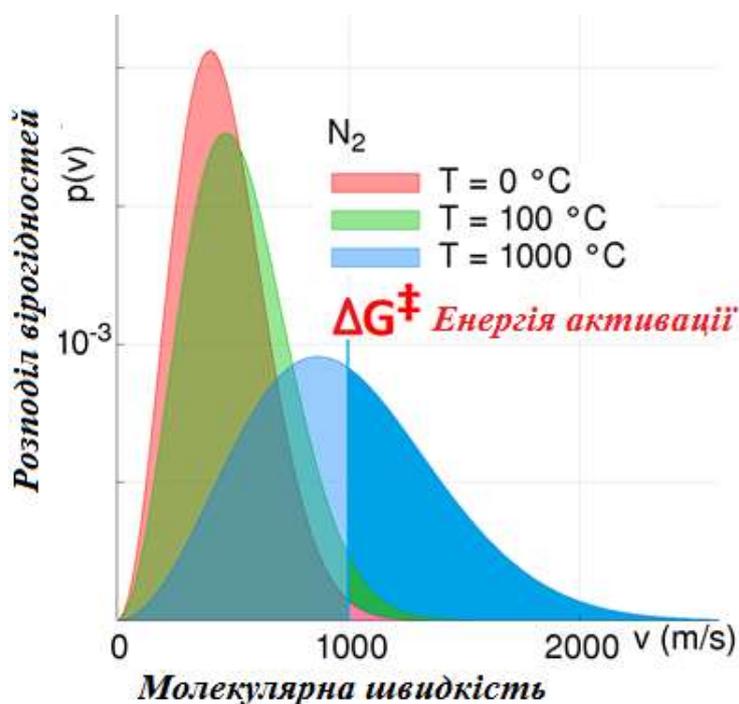


Рис.1.16. Вірогідність збільшення частки молекул з більш ніж енергетичним бар'єром активації (ΔG^\ddagger)

Вільна енергія Гіббса (G) — це термодинамічний потенціал, який визначає корисну роботу, яку може виконати система за постійної температури та тиску.. Класичним визначенням енергії Гіббса є вираз

$$G = U + PV - TS, \quad (1.11)$$

де U – внутрішня енергія, P – тиск, V – об'єм, T – абсолютна температура, S – ентропія.

Зміна енергії Гіббса (ΔG) — це термодинамічна величина, що визначає можливість самовільного перебігу хімічного чи фізичного процесу за сталих температури і тиску. Вона поєднує в собі два основні фактори, що впливають на перебіг реакції: зміну ентальпії ΔH та зміну ентропії (ΔS). Як приклад, на рис. 1.17 показана зміна енергії Гіббса в процесі хімічної реакції.

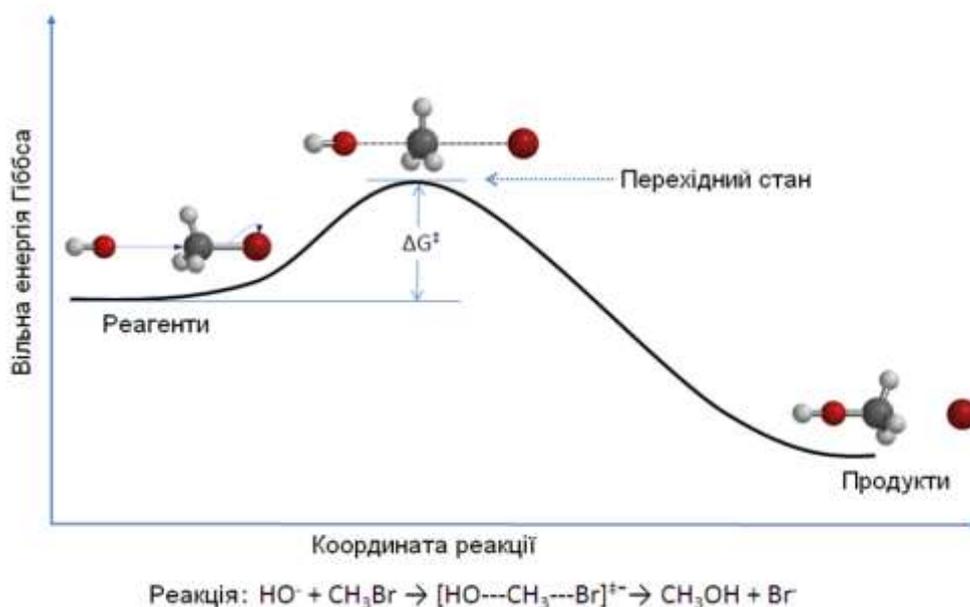


Рис.1.17. Зміна енергії Гіббса в процесі хімічної реакції [13]

Зміна енергії Гіббса розраховується за формулою:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S, \quad (1.12)$$

де:

ΔG — зміна енергії Гіббса;

ΔH — зміна ентальпії (тепловий ефект) реакції;

T — температура в кельвінах (К);

ΔS — зміна ентропії (міра неупорядкованості) системи.

Слід відмітити, що друга складова правої частини рівняння (1.12) у загальному вигляді представляє собою **закон Гюї - Стодоли**: втрата ексергії за причини незворотності процесів дорівнює добутку температури навколишнього середовища на суму прирощеної ентропії усіх тіл, які приймають участь у досліджувальних процесах ($T \sum \Delta S_H$).

Ексергія — це показник, який вимірює максимальну корисну роботу, яку може виконати термодинамічна система, переходячи з поточного стану в стан рівноваги з навколишнім середовищем. Це також величина, що визначає працездатність (корисність) речовин та енергетичних ресурсів. Втрата ексергії — це безповоротна деградація (знищення) працездатності, яка відбувається через необоротні процеси, що протікають у реальних системах. Це означає, що частина енергії перетворюється на анергію — форму енергії, яка не може бути використана для виконання корисної роботи.

Втрата ексергії спричинена необоротностями, такими як тертя, теплопередача через скінченну різницю температур або нерівноважні процеси.

Знак зміни енергії Гіббса дозволяє визначити самочинність реакції (табл.1.1). Самочинний хімічний процес — це процес, що відбувається спонтанно, без

зовнішнього втручання, не потребуючи зовнішнього джерела енергії для початку чи підтримки, і спрямований на підвищення загальної ентропії системи. Він може бути екзотермічним, наприклад, процес самозаймання вугілля або торфу, що відбувається при контакті з киснем повітря.

Таблиця 1.2. Визначення самочинності хімічного процесу

Знак зміни енергії Гіббса	Самочинність реакції	Зміна ентальпії	Зміна ентропії
$\Delta G < 0$	Реакція екзотермічна і завжди самочинна при будь-якій температурі	$\Delta H < 0$	$\Delta S > 0$
	Реакція екзотермічна і самочинна лише за низьких температур	$\Delta H < 0$	$\Delta S < 0$
	Реакція ендотермічна і самочинна лише за високих температур	$\Delta H > 0$	$\Delta S > 0$
$\Delta G > 0$	Реакція ендотермічна і завжди несамоchinна	$\Delta H > 0$	$\Delta S < 0$
$\Delta G = 0$	Система перебуває в стані рівноваги, де швидкість прямої реакції дорівнює швидкості зворотної.	$\Delta H = T\Delta S$	

Стандартна зміна енергії Гіббса (ΔG°) обчислюється для речовин у їхньому стандартному стані (зазвичай, 298 К і 1 атмосфера) і може бути розрахована двома основними способами:

за стандартними ентальпіями та ентропіями:

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (1.13)$$

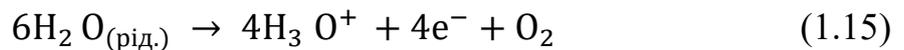
за стандартними енергіями Гіббса утворення речовин:

$$\Delta G^\circ = n\Delta G^\circ_f(\text{продукти}) - m\Delta G^\circ_f(\text{реагенти}), \quad (1.14)$$

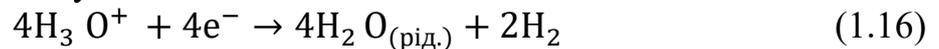
де n і m — стехіометричні коефіцієнти речовин у збалансованому рівнянні реакції.

Виробництво водню шляхом електролізу води. Електроліз забезпечує доступ до ядерних та відновлюваних джерел енергії, які мають дуже низькі викиди парникових газів. Хімічний процес, що відбувається під час електролізу води, розщеплення молекул води для утворення водню та кисню, можна розглядати як зворотний до того процесу, на якому базується паливний елемент з протонною обмінною мембраною (PEMFC). В електролізній комірці з мембраною з твердого полімеру на основі перфторсульфонової кислоти (Nafion) відбуваються такі процеси (рис.1.17) :

на аноді вода вводиться та дисоціюється на кисень, електрони та іони гідроксонію H_3O^+



на катоді, коли іони гідроксонію H_3O^+ мігрують через мембрану, вони рекомбінують з електронами, які проходять через зовнішнє коло, утворюючи газоподібний водень та воду



Загальна реакція електролізної комірки (рис.1.17) є сумою реакцій (1.15) - (1.16) і може бути представлена виразом

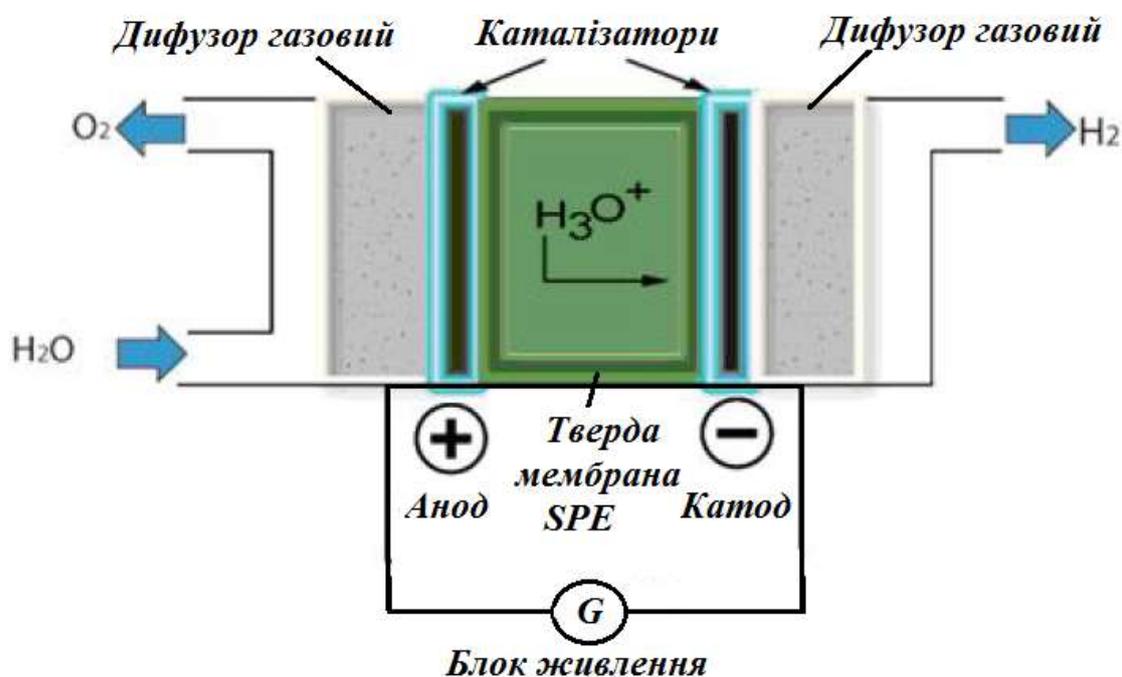
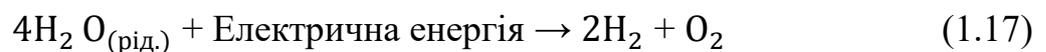


Рис.1.17. Принципова схема отримання водню в електролізній комірці

Для електрохімічного процесу, що працює за постійного тиску та температури, максимально можлива корисна робота (тобто оборотна робота) дорівнює зміні енергії Гіббса. Оскільки робота розглядається з точки зору системи хімічної реакції, електрична робота є позитивною для електролізера та негативною для паливного елемента. Зміна ентальпії електрохімічного розкладу води становить

$$\Delta H_{T,p} = \Delta G_{T,p} + T\Delta S_{T,p} \quad (1.18)$$

де $\Delta H_{T,p}$ (Дж·моль⁻¹) – зміна ентальпії при T та p, $\Delta G_{T,p}$ (Дж·моль⁻¹) – вільна енергія Гіббса, $\Delta S_{T,p}$ (Дж·моль⁻¹К⁻¹) – зміна ентропії, T – температура (К), p – тиск (атм).

Далі визначаються дві основні напруги з врахуванням енергії, необхідної для виробництва водню:

Ентальпійна напруга у вольтах при певних значеннях T та p:

$$V_{T,p} = \Delta H_{T,p} / n F \quad (1.19)$$

Напруга електролізу води у вольтах при певних значеннях T та p:

$$E_{T,p} = \Delta G_{T,p} / n F, \quad (1.20)$$

де n – кількість електронів, що переносяться за одне перетворення формули, F – постійна Фарадея, що дорівнює 96500 Кмоль⁻¹.

Ентальпійну напругу розраховують для значення від 1 бар до 1000 бар за виразом:

$$V_{T,p} = V_{T,1\text{атм}} + (\Delta H_{T,p} - \Delta H_{T,1\text{атм}}) / n F, \quad (1.21)$$

а напругу електролізу води:

$$E_{T,p} = E_{T,1\text{атм}} + (\Delta G_{T,p} - \Delta G_{T,1\text{атм}}) / n F, \quad (1.22)$$

На рис.1.18 графічно представлено зміну ентальпії та напруги електролізу залежно від зміни температури та тиску.

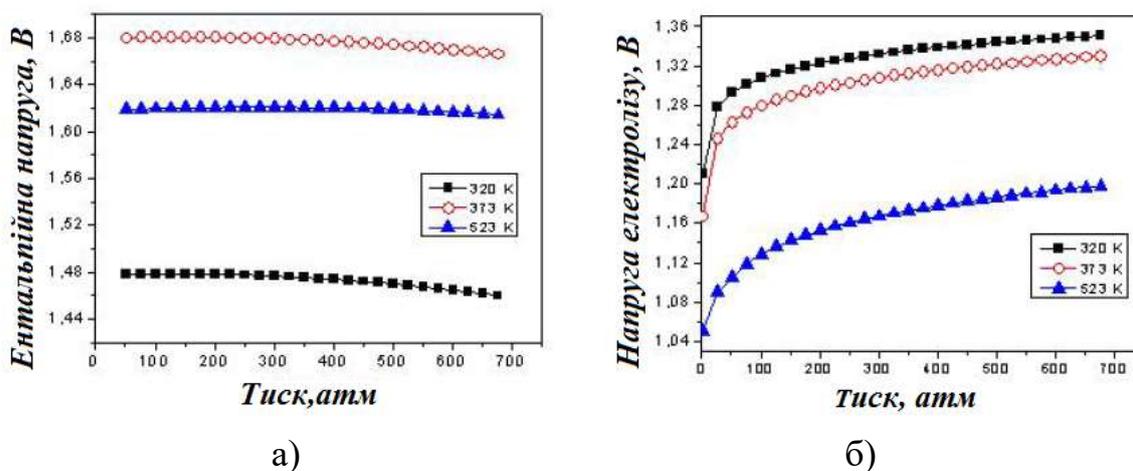


Рис.1.18. Зміна ентальпійної напруги (а) та напруги електролізу (б) залежно від зміни температури та тиску

Передбачається, що робота поза нормальними умовами буде вигідною з точки зору загального споживання енергії та її використання. Підвищена температура зменшує оборотну роботу, необхідну для проведення електролізу, що робить когенерацію на теплових електростанціях життєздатною. Підвищений тиск усуває необхідність стискання газів, що утворюються, за рахунок необхідності подачі живильної води під тиском. Отже, для електролізної установки менша енергія, необхідна для створення тиску в щільнішій воді, може підвищити загальну ефективність .

1.4.4. Закон збереження імпульсу

Закон збереження імпульсу стверджує, що загальний імпульс системи залишається постійним, якщо на неї не діють зовнішні сили. Цей закон є наслідком ізотропності простору і застосовується до будь-якої системи, яка взаємодіє сама з собою.

Закон збереження імпульсу (або кількості руху $m \cdot v$) діє в замкнених системах, де сумарний імпульс залишається незмінним. Одиниця вимірювання імпульсу - кг· м/с. Взаємодія відбувається між тілами системи, а зовнішні сили відсутні або зрівноважені.

Закон збереження моменту імпульсу в електротехніці застосовується до систем, де є рух заряджених частинок, і на відміну від класичної механіки, часто розглядають системи з безперервним потоком зарядів, що є джерелом електромагнітних полів. У випадках, коли електричні струми створюють магнітні поля, закон збереження моменту імпульсу допомагає пояснити, як взаємодіють між собою електричні струми, створюючи магнітні сили.

Взаємодія між двома паралельними провідниками зі струмом є прикладом застосування закону збереження моменту імпульсу: сили, що діють на провідники, призводять до їхнього руху, що зберігає загальний момент імпульсу системи. У генераторі механічна енергія обертової турбіни використовується для вироблення електроенергії. Закон збереження кутового моменту забезпечує стан, коли обертові компоненти генератора підтримують постійну швидкість обертання, якщо на них не діє зовнішній крутний момент, такий як зміна механічного навантаження або несправність у системі.

1.4.5. Закон мінімуму дисипації (розсіювання) енергії

Закон мінімуму дисипації (розсіювання) енергії: при можливості розвитку процесу у декількох напрямках реалізується той, який забезпечує мінімум розсіювання енергії (мінімум зростання ентропії).

Закон стосується принципу мінімуму вільної енергії в термодинаміці або принципу мінімуму потенціальної енергії в механіці. Перший означає, що спонтанні процеси відбуваються так, щоб зменшити вільну енергію системи, а другий – що тіла прагнуть зайняти положення, яке мінімізує їхню потенціальну енергію.

У природі весь час виникають структури, в яких ентропія не тільки не зростає, але й локально зменшується. Ця властивість притаманна багатьом відкритим системам, в тому числі і живим, де за рахунок припливу іззовні речовини і енергії виникають так звані квазістаціонарні (стабільні) стани.

Якщо в даних конкретних умовах можливі декілька типів організації матерії, що узгоджуються з іншими принципами відбору, то реалізується та структура, якій відповідає **мінімальне зростання ентропії**. Так як спадання ентропії можливо тільки за рахунок поглинання зовнішньої енергії, то реалізуються ті з можливих форм організації матерії, які здатні в максимальній формі поглинати енергію.

У міру розгортання науково-технічного прогресу, виснаження природних ресурсів виникає тенденція до економного витрачання цих ресурсів, виникнення безвідходних технологій, розвитку виробництв, які вимагають невеликих енерговитрат і матеріалів.

1.4.5. Закон максимізації енергії

Закон максимізації енергії: у суперництві з іншими системами зберігається та з них, яка найкращим чином сприяє поступанню енергії і використовує максимальну її кількість найбільш ефективно.

Закон максимізації енергії — це одночасно і екологічний принцип, згідно з яким у конкуренції з іншими системами виживають ті, які найкращим чином сприяють надходженню енергії та використовують її максимально ефективно.

З цією метою система:

- 1) створює накопичувачі високоякісної енергії;
- 2) витрачає частину накопичуваної енергії на забезпечення надходження нової енергії;
- 3) забезпечує колообіг різних речовин;
- 4) створює механізми регулювання, які забезпечують стійкість системи;
- 5) налагоджує з іншими системами обмін, необхідний для забезпечення потреби в енергії спеціальних видів.

Енергозберігаючий принцип функціонування системи означає раціональне використання енергії для досягнення певних цілей з мінімальними витратами. Це досягається через **енергоефективні технології**, що знижують кількість енергії, необхідної для надання тієї ж послуги, та **енергоощадність** (зменшення споживання енергетичних послуг).

Принцип максимізації потужності: системи з потужною енергетикою витісняють системи з більш низькою енергетичною «потужністю». Ймовірно, слід додати «як правило», адже іноді низькоенергетичні системи мають переваги у силу меншого впливу на середовище і кращої відповідності настільки ж низькому енергетичному потенціалу цього середовища. В цьому випадку слід більш точно враховувати **закон оптимальності**. Наприклад, багато примітивних і низькоенергетичних видів живого у відносно стабільному середовищі залишаються незмінними і цілком конкурентоспроможними протягом мільйонів

років, хоча навколо існують так чи інакше конкуруючі більш, здавалося б, енергетично досконалі і більш високо організовані види.

Закон оптимальності свідчить, що з найбільшою ефективністю будь-яка система (в тому числі природний і господарський об'єкт) функціонують в деяких просторово-часових межах, вихід за які знецінює даний об'єкт як підсистему більш великої системи або веде до руйнування цієї більшої системи. Закон оптимальності стосується як індивідуального розміру одиничної системи, так і числа однорідних систем. Оптимальні розміри не можуть бути визначені загальними кількісними показниками. Мінімальний розмір такий, при якому система ще не втрачає своїх функцій. Те ж стосується максимального розміру, але тут важливі витрати на внутрішньосистемну організацію та міжсистемні зв'язки. Гігантизм викликає дуже великі витрати на саморегуляцію всередині системи, що робить конкурентоздатними малі аналоги з тими ж або з іншими, але близькими принципами дії. До того ж при гігантизмі ростуть зовнішні втрати середовища (економічні, соціальні та екологічні), що також підвищує конкурентоспроможність альтернативних пристроїв. Наприклад, малі сонячно-водневі пристрої зростаються цілком конкурентоспроможними.

«Золоте» правило енергетики: чим більша кількість ступенів в процесі в перетворення енергії, тим нижче практичний ККД її виробництва, оскільки на кожному етапі перетворення енергії відбувається її втрата (переважно у вигляді тепла), згідно із другим законом термодинаміки. Чим більше ступенів у ланцюжку перетворень, тим більша сукупна втрата енергії і, відповідно, нижчий загальний практичний коефіцієнт корисної дії (ККД).

1.4.6. Третій закон термодинаміки

Третій закон термодинаміки, також відомий як тепловий закон Нерста, стверджує, що ентропія ідеально впорядкованої кристалічної речовини прямує до нуля при наближенні до абсолютного нуля температури (0 К). Це означає, що досягти абсолютного нуля термодинамічно неможливо, хоча до нього можна наближатися довільно близько.

$$S_T - S_0 = k_B \ln W, \quad (1.23)$$

де: S – ентропія системи; k_B – стала Больцмана; W – кількість можливих мікростанів при заданій температурі.

Абсолютна точка відліку для ентропії визначається так: при $T=0$ в досконалій кристалічній речовині існує лише один можливий мікростан ($W=1$), тому ентропія дорівнює нулю ($S_0=k_B \ln 1=0$).

Атоми, молекули або іони, що складають хімічну систему, можуть зазнати декількох типів молекулярного руху, включаючи поступальний рух, обертання та вібрацію. На рис.1.19 продемонстровані, як приклад, молекулярні рухи молекули вуглекислого газу.

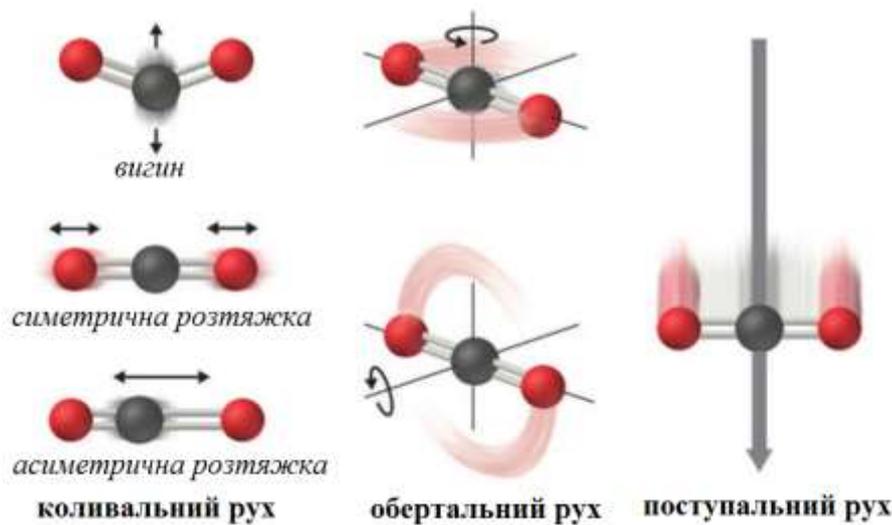


Рис.1.19. Типи молекулярних рухів

Чим більше молекулярний рух системи, тим більша кількість можливих мікростанів і тим вище ентропія. Ідеально впорядкована система з лише єдиним мікростаном, доступним для неї, мала б ентропію нуля. Єдиною системою, яка відповідає цьому критерію, є досконалий кристал при температурі абсолютного нуля (0 K), в якому кожен компонент атома, молекули або іона закріплені на місці всередині кристалічної решітки і не проявляє руху (ігноруючи квантовий рух нульової точки).

ВИСНОВОК

1. Штучні об'єкти або речовини можуть бути джерелом енергії завдяки перетворенню різних форм енергії, наприклад, сонячного випромінювання за допомогою сонячних панелей, хімічної енергії в паливі (біопаливо, природний газ) шляхом спалювання, або ядерної енергії в ядерних реакторах. Для цього використовуються відповідні технології, які дозволяють ефективно видобувати, накопичувати та використовувати цю енергію для різних потреб.

2. Відновлювані джерела енергії – це ресурси, які поповнюються Землею протягом певного періоду часу (сонячна енергія, вітрова енергія, гідроенергетика, геотермальна енергія, біомаса). Зазвичай вони поповнюються зі швидкістю, вищою за швидкість споживання, але навіть якщо ці ресурси є відновлюваними, збільшення споживання може їх виснажити, тому необхідно використовувати методи, які допомагають підтримувати ці ресурси.

3. Принцип ефективності застосовується під час виконання будь-якого процесу, особливо це стосується процесів перетворення енергії. Відповідно розробляються методи, які забезпечують перетворення енергії з максимальною ефективністю. Ось деякі методи підвищення ефективності перетворення енергії:

➤ коефіцієнт корисної дії перетворення енергії визначається як корисна вихідна енергія, поділена на вхідну енергію, тому для підвищення

енергоефективності ми можемо зменшити кількість споживаної енергії, досягаючи при цьому того ж рівня енергообслуговування;

➤ організація регулярних аудитів може допомогти усунути потенційну причину втрат енергії. Це може допомогти проаналізувати і удосконалити моделі споживання енергії з метою мінімізації цих втрат енергії;

➤ метод використання відхідного тепла – це спосіб використання тепла, що виділяється під час технологічного процесу. Відхідне тепло, що утворюється під час процесів перетворення енергії, може бути використане для таких процесів, як виробництво електрики, нагрівання води тощо.

4. Інновації у сфері відновлюваної енергетики мають вирішальне значення для досягнення нульових викидів до 2050 року, особливо у важкодоступних для декарбонізації секторах, таких як важка промисловість. Водночас інновації у сфері відновлюваної енергетики в екосистемі мають вирішальне значення для постійного підвищення енергоефективності.

5. До основних законів генерації та перетворення енергії відносяться:

- закон збереження енергії (перший закон термодинаміки);
- другий закон термодинаміки – закон зростання ентропії;
- закон збереження імпульсу;
- закон мінімуму дисипації (розсіювання) енергії;
- закон максимізації енергії;
- «Золоте» правило енергетики: чим більше ступенів у ланцюжку перетворень, тим більша сукупна втрата енергії і, відповідно, нижчий загальний практичний коефіцієнт корисної дії (ККД);
- третій закон термодинаміки, також відомий як тепловий закон Нернста.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. What is Direct Energy Conversion? by Andrea M. Mitofsky is licensed CC BY-NC 4.0. Original source: https://www.trine.edu/books/documents/de_text1.0.0.pdf.

2. Перетворення енергії: <https://www.geeksforgeeks.org/electrical-engineering/energy-conversion/> (дата звернення: 21.09.2025).

3. Eric Koons. Seven of the best innovations in renewable energy: innovators of the future, 2024. <https://energytracker.asia/top-7-renewable-energy-innovations/>.

4. Вітроенергетична система -дирижабль S1500. https://tsn.ua/nauka_it/vyprobuvano-naybilshu-v-sviti-naduvnu-vitroturbinu-shcho-litaye-foto-podrobytsi-2926610.html, (дата звернення: 21.09.2025).

5. Chamout, M. W., Perl, A., Hengeveld, E. J., & Aué, J. J. (2024). Simulation and analysis of hybrid hydrogen-battery renewable energy storage for off-electric-grid Dutch household system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 70, 170-182.

6. McCoy, A., Musial, W., Hammond, R., Mulas Hernando, D., Duffy, P., Beiter, P., ... & Spitsen, P. (2024). Offshore wind market report: 2024 edition (No. NREL/TP-5000-90525). National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States).

7. Самойчук, К. О., & Лівик, Н. В. (2020). Використання поверхневих, термальних і морських вод для виробництва теплової і електричної енергії: електронний навчальний посібник. 2020. URL: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/ophv_5/page12.html (дата звернення: 21.09.2025).
8. Freeman, M. C., O'Neil, R., Garavelli, L., Hellin, D., & Klure, J. (2022). Case study on the novel permitting and authorization of PacWave South, a US grid-connected wave energy test facility: Development, challenges, and insights. *Energy Policy*, 168, 113141.
9. Hydrogen Oil: Green vs Blue, What's the Difference? 04 April 2024 – by Eric Koons <https://energytracker.asia/hydrogen-oil-green-vs-blue-whats-the-difference/>
10. Сонячно-теплова електростанція з двома вежами. <https://www.azernews.az/region/248588.html>, (дата звернення: 21.10.2025).
11. Ентальпія <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BD%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BF%D1%96%D1%8F> (дата звернення: 21.10.2025).
12. Laoun, B. (2007). Thermodynamics aspect of high pressure hydrogen production by water electrolysis. *Journal of Renewable Energies*, 10(3), 435-444.
13. Todd, D., Schwager, M., & Mérida, W. (2014). Thermodynamics of high-temperature, high-pressure water electrolysis. *Journal of Power Sources*, 269, 424-429.

ПИТАННЯ ДЛЯ ОБГОВОРЕННЯ ТА САМОПЕРЕВІРКИ

1. Які природні ресурси і процеси можуть бути первинними джерелами енергії?
2. Дайте визначення узагальнених категорій форми енергії.
3. Дайте характеристики відомим формам енергії. Наведіть приклади.
4. Які існують способи перетворення енергії?
5. Дайте характеристики відомим методам підвищення ефективності перетворення енергії.
6. З якими викликами і проблемами стикається галузь перетворення енергії?
7. Дайте характеристики відомим інноваціям у сфері відновлюваної енергетики.
8. Які існують основні закони генерації та перетворення енергії?
9. Дайте визначення закону збереження енергії (перший закон термодинаміки).
10. Дайте визначення другого закону термодинаміки (закону зростання ентропії).

11. Якими двома типами може бути представлена енергія хімічних реакцій?
12. Дайте визначення рушійних сил – ентальпії і ентропії.
13. Дайте визначення вільної енергії Гіббса та зміни енергії Гіббса.
14. Дайте визначення закону збереження імпульсу.
15. Дайте визначення закону максимізації енергії.

РОЗДІЛ 2. ЗАКОНОМІРНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ

2.1. Основні закони та принципи електромеханічного перетворення енергії

Закон електромагнітної індукції Майкла Фарадея. В провіднику, який переміщується в магнітному полі, наводиться електрорушійна сила (ЕРС), величина якої пропорційна довжині провідника, швидкості його руху та інтенсивності магнітного поля, причому напрямок цієї індукованої ЕРС залежить від напрямку переміщення провідника відносно магнітного поля (рис.2.1).

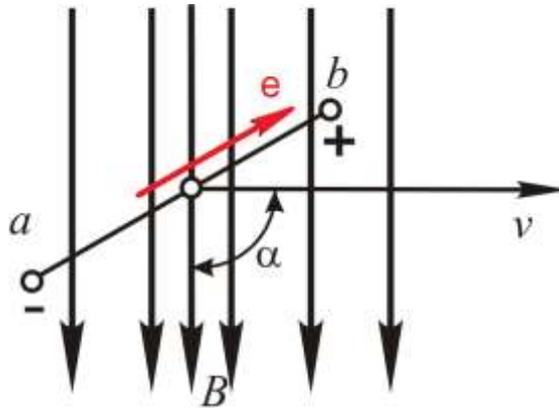


Рис.2.1. Наведення електрорушійної сили в провіднику, який переміщується в магнітному полі

Величина ЕРС e , яка наводиться у провіднику ab , визначається за формулою

$$e = Blv \sin \alpha, \quad (2.1)$$

де e - ЕРС, що наводиться у провіднику, В; v — швидкість руху провідника, м/с; B — індукція магнітного поля, Т; l — довжина провідника, м; α — кут між векторами швидкості та індукції магнітного поля.

Закон сили Ампера. Якщо провідник, яким протікає струм, знаходиться в магнітному полі, то на нього діє механічна сила, перпендикулярна силовим лініям (вектору індукції) цього поля та провіднику (рис. 2.2).

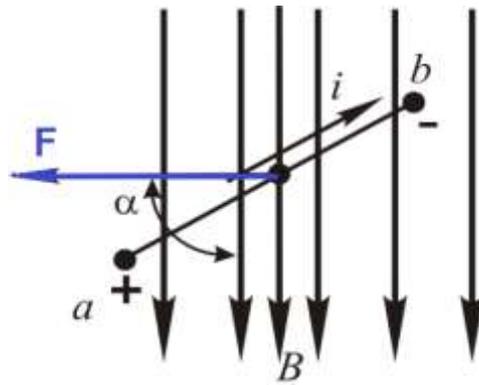


Рис. 2.2. Виникнення механічної сили, яка діє на провідник зі струмом, що знаходиться в магнітному полі

Величина цієї сили прямо пропорційна магнітній індукції \mathbf{B} , силі струму \mathbf{I} , довжині провідника l та синусу кута між напрямком струму та магнітною індукцією ($\sin \alpha$).

$$F = B I l \sin \alpha, \quad (2.2)$$

де: \mathbf{F} — сила Ампера, Н; \mathbf{B} — магнітна індукція, Тл; \mathbf{I} — сила струму, А; l — довжина активної частини провідника, м; α — кут між напрямком струму та вектором магнітної індукції.

Закон сили Лоренца описує силу, з якою електромагнітне поле діє на рухому заряджену частинку. Модуль цієї сили визначається формулою

$$F_L = |q| B v \sin \alpha, \quad (2.3)$$

де q — заряд частинки, B — магнітна індукція поля, v — швидкість, а α — кут між напрямком швидкості та магнітної індукції.

Напрямок сили Лоренца визначається за правилом лівої руки: якщо розмістити ліву руку так, щоб силові лінії магнітного поля входили в долоню, а чотири пальці вказували напрямком руху позитивно зарядженої частинки, то відігнутий на 90° великий палець покаже напрямок сили.

Як правило, при електромеханічних перетвореннях закон електромагнітної індукції і закон Ампера проявляється одночасно і супроводжують одне одного.

Розглянемо процес переміщення в магнітному полі під дією зовнішніх сил де-якого провідника, яким тече визначений струм (рис. 2.3).

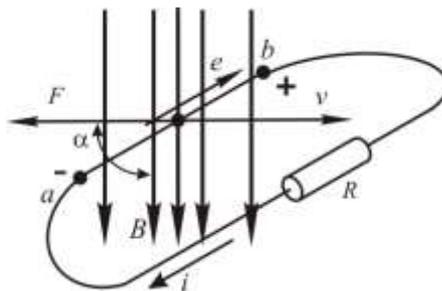


Рис. 2.3. Провідник зі струмом, що рухається в магнітному полі

Відповідно до закону електромагнітної індукції вплив магнітного поля на провідник, що рухається в цьому полі, приводить до появи ЕРС. Якщо зовнішніми провідниками підключити до вказаного провідника резистор (рис. 2.3), опір якого дорівнює R , то цим провідником потече струм, величина якого визначатиметься як $i = \mathcal{E}/R$. За таких умов провідник, який рухається в магнітному полі, слід одночасно розглядати як провідник зі струмом, що знаходиться в магнітному полі. При цьому на цей провідник діятиме механічна сила F , яка спрямована протилежно напрямку переміщення провідника та є силою опору зовнішньому впливу, який саме й переміщує провідник зі швидкістю v . Саме такі процеси притаманні усім електричним машинам, які перетворюють електричну енергію в механічну та механічну енергію в електричну.

Необхідно розглянути також особливості формування магнітного поля навкруги прямолінійного та згорнутого у контур провідника зі струмом (рис. 2.4).

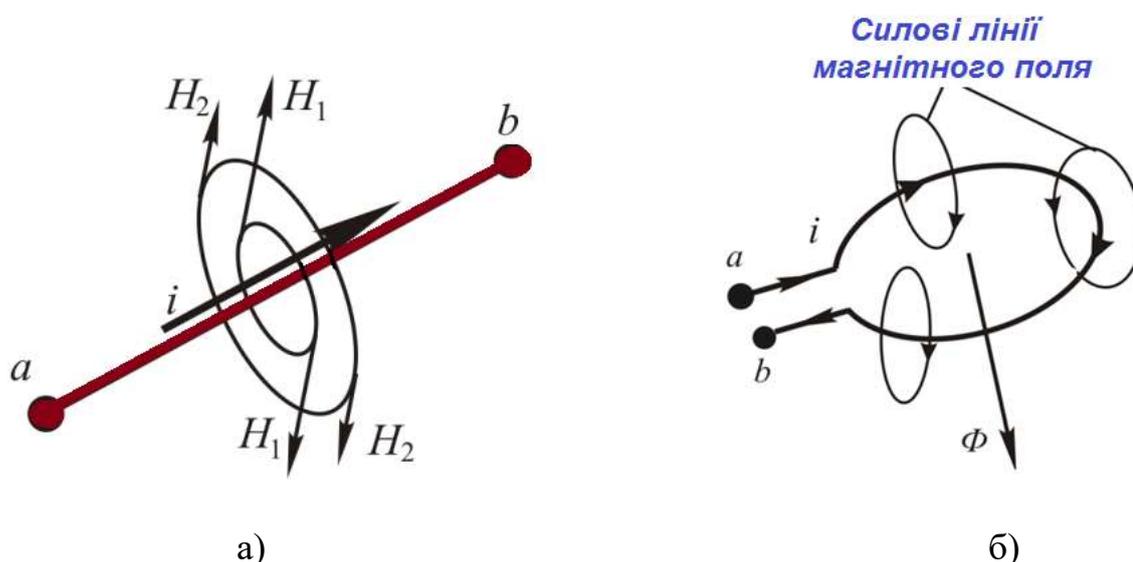


Рис. 2.4. Магнітне поле навкруги прямолінійного (а) та згорнутого у контур (б) провідника зі струмом

Навкруги будь-якого провідника зі струмом існує магнітне поле (див. рис. 2.4а), напруженість H якого пропорційна величині цього струму. Для визначення напрямку вектора напруженості магнітного поля, що утворюється навколо провідника зі струмом, використовують правило правоходового гвинта (рис. 2.6а): якщо «правий» гвинт обертати так, щоб напрямок його переміщення співпадав з напрямком струму, то напрямок обертання вказуватиме напрямком силових ліній магнітного поля.

За умови згорнутого у контур провідника (рис. 2.4б) струм, який протікає цим провідником, утворює магнітне поле, магнітний потік якого пропорційний величині вказаного струму. Якщо виток провідника зчеплений з магнітним полем, магнітний потік Φ якого проходить крізь площу витка і змінюється у часі, то в цьому витку наводиться ЕРС, величина якої пропорційна швидкості змінення вказаного магнітного потоку, а саме

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.4)$$

При цьому ЕРС має такий напрямок, що при замиканні контуру витка в ньому протікатиме струм, власне магнітне поле якого буде *перешкоджати* зміненню магнітного потоку. Відповідно до вибраного напрямку магнітного потоку при його збільшенні потенціал клеми *a* витка буде вищий за потенціал клеми *b*. При зменшенні потоку полярність ЕРС змінюється на протилежну.

Окрім розглянутих законів для розуміння процесів, що відбуваються в електромеханічних перетворювачах енергії, слід враховувати також *три* базові принципи електромеханіки.

Перший принцип електромеханіки відображає загальний закон збереження енергії. В електромеханічних перетворювачах (ЕМП) енергія одного виду (електрична енергія, що надходить від зовнішнього електричного кола з відповідним джерелом електроживлення) перетворюється в енергію двох (рідше трьох чи більше) видів. В цьому виді перетворювачів основне (корисне) перетворення вхідної енергії супроводжується деяким додатковим (непродуктивним, супутнім) перетворенням цієї енергії (зазвичай на теплову).

Узагальнену схему перетворення енергії в ЕМП можна подати у вигляді «чорної скриньки» (шестиполюсника), показаної на рис.2.5. Отже, в ЕМП перетворення електричної енергії $W_{ел}$ в механічну енергію $W_{мех}$ (рівно як і механічної енергії на електричну) завжди супроводжується виділенням теплової енергії $W_{теп}$.

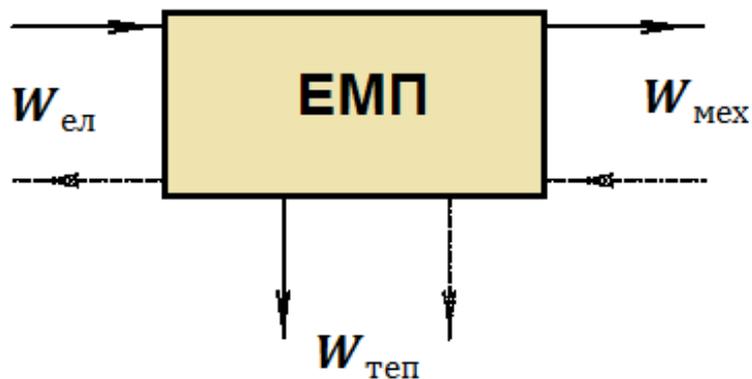


Рис.2.5. Узагальнена схема перетворення енергії в ЕМП

Як правило, така модель на практиці для більшості ЕМП спрощується і зазвичай розглядається як чотирьополюсник (рис.2.6), де витоки теплової енергії пов'язані з деяким контуром, об'єм якого нескінченний, а температура незмінна.



Рис.2.6. Уявлення ЕМП як чотирьополосника

Другий принцип електромеханіки відображає зворотний характер процесів, що відбуваються в електромеханічному перетворювачі. За умови, що до ЕМП підводиться електрична енергія з електромережі, він працюватиме в режимі актюатора (двигуна), якщо ж до ЕМП підводиться механічна енергія – встановлюється режим сенсора (генератора, генерації електричної енергії).

Третій принцип електромеханіки характеризує просторову взаємодію магнітних полів, якими супроводжується процес перетворення енергії в ЕМП. Нерухомі відносно одне одного магнітні поля створюють в структурі електромеханічного перетворювача результуюче поле та електромагнітний момент, а поля, які переміщуються в повітряному зазорі (який обов'язково присутній в ЕМП всіх видів), створюють потік теплової енергії, що приводить до втрат та зменшення ККД.

2.2. Генетична класифікація первинних джерел електромагнітного поля електромеханічних перетворювачів енергії

Технічні і функціональні еволюційні процеси електромеханічних пристроїв безпосередньо зв'язані зі змінами структури та геометрії їх активної зони і регулюються системними законами генетичної еволюції.

Фундаментальною фізичною властивістю багатьох матеріальних та природних явищ виступає електромагнітне поле, а системи електромеханічного перетворення енергії природного і антропогенного походження – це категорія генетично організованих систем. Існує генетична класифікація (ГК) первинних джерел електромагнітного поля, елементарну основу якої представляють електромагнітні хромосоми, що у завданнях комбінаторного та топологічного синтезу виступають як вихідні елементарні вузли.

Місце та інваріантні властивості будь-якого первинного джерела поля представлені в структурі ГК універсальним генетичним кодом (рис.2.7). До основних властивостей первинного джерела поля віднесені топологічні та електромагнітні властивості, що визначаються принципами електричного заряду, симетрії і кодується компонентом, який визначає генетичну належність об'єктів-нащадків.

Отже, геометрія активної зони, електромагнітна симетрія та топологічні властивості електромагнітної структури визначають принципи формування структури активної частини електромагнітних і електромеханічних пристроїв – магнітного полюса, статора, ротора, індуктора тощо.

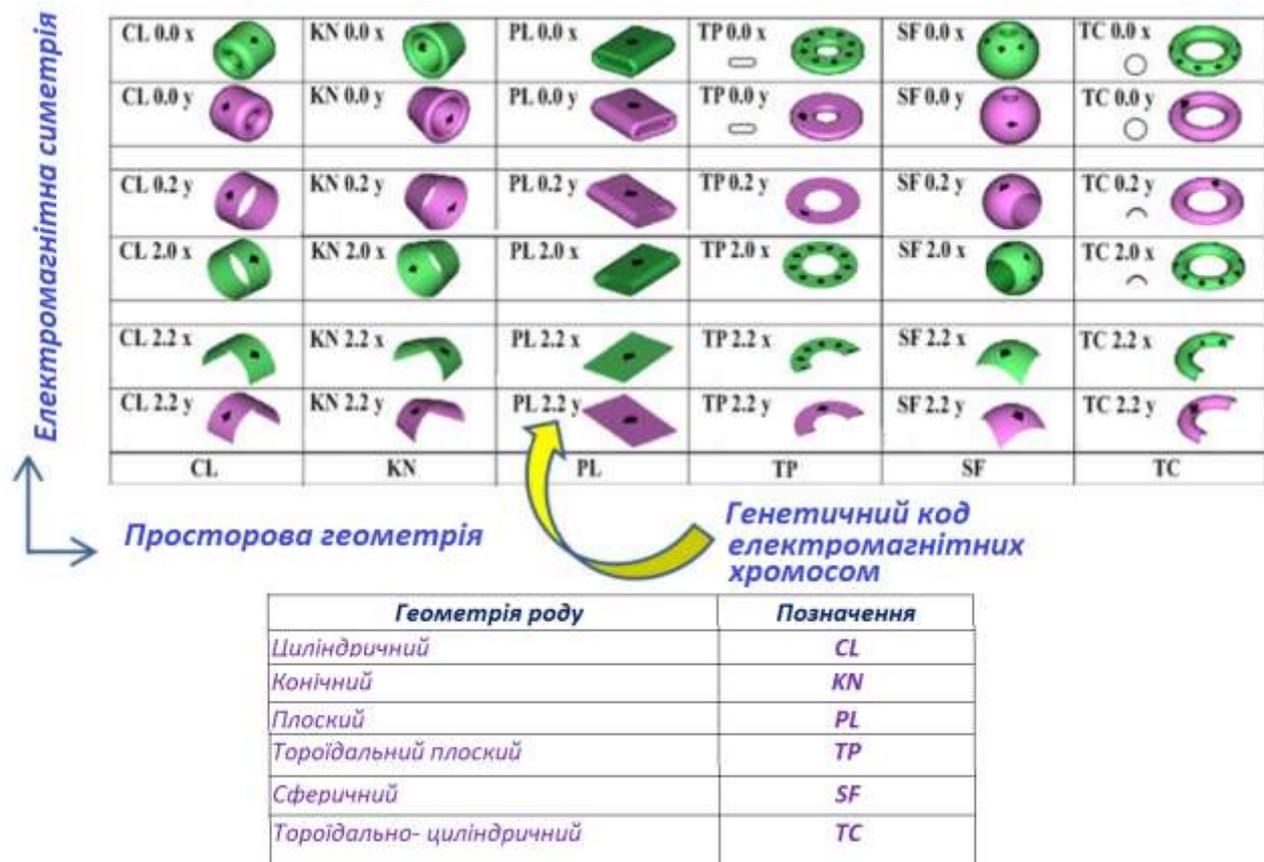


Рис.2.7. Генетична класифікація джерел електромагнітного поля електромагнітних і електромеханічних пристроїв

Електромеханічні пристрої, які безпосередньо реалізують технологічні операції (магнітогідродинамічні перетворювачі, електромеханічні гідролізери, магнітні та електродинамічні сепаратори, електромеханічні дезінтегратори, тощо) в основі свого функціонування обов'язково містять умову зміни параметрів вторинного середовища та просторової геометрії. Як приклад, для структурного класу електромеханічних пристроїв, які призначені для нанотехнологій, суперечливі вимоги при забезпеченні впливу на речовину, що розміщена у внутрішній робочій камері, впроваджено модульний принцип зовнішньої електромагнітної системи (табл.2.1).

Фізичний стан вторинного середовища в електромеханічних пристроях технологічного призначення може бути представлений дискретними магнітними та електропровідними частинками, іонізованим газом, плазмою, провідними металами у рідинному стані.

Таблиця 2.1. Синтезовані структури електромеханічних дезінтеграторів зі змінною геометрією електромагнітної системи

Геометрія роду	Циліндричний	Конічний	Плоский	Тороїдальний плоский	Сферичний	Тороїдально-циліндричний
Генетичний код	<i>CL 0.0x</i>	<i>KN 0.0x</i>	<i>PL 0.0x</i>	<i>TP 0.0x</i>	<i>SF 0.0x</i>	<i>TC 0.0x</i>
Електромагнітна хромосома						
3D-модель структури ЕМД						

2.3. Баланс енергії в електромеханічному перетворювачі

Приймаємо ряд припущень, які дають можливість зосередитись на корисному перетворенні енергії в ЕМП і суттєво не порушують основну картину процесу електромеханічного перетворення енергії. Отже, в першому наближенні нехтуватимемо тепловими втратами, зміненням енергії електричного поля, випромінюванням енергії, яке викликане зміненням у часі електричного та магнітного полів, втратами енергії в магнітному полі.

Випромінюванням енергії на промислових частотах можна нехтувати. Енергія електричного поля в електромагнітних пристроях також мала, внаслідок малих значень ємностей, які зазвичай існують між окремими елементами електричних кіл та притаманні визначеним конструктивним виконанням окремих елементів (наприклад, ємність між витками котушки). Втрати на гістерезис та вихрові струми в магнітних колах більшості пристроїв, що розглядатимуться, також невеликі. Цими втратами на даному етапі аналізу базових принципів моделювання ЕМП також нехтуватимемо.

З урахуванням прийнятих припущень рівняння балансу відобразатиме змінення основних видів енергії в електромеханічній системі і може бути подане як

$$\Delta W_{\text{ел}} \approx \Delta W_{\text{маг}} + \Delta W_{\text{мех}}, \quad (2.5)$$

де

$\Delta W_{\text{ел}}$ - змінення електричної енергії, що подається до ЕМП;

$\Delta W_{\text{маг}}$ - змінення енергії магнітного поля, яке саме й спричиняє відповідні перетворення електричної енергії у механічну. Магнітне поле є посередником, який передає енергію між електричним струмом та механічним рухом.

$\Delta W_{\text{мех}}$ - змінення механічної енергії, яке спрямовується на виконання визначеної роботи відповідними рухомими елементами ЕМП.

Знак приблизної рівності у (2.5) відображає наявність прийнятих припущень.

Змінення механічної енергії визначається як функція струму i , що протікає у відповідних елементах ЕМП, та координати x його рухомої частини. Замість струму можна використати й категорію потокозчеплення Ψ , яке однозначно пов'язане зі струмом у відповідному елементі ЕМП. Тоді рівняння балансу енергії можна подати у такому вигляді

$$\Delta W_{\text{мех}}(i, x) = \Delta W_{\text{ел}}(i, x) - \Delta W_{\text{маг}}(i, x) \quad (2.6)$$

або

$$\Delta W_{\text{мех}}(\Psi, x) = \Delta W_{\text{ел}}(\Psi, x) - \Delta W_{\text{маг}}(\Psi, x) \quad (2.7)$$

Середня сила, яка діє в процесі перетворення (2.6) або (2.7), визначається із співвідношення

$$\Delta W_{\text{мех}} = f_{\text{сер}} \Delta x \quad (2.8)$$

де Δx - змінення координати x відповідного конструктивного елемента ЕМП в процесі його функціонування.

Величину цієї сили можна подати в термінах струму або потокозчеплення

$$f_{\text{сер}}(i, x) = \frac{\Delta W_{\text{ел}}(i, x)}{\Delta x} - \frac{\Delta W_{\text{маг}}(i, x)}{\Delta x}, \quad (2.9)$$

$$f_{\text{сер}}(\Psi, x) = \frac{\Delta W_{\text{ел}}(\Psi, x)}{\Delta x} - \frac{\Delta W_{\text{маг}}(\Psi, x)}{\Delta x} \quad (2.10)$$

Визначимо енергію, яка надходить до систем, що складається з n нерухомих провідників (контурів). По кожному з цих провідників протікає струм i_k , яким визначається і відповідне потокозчеплення Ψ_k . При цьому розглядатимемо інтегроване значення енергії, яка надається відповідним конструктивним складовим ЕМП всіма струмами i_k в процесі зростання цих струмів від нуля до деяких кінцевих значень.

Припустимо, що до виводів k -го контуру, резистивний опір якого становить r_k , приєднане зовнішнє електричне коло, яке забезпечує на виводах цього контуру напругу u_k . Змінення струму в контурі викликає зміненні потокозчеплення та появу на виводах цього контуру ЕРС e_k .

Електричний баланс в такому контурі визначатиметься рівнянням, яке можна подати в термінах струмів

$$u_k + e_k = r_k i_k \quad (2.11)$$

або в термінах потокозчеплення

$$u_k = r_k i_k + \frac{d\Psi_k}{dt} \quad (2.12)$$

Помноживши ліву та праву частини рівняння (2.12) на i_k , визначаємо потужність, що витрачається джерелом живлення [1].

$$u_k i_k = r_k i_k^2 + i_k \frac{d\Psi_k}{dt} \quad (2.13)$$

За проміжок часу dt джерелом живлення в k -му контурі ЕМП виконуватиметься робота, котра визначається як добуток потужності на відповідний інтервал часу (протягом якого ця потужність витрачається):

$$u_k i_k dt = dW_{\text{ел}k} = r_k i_k^2 dt + i_k d\Psi_k \quad (2.14)$$

Частина роботи, що визначається складовою $i_k d\Psi_k$, пов'язана з енергією, яка запасається в магнітному полі k -го контуру:

$$dW_{\text{маг}k} = i_k d\Psi_k \quad (2.15)$$

Загальна магнітна енергія n контурів пов'язана зі збільшенням їх потокозчеплення співвідношенням

$$W_{\text{маг}} = \sum_{k=1}^n \int_0^{\Psi_k} i_k d\Psi_k \quad (2.16)$$

Для лінійної електромагнітної системи рівняння (2.16) можна подати в термінах власних та взаємних індуктивностей відповідних контурів. При цьому вважатимемо, що потокозчеплення k -го контуру є лінійною функцією струмів всіх контурів (включаючи, звичайно, й k -й контур), тобто

$$\Psi_k = \sum_{s=1}^n L_{ks} i_s \quad (2.17)$$

де

L_{ks} - взаємна індуктивність k -го та S -го контурів;

$L_{kk} = L_k$ - власна індуктивність k -го контуру.

Виділяючи у співвідношенні (2.17) власні індуктивності як окремі складові, отримуємо

$$\Psi_k = L_k i_k + \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq k}}^n L_{ks} i_s \quad (2.18)$$

Співвідношення (2.18) використаємо для визначення величини змінення потокозчеплення k -го контуру при відповідному змінненні величини струму в термінах кінцевих прирощень.

$$\Delta \Psi_k = L_k \cdot \Delta i_k + \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq k}}^n L_{ks} \cdot \Delta i_s \quad (2.19)$$

Запишемо підінтегральну частину рівняння (2.16) термінах кінцевих прирощень

$$\Delta W_{\text{маг}k} = i_k \cdot \Delta \Psi_k = i_k \left(L_k \cdot \Delta i_k + \sum_{s=1}^n L_{ks} \cdot \Delta i_s \right) \quad (2.20)$$

Співвідношення (2.20) з урахуванням підсумовування по всіх n контурах, але без інтегрування по потокозчепленням цих контурів, зводиться до співвідношення

$$\Delta W_{\text{маг}} = \sum_{k=1}^n i_k \left(L_k \cdot \Delta i_k + \sum_{s=1}^n L_{ks} \cdot \Delta i_s \right) \quad (2.21)$$

Перш ніж перейти до подальшого перетворення співвідношення (2.21) розглянемо окремий і дуже розповсюджений випадок електромеханічної системи, що утворена двома контурами ($n = 2$).

За умови, що система складається з двох контурів, співвідношення (2.21) приймає вигляд

$$\Delta W_{\text{маг}} = L_1 \cdot i_1 \cdot \Delta i_1 + L_{12} \cdot i_1 \cdot \Delta i_2 + L_2 \cdot i_2 \cdot \Delta i_2 + L_{21} \cdot i_2 \cdot \Delta i_1 \quad (2.22)$$

Приймаючи до уваги, що $L_{12} = L_{21}$ (тобто взаємна індуктивність першого контуру по відношенню до другого контуру дорівнює взаємній індуктивності другого контуру по відношенню до першого контуру), отримуємо

$$\frac{\Delta W_{\text{маг}}}{\Delta t} = \frac{\Delta\left(\frac{1}{2}L_1 i_1^2\right)}{\Delta t} + \frac{\Delta\left(\frac{1}{2}L_2 i_2^2\right)}{\Delta t} + \frac{\Delta(L_{12} i_1 i_2)}{\Delta t} \quad (2.23)$$

Переходячи від кінцевих прирощень до нескінченно малих прирощень (тобто до диференціалів), матимемо

$$dW_{\text{маг}} = d\left(\frac{1}{2}L_1 i_1^2\right) + d\left(\frac{1}{2}L_2 i_2^2\right) + d(L_{12} i_1 i_2) \quad (2.24)$$

Отже повна магнітна енергія, яка запасатиметься в системі двох контурів, визначається як

$$W_{\text{маг}} = \frac{1}{2}L_1 i_1^2 + \frac{1}{2}L_2 i_2^2 + L_{12} i_1 i_2 \quad (2.25)$$

Аналогічно, розглядаючи систему з n контурів, можна записати

$$W_{\text{маг}} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n L_k i_k^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n L_{ks} i_k i_s \quad (2.26)$$

Множник $\left(\frac{1}{2}\right)$ перед другою складовою правої частини (2.26) враховує, що $L_{ks} = L_{sk}$, а отже ця величина при подвійному підсумовуванні зустрічатиметься двічі.

Провівши нескладні перетворення, з (2.26) отримуємо

$$W_{\text{маг}} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \left(L_k i_k^2 + \sum_{s=1}^n L_{ks} i_s i_k \right) \quad (2.27)$$

З урахуванням (2.19) матимемо

$$W_{\text{маг}} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n i_k \Psi_k \quad (2.28)$$

Отже повна енергія, яка надходить в систему контурів ЕМП протягом усього процесу встановлення струмів, визначатиметься як

$$W_{\text{маг}} = \sum_{k=1}^n \int_0^{\Psi_k} i_k d\Psi_k = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n i_k \Psi_k \quad (2.29)$$

Співвідношенням (2.29) визначається загальна кількість енергії, яка запасється в магнітному полі струмів утвореної k контурами електромеханічної системи.

Як правило, котушки ЕМП містять осердя з магнітного матеріалу (більшості з електротехнічної сталі). Отже в процесі змінення струму в таких котушках проявлятимуться нелінійні ефекти, пов'язані з нелінійністю характеристик намагнічування матеріалу осердя. В цілому, наведений вище аналіз процесів в системі контурів залишається справедливим. Однак кінцевий результат розв'язання інтегрального рівняння (2.16), яким визначається енергія, що запасється, звичайно буде іншим. Вказані нелінійні фактори обмежують можливість збільшення енергії, що в ЕМП спрямовується на виконання корисної роботи, але вивчення таких ефектів та прогнозування роботи ЕМП у відповідних режимах дозволяє глибше пізнати суть відповідних процесів та явищ, сформулювати практично корисні поради щодо розроблення оптимальних конструкцій ЕМП та технології їх виготовлення, а також визначати оптимальні умови та параметри експлуатації електромеханічних систем.

2.4. Сили та моменти, що діють між контурами в електромеханічних системах

Розглянуті вище енергетичні співвідношення можна використати для встановлення формул, які надають можливість обчислити сили (моменти), що виникають в електромеханічній системі.

Застосуємо отримані результати до практично важливого випадку, коли ЕМП має два контури з власними індуктивностями L_1, L_2 та взаємною індуктивністю $L_{12} = L_{21} = L_{вз}$.

На рис. 2.8 схематично показано можливі варіанти конструктивного виконання такого ЕМП. При цьому рухомий елемент ЕМП, наведеного на рис. 2.8а, здійснює поступальний рух, а рухомий елемент ЕМП, наведеного на рис. 2.8б обертається навколо деякої осі.

Вважатимемо, що в контурах протікають струми i_1, i_2 . При цьому в магнітному полі всього ЕМП запасатиметься енергія

$$W_{\text{маг}} = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + L_{вз} i_1 i_2 \quad (2.30)$$

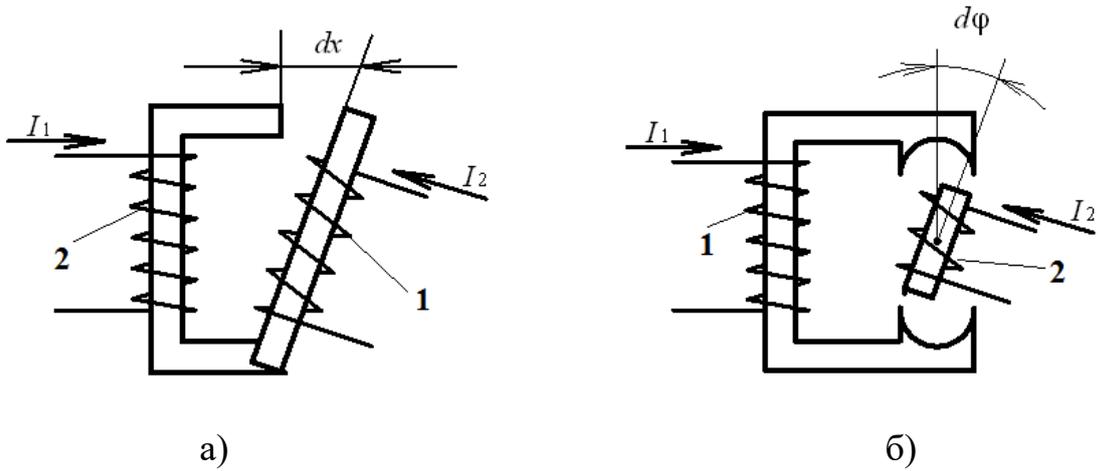


Рис. 2.8. Варіанти конструктивного виконання ЕМП з магнітно зв'язаними контурами

Припустимо, що контуру 1 (рис. 2.8а) надане мале переміщення dx вздовж деякої координатної осі X . Це переміщення в даному ЕМП обумовлюється силою, що діє вздовж координати X та за умови конкретного та постійного значення струмів i_1, i_2 визначатиметься як

$$F_{1X} = \frac{dW_{\text{маг}}}{dx} = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1}{dx} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_2}{dx} + i_1 i_2 \frac{dL_{\text{вз}}}{dx} \quad (2.31)$$

Аналогічно для варіанту ЕМП поданому на рис. 2.8б можна знайти рівняння, яким визначатиметься момент контуру 1 по відношенню до контуру 2. При цьому елементарне лінійне переміщення dx слід визначити через елементарне кутове переміщення $d\varphi$ (адже контур 2 згідно рис. 2.8б обертається відносно контуру 1):

$$dx = d\left(\pi D \frac{\varphi}{2\pi}\right) = \frac{D}{2} d\varphi \quad (2.32)$$

Миттєве значення обертового моменту контуру 1 відносно контуру 2 визначатиметься як

$$m_{1\varphi} = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1}{d\varphi} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_2}{d\varphi} + i_1 i_2 \frac{dL_{\text{вз}}}{d\varphi} \quad (2.33)$$

В більшості ЕМП власні індуктивності контурів практично не залежать від переміщення останніх. За припущень незмінності власних індуктивностей з (2.31), (2.33) матимемо

$$F_{1X} = i_1 i_2 \frac{dL_{B3}}{dx} \quad \text{та} \quad m_{1\varphi} = i_1 i_2 \frac{dL_{B3}}{d\varphi} \quad (2.34)$$

Потокозчеплення обох контурів пов'язані зі струмами, які в цих контурах протікають

$$\Psi_1 = L_1 i_1 + L_{B3} i_2 \quad \text{та} \quad \Psi_2 = L_2 i_2 + L_{B3} i_1 \quad (2.35)$$

Отже, рівняння (2.34) можна переписати в дещо іншому вигляді

$$F_{1X} = i_1 \frac{d\Psi_1}{dx} \quad \text{та} \quad m_{1\varphi} = i_1 \frac{d\Psi_1}{d\varphi} \quad (2.36)$$

Рівняння (2.36) показують, що сила або момент виникають на контурі з постійною власною індуктивністю незалежно від того, чим саме викликається змінення потокозчеплення – струмами в обох контурах, що розглядаються, або в деяких інших контурах, які зв'язані з даними контурами відповідним магнітним зв'язком.

2.5. Закономірності формування електрорушійних сил в електромеханічній системі

Для одного з контурів двоконтурної системи надамо аналітичний вираз для ЕРС, яка генерується в електромеханічній системі

$$e = \frac{d\Psi(i_1, i_2, x)}{dt} = \frac{d\Psi}{di_1} \frac{di_1}{dt} + \frac{d\Psi}{di_2} \frac{di_2}{dt} + \frac{d\Psi}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (2.37)$$

Складові правої частини співвідношення (2.37) відображають відповідну складову загальної ЕРС, причому фізична природа цих складових різна, а саме

- перша складова відображає ЕРС самоіндукції, що наводиться в даному контурі за рахунок змінення власного струму (точніше магнітного потоку, що у даному контурі цим струмом обумовлюється);

- друга складова відображає ЕРС взаємної індукції, що наводиться в даному контурі за рахунок змінення струму в другому контурі (точніше магнітного потоку, що у даному контурі обумовлюється струмом, який протікає у другому контурі);

- третя складова характеризує ЕРС, яка обумовлюється взаємним переміщенням складових (контурів) електромеханічної системи.

Часто перші дві складові співвідношення (2.37) розглядають сумісно, називаючи відповідну ЕРС *трансформаторною*. Це обумовлене тим, що такі самі ЕРС діють в системах, що не мають рухомих складових, наприклад у трансформаторах.

Третя складова співвідношення (2.37) характеризує складову загальної ЕРС притаманну виключно електромеханічним системам і є безпосереднім результатом механічного переміщення й внаслідок залежності її величини від швидкості руху зазвичай зветься *ЕРС руху*.

Електричне коло, яке входить до складу електромеханічної системи, можна описати рівняннями Кірхгофа, причому, звичайно, слід обов'язково враховувати й ЕРС переміщення (руху).

Механічна структура (складова) електромеханічної системи описується рівняннями динамічної рівноваги (рівняннями Д'Аламбера). При цьому серед сил, що діють в електромеханічній системі слід враховувати й сили електромагнітного походження.

2.6. Моделі конструкційного виконання електромеханічних перетворювачів і їх застосування

Реальні конструкції обертових електричних машин можна звести до двох моделей, які наведені на рис. 2.9.

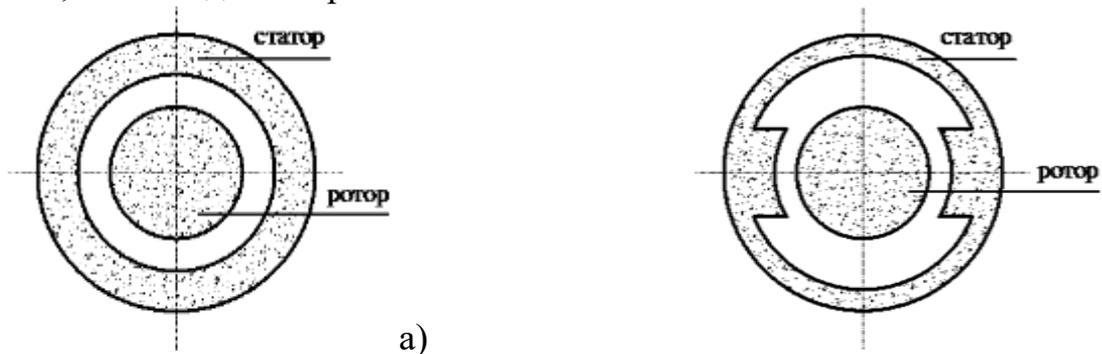


Рис. 2.9. Моделі конструкційного виконання обертових електромеханічних перетворювачів

Першій моделі (типу) конструкційного виконання (рис. 2.9а) притаманні концентричні магнітні поверхні, які характеризуються симетрією з обох сторін повітряного зазору.

Другій моделі (рис. 2.9б) – притаманні концентричні магнітні поверхні, одна з яких гладка, а на другій – відповідним чином сформовані спеціальні виступи, що створює певну нерівномірність повітряного зазору. Сучасні електричні машини високої енергоефективності фактично усі мають нерівномірність повітряного зазору за причини наявності зубцевих зон статора або ротора. Далі наведені приклади конструкційного виконання електричних машин.

Вентильний електродвигун – різновид двигунів постійного струму, у якого шітково-колекторний (ЩКВ) замінений електронним комутатором (рис.2.10).



Рис.2.10. Порівняння конструктивних особливостей вентильного електродвигуна з традиційним двигуном постійного струму

Вентильні двигуни суміщують переваги машин змінного струму, наприклад, надійність, та двигунів постійного струму – керованість. Вентильний двигун має постійний магніт-ротор, що взаємодіє з обертовим магнітним полем котушок статора, по яким проходить струм. Струм в котушках комутується напівпровідниковими вентилями, які керуються за допомогою мікроконтролера. Мікроконтролер перемикає виводи котушок таким чином, щоб взаємодія їх магнітного поля з полем магніта-ротора формувала обертовий момент при будь-якій його орієнтації (рис.2.11). Вентильні двигуни застосовуються в тих сферах, де необхідно регулювати швидкість обертання робочого органу. Вони забезпечують точне позиціонування і застосовуються в комп'ютерній техніці (електропривод венчестера, кулерів), в робототехнічних системах, супутниках, літальних апаратах, насосних станціях, гірничовидобувних механізмах та ін.

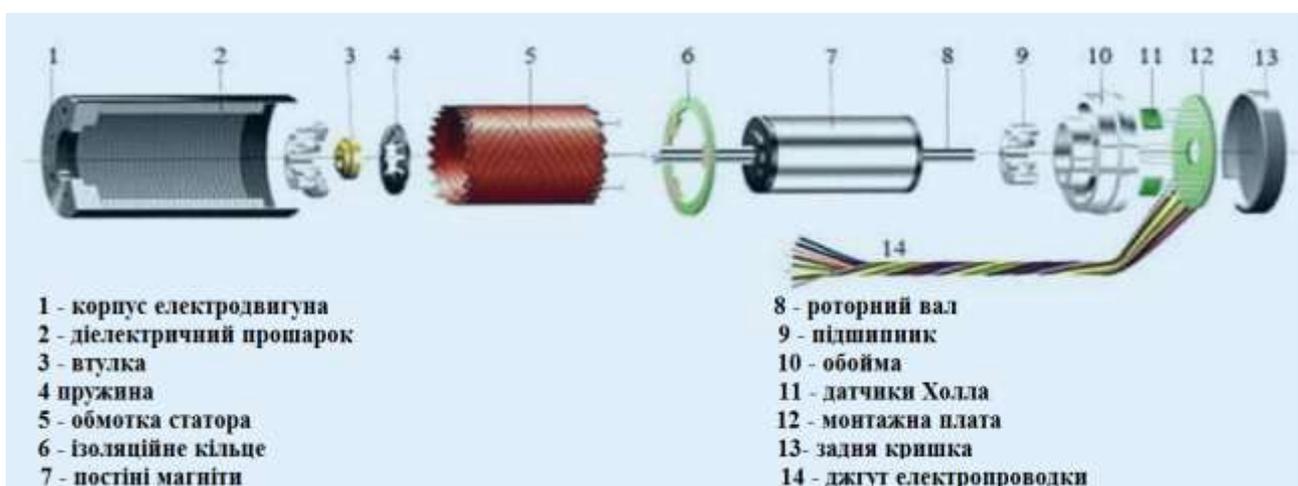


Рис.2.11. Основні конструктивні елементи різновидів вентильного електродвигуна

Вентильний реактивний двигун (ВРД), також відомий як вентильно-індукторний двигун (SRM), - це тип безколекторної синхронної машини, що працює за принципом "магнітного опору, що перемикається", який створює крутний момент за рахунок управління струмом в обмотках статора. Крутний момент створюється через прагнення ротора з магнітом'якого матеріалу зайняти положення з мінімальним магнітним опором до магнітного поля статора і використовує принцип реактивного моменту для створення обертання (рис.2.12).



Рис.2.12. Вентильний реактивний двигун

Статор має зубчасту конструкцію з обмотками, на які подаються імпульси напруги, ротор виготовлений з магнітом'якого матеріалу і має зубчасту форму, але не має обмоток або постійних магнітів. ВРД має високу перевантажувальну здатність і може витримувати триразове навантаження.

Синхронний гістерезисний двигун – це неявнополісний синхронний двигун без обмотки збудження, ротор якого виконаний з масивного магнітотвердого матеріалу з великим залишковим намагнічуванням і широкою петлею гістерезиса (рис.2.13). Статор гістерезисного двигуна має звичайну три- або двофазну обмотку, яка укладена в пази сердечника з електротехнічної сталі.

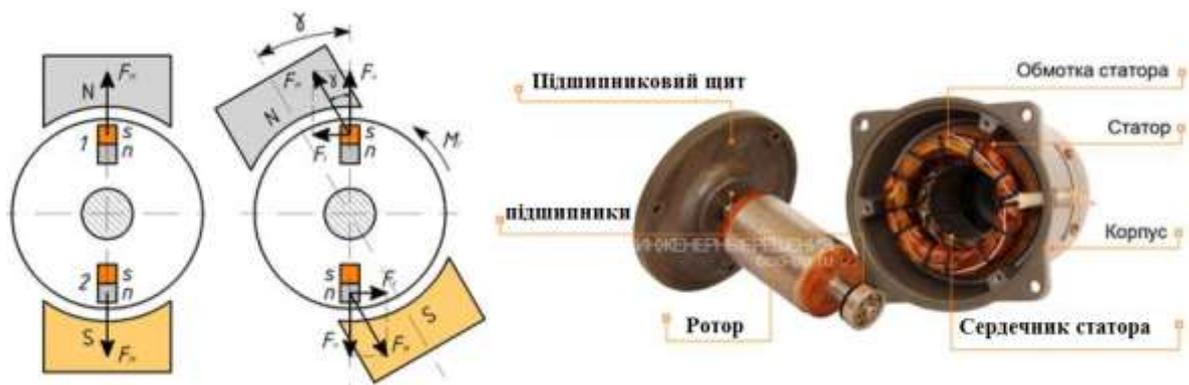


Рис.2.13. Синхронний гістерезисний двигун

Кроковий двигун – це електродвигун, що перетворює електричні імпульси на точний кутовий рух (рис.2.14). Його ротор рухається не безперервно, а дискретними кроками, що дозволяє досягти високоточного позиціонування без зворотного зв'язку (у системах з відкритим контуром).

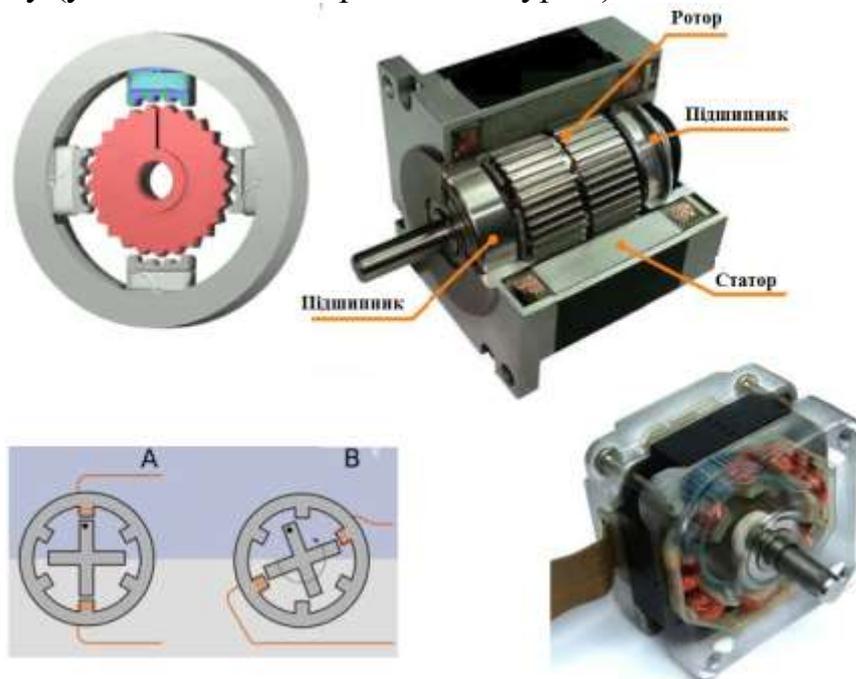


Рис.2.14. Крокові двигуни

Крокові двигуни з енкодером замкнутого типу працюють з швидкою реакцією і плавним ходом, без шуму та нагрівань. Наявність енкодера у кроковому двигуні забезпечує роботу без втрати кроків і ривків (нерівномірність ходу), що є присутнім в роботі звичайних крокових двигунів.

За типами Крокові двигуни відрізняються за такими типами:

- з постійними магнітами (PM), в якому використовують ротор з постійним магнітом;
- зі змінним магнітним опором (VR), в якому ротор не містить магнітів, а обертається завдяки зміні магнітного опору.
- гібридні, які поєднують властивості двигунів з постійними магнітами та

змінним опором, забезпечують високу точність і крутний момент.

Крокові двигуни застосовуються в промислових верстатах з ЧПУ, монтажному обладнанні, в різних обробних верстатах, в сканерах, принтерах та ін.

Електродвигуни з осьовим магнітним потоком (британська компанія YASA). Двигун YASA з осьовим магнітним потоком працює за принципом електромагнітної індукції, де магнітне поле рухається паралельно осі двигуна, а не перпендикулярно, як у традиційних двигунах. При подачі струму на обмотки статора створюється магнітне поле, яке взаємодіє з постійними магнітами на роторі, що призводить до його обертання. Ця конструкція забезпечує вищу ефективність та менші втрати енергії, оскільки магнітне поле більш рівномірно розподілене між ротором і статором. Статор і ротор мають дископодібну форму. На статорі розташовані обмотки, а на роторі — постійні магніти (рис.2.15).

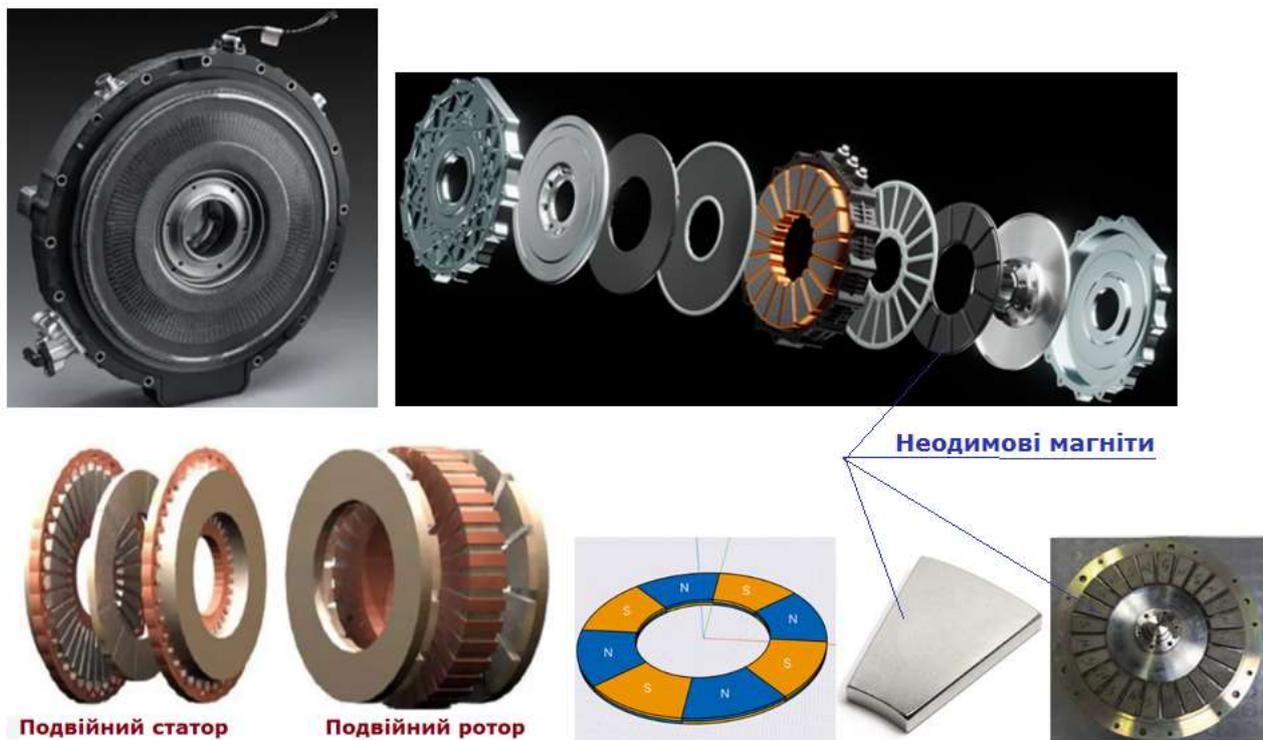


Рис.2.15. Особливості конструкції електродвигуна з осьовим магнітним потоком

Новий двигун масою лише 12,7 кг досяє пікової потужності 750 кВт. Аксиальні двигуни мають щільність потужності 59 кВт/кг і забезпечують перевагу щільності крутного моменту на 40% і перевагу ефективності на 1-2% порівняно з традиційними радіальними двигунами. Для порівняння – найкращі сучасні двигуни від Helix, Donut Labs, H3X та Equipmake мають щільність потужності лише 13–25 кВт/кг. Завдяки вазі та об'єму приблизно вдвічі меншим, ніж у порівнянних радіальних двигунів, щільність крутного моменту може досягати чотирьох разів більшого, ніж у аналогічних радіальних двигунів.

З точки зору структури статора, конструкції без статорного ярма можуть дозволити аксіальним двигунам мати щільність потужності в 2-3 рази більшу, ніж радіальні двигуни, при зменшенні маси заліза статора на 80%. Для обмоток статора конструкція «зосередженої обмотки» осьового двигуна покращує щільність потужності завдяки 100% ефективності обмотки порівняно з 50% коефіцієнтом використання в радіальних котушках двигуна. Щоб пом'якшити руйнівні осьові сили між статорами та роторами в дисковій структурі, двигуни з осьовим потоком зазвичай мають конфігурацію з подвійним статором і одним ротором або структуру з одним статором і подвійним ротором (див. рис.2.15).

Неодимові магніти відіграють ключову роль у двигунах з осьовим потоком, оскільки їх висока щільність магнітного потоку насичення та високе продукування магнітної енергії можуть підвищити напруженість магнітного поля та продуктивність двигуна. Наприклад, електродвигуни, які використовують високоефективні неодим-залізо-борні магніти, можуть збільшити щільність потужності більш ніж на 20% порівняно з традиційними магнітними матеріалами. Двигуни з осьовим потоком використовують клиноподібні неодимові магніти або повні кільцеві неодимові магніти, які намагнічені в осьовому напрямку в секторах на задній частині як ротор (див. рис.2.15).

Сердечник статора може бути виготовлений із тонких листів кремнієвої сталі, магнітом'яких композитних матеріалів або аморфних сплавів. Обмотки з плоского дроту значно збільшують площу контакту між дротами, підвищуючи здатність розсіювати тепло. Зокрема, при високих коефіцієнтах заповнення щілини теплопровідність між обмотками становить 150% від коефіцієнта заповнення з низьким рівнем. Це допомагає знизити робочу температуру двигуна та збільшити термін його служби. У високошвидкісних і високочастотних умовах роботи оптимальне співвідношення ширини і висоти плоских мідних провідників змінюється зі швидкістю обертання. Збільшуючи співвідношення ширини та висоти плоских дротів, збільшується питома поверхня плоских дротів, покращуючи їх скін-ефект і підвищуючи ефективність двигуна.

Існує також сучасний варіант виготовлення статора електродвигуна з осьовим магнітним потоком в певному діапазоні потужностей. На відміну від традиційних двигунів, мідні котушки безпосередньо вигравіровані на друкованій платі, що зменшує вагу та розмір двигуна на 50% порівняно зі звичайними конструкціями (рис.2.16).

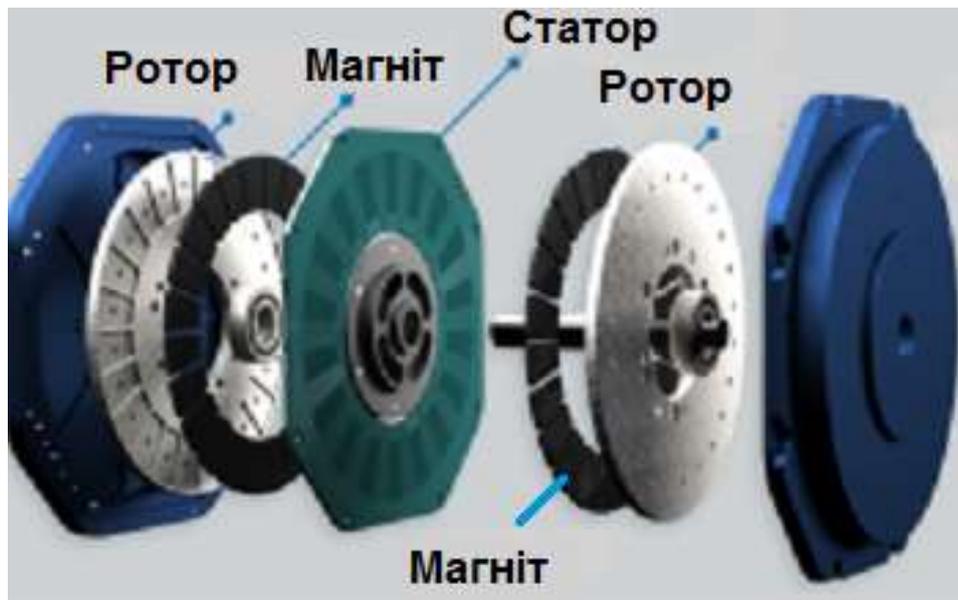


Рис.2.16. Електродвигун з осьовим магнітним потоком зі статором на основі друкованої плати

Окрім розміру та ваги, відсутність сердечників також зменшує гістерезис статора та втрати на вихрові струми, підвищуючи ефективність та фізичний вихід на одиницю вхідної електроенергії. Усуваючи потенційні точки відмови, пов'язані з мідною обмоткою та ізоляцією в традиційних двигунах, статори з друкованої плати підвищують надійність двигуна.

Виробники сучасних електромобілів зосереджуються саме на цьому типі двигуна та розробляють його для покращення продуктивності автомобіля та запасу ходу.

Асинхронні та синхронні машини. Робота більшості сучасних електричних машин ґрунтується на утворенні обертового магнітного поля — феномену, що виникає при накладенні декількох пульсуючих полів, зміщених по фазі в просторі. Принцип було відкрито у 1888 року італійським фізиком Г. Ферарисом і, незалежно від нього, сербським інженером М. Теслою.

Асинхронні та синхронні електродвигуни суто зовні – практично однакові. Всі електродвигуни мають нерухомий статор, що складається з обмоток і рухомий ротор (рис.2.17). Обмотки статора зсунуті на 120° один від одного і саме тому електричний струм, що проходить по них, створює обертове магнітне поле, а воно в свою чергу обертає ротор. Головна відмінність синхронних та асинхронних електродвигунів – це конструкція ротора. Ротор синхронного двигуна комплектується постійними магнітами чи обмотками збудження. Обмотки можуть бути як явнополюсними, так і розподіленими (покладеними в пази ротора). Крім того, ротор синхронної машини може мати короткозамкнуті обмотки, які виконують роль пускової або демпферної обмотки.



Рис.2.17. Відмінність синхронних та асинхронних електродвигунів за конструкцією ротора

Після розгону ротора до швидкості близької до частоти обертання магнітного поля статора, на котушки полюсів через щітково-контактний вузол подається постійна напруга, яка збуджує постійне магнітне поле (рис.2.17). Протилежні полюси магнітних полів притягуються один до одного і частота обертання ротора стає синхронною із частотою магнітного поля статора.

Асинхронні машини — це електричні машини змінного струму, в яких швидкість обертання ротора відрізняється (є меншою) від швидкості обертання магнітного поля статора. Ця різниця є ключовою особливістю асинхронних машин, що дозволяє їм генерувати крутий момент. Вони складаються з нерухомого статора та рухомого ротора, а їх принцип роботи ґрунтується на електромагнітній індукції. Коли на обмотки статора подається змінний струм, виникає обертове магнітне поле. Це поле перетинає обмотку ротора, індукуючи в ній струм. Створене ротором магнітне поле взаємодіє з полем статора, змушуючи ротор обертатися. Швидкість ротора завжди менша за швидкість магнітного поля, тому що для індукції струму в роторі необхідна відносна швидкість обертання.

Завдяки простоті, надійності та низькій вартості трифазні асинхронні машини з короткозамкненим ротором є найпоширенішими і використовуються в майже 95% електричних приводів у промисловості, сільському господарстві, побутовій техніці та інструментах. Але їх коефіцієнт потужності може бути нижчим порівняно з іншими типами двигунів. Конструктивні схеми асинхронних машин не обмежуються тільки обертовим типом. На рис. 2.18 представлені конструктивні схеми основних типів існуючих обертових і лінійних асинхронних машин.

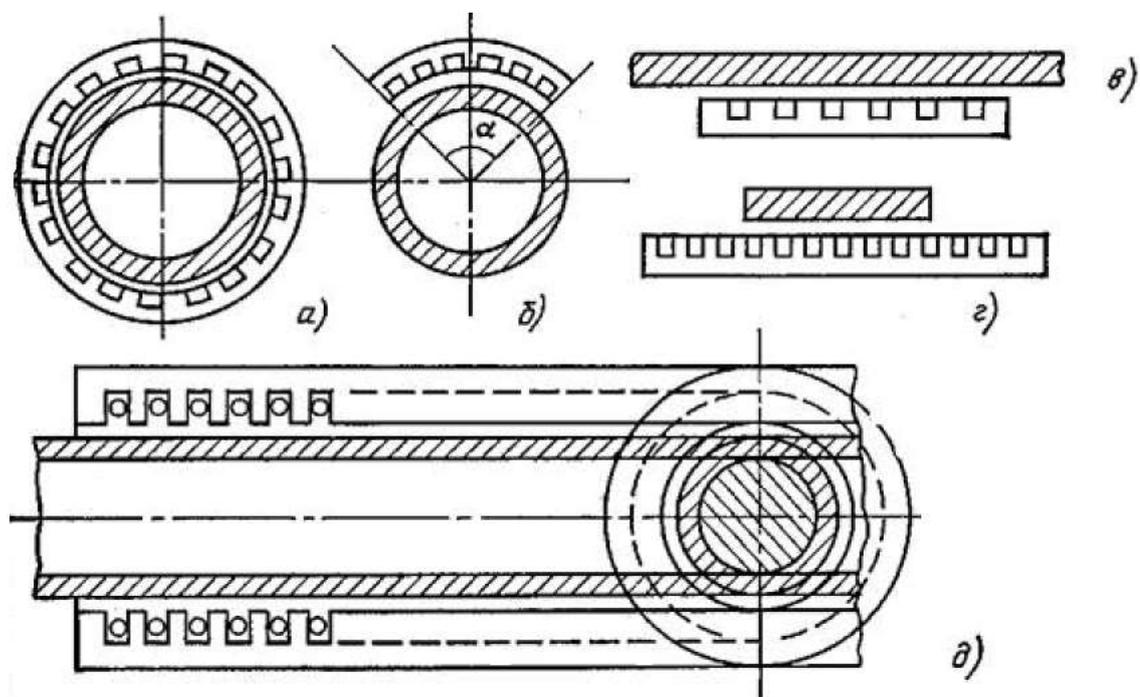


Рис.2.18. Конструктивні схеми основних типів існуючих обертових і лінійних асинхронних машин: а – обертовий АД нормального виконання, б – роторний дугостаторний АД, в – лінійний АД з коротким індуктором, г – лінійний АД з коротким вторинним елементом, д – циліндричний лінійний АД

Лінійні імпульсні електромеханічні перетворювачі Лінійні імпульсні електромеханічні перетворювачі (ЛЕП) — це пристрої, що перетворюють електричну енергію, накопичену в імпульсному джерелі (наприклад, конденсаторі), на короткочасний лінійний рух, на відміну від постійної роботи. Вони складаються з електричної частини, яка накопичує енергію, та механічної частини, яка створює лінійне переміщення. Такі перетворювачі характеризуються короткочасним робочим режимом (кілька мілісекунд) та значними імпульсними навантаженнями. Електронна система керує процесом накопичення та розряду енергії для забезпечення ефективної роботи.

На рис.2.19 представлено ЛЕП електродинамічного типу для роботи в прискорювальному та ударно-силовому режимах роботи. Нерухомий індуктор 1 та рухомий якорь 2 виконані у вигляді співвісно встановлених дискових обмоток. Індуктор з'єднаний з нерухомим упором 3, а якорь взаємодіє з виконавчим механізмом 4. Індуктор та якорь щільно намотані у два ряди мідною шиною, яка має внутрішній вигин від одного ряду до іншого, та просочені епоксидною смолою. Завдяки такій конструкції висновки індуктора та якоря розташовані в зовнішніх шарах, що дозволяє легко підключати їх як до імпульсного джерела живлення, так і один до одного. Якорь підключається до індуктора та до джерела живлення за допомогою гнучких струмопідводів q_1, q_2 .

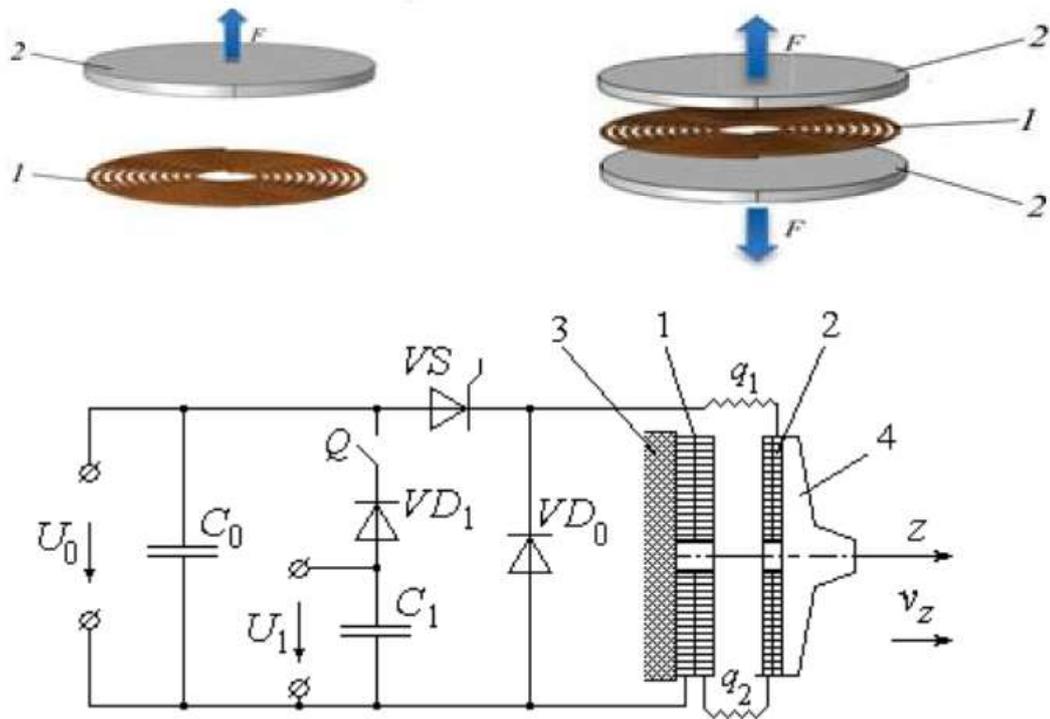


Рис.2.19. Імпульсний електромеханічний перетворювач

Постійна полярність імпульсу струму збудження забезпечується зворотним діодом VD_0 , а тиристор VS запускає ЛІЕП в роботу. При розімкненому ключі Q ЛІЕП збуджується лише від основної секції ємнісного накопичувача енергії (ЄНС) з ємністю C_0 , яка заряджається до напруги U_0 . При замкнутому ключі Q ємність джерела імпульсів стає рівною $C_{\text{сум.}} = C_0 + C_1$.

ЛІЕП перетворюють електричну енергію на механічну енергію лінійного переміщення, що робить їх корисними для специфічних застосувань, що потребують різких, імпульсних рухів (рис.2.20 -2.21).

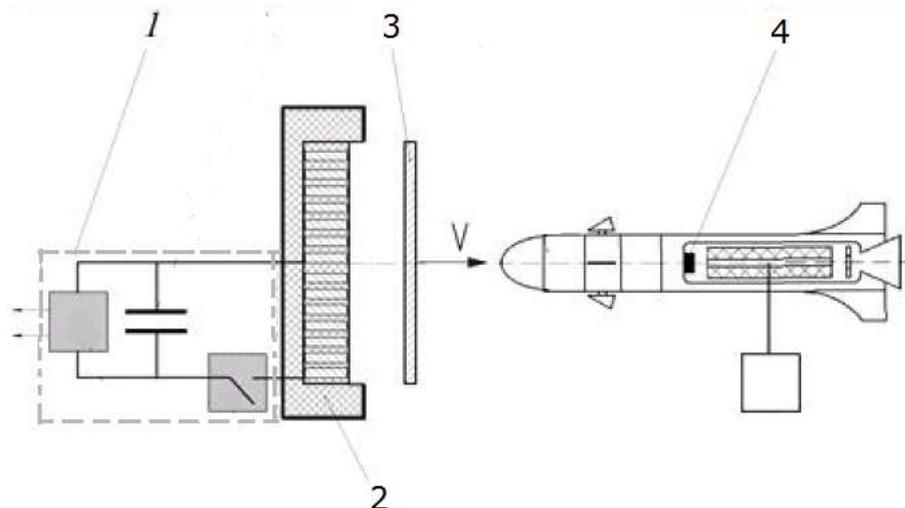


Рис.2.20. Схема установки для випробувань виробів авіа-космічної техніки при зіткненні з об'єктом: 1 – блок живлення та керування; 2 – лінійний імпульсний електромеханічний перетворювач; 3 – виконавчий механізм; 4 – об'єкт

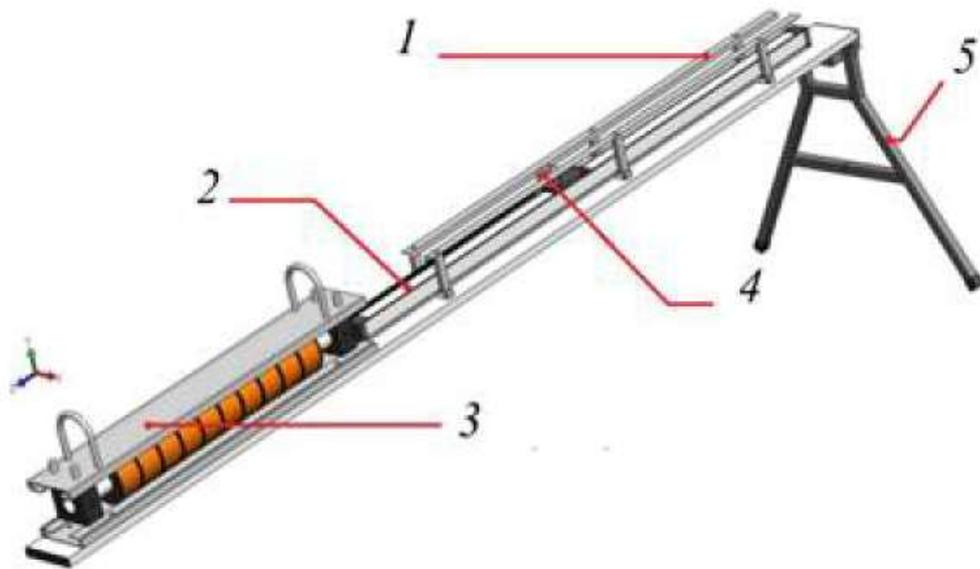


Рис.2.21. Конструкція електромеханічної катапульти для БПЛА: 1 – направляючі 2– шток; 3 – ЛІЕП; 5 – опора

2.7. Магнітне поле в повітряному зазорі

На прикладі обертової ЕМ в циліндричній системі координат розглянемо поведінку магнітного поля на моделі конструкційного виконання електричної машини, наведеної на рис. 2.22. Для аналізу наведеної моделі конструкційного виконання електричної машини скористаємось циліндричною системою координат з осями ρ , φ , Z . При цьому орієнтуємо ось Z вздовж осі моделі. За таких умов полярні координати ρ , φ характеризуватимуть положення точки на площині, що перпендикулярна до осі Z .

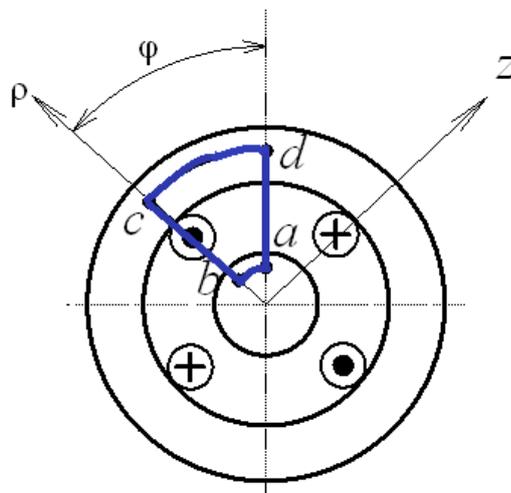


Рис. 2.22. Модель до розрахунку магнітного поля в повітряному зазорі електричної машини

В загальному випадку магнітне поле в повітряному зазорі тривимірне, тобто має складові в напрямку всіх трьох осей. Однак задачу моделювання можна суттєво спростити, якщо припустити, що магнітне поле стає незалежним від координати Z при довжині обмотки в межах довжини циліндрів актиної частини ЕМ, а оскільки радіус ротора r значний і суттєво перевершує величину повітряного зазору, радіальна складова магнітного поля вздовж координати ρ в повітряному зазорі буде змінюватися несуттєво і цим змінням можна також нехтувати. Отже, задача розрахунку магнітного поля в зазорі нами зведеться до розрахунку змінення магнітного поля виключно вздовж координати φ .

Скориставшись законом повного струму, для будь-якого замкненого контуру $abcd$ (див. рис. 2.22) можна записати

$$\int_{abcd} \vec{H} d\vec{l} = \sum_{abcd} i, \quad (2.38)$$

де $\sum_{abcd} i$ – сумарний струм всередині контуру $abcd$; \vec{H} – напруженість магнітного поля на відповідних ділянках $d\vec{l}$ контура $abcd$.

Вважаючи додатною ту складову поля H_{δ} в зазорі, яка спрямована всередину машини, матимемо співвідношення, що справедливе для будь-якої точки повітряного зазору з координатою φ :

$$\delta [H_{\delta}(\varphi) - H_{\delta}(0)] = \sum i \quad (2.39)$$

Зважаючи на те, що всі контури, які проходять крізь повітряний зазор, замикаються в точці $\varphi = 0$, величина $H_{\delta}(0)$ буде присутня в кожному з рівнянь (яким описується відповідний контур), тобто є константою.

Таким чином, за умови, що струм всередині контуру визначений та відома константа $H_{\delta}(0)$, можна розв'язати рівняння (2.39) відносно $H_{\delta}(\varphi)$, визначивши, тим самим, магнітне поле в повітряному зазорі електричної машини.

Розглянемо задачу визначення розподілення $H_{\delta}(\varphi)$ для різних типів обмотки і почнемо з найпростішої обмотки, що складається з чотирьох провідників, з'єднаних так, що струми в сусідніх провідниках протікають в протилежних напрямках (рис. 2.23а).

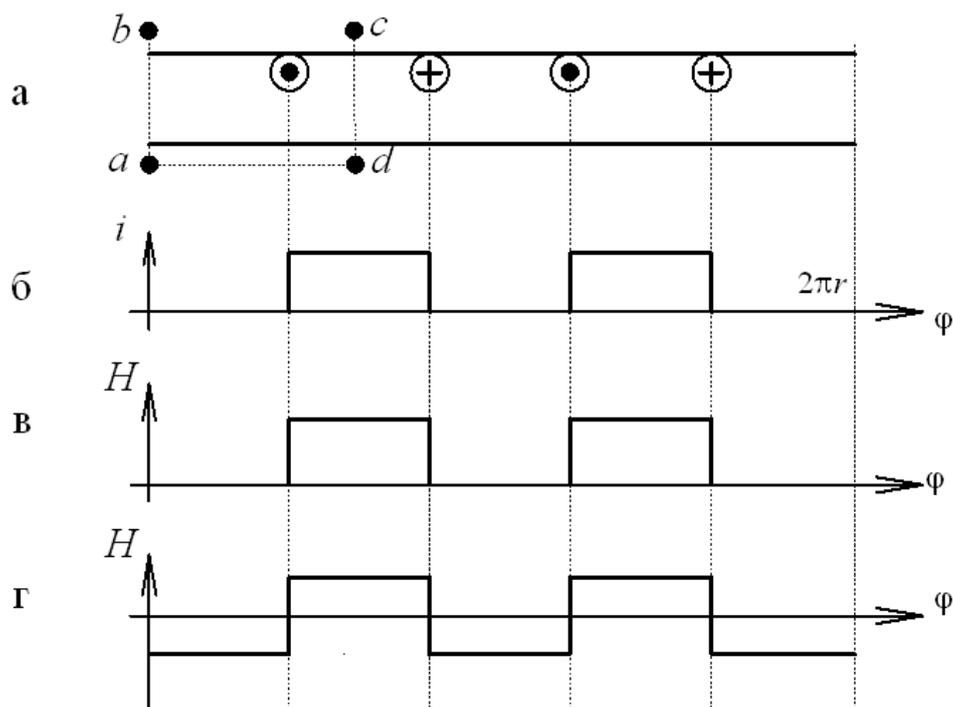


Рис. 2.22. Модель найпростішої обмотки (а) та розподілення струму (б) і магнітного поля (в, г) в повітряному зазорі

Згідно з законом неперервності потоку (законом Гауса) повний магнітний потік Φ , що перетинає замкнену поверхню, має дорівнювати нулю.

$$\Phi = \int \vec{B} d\vec{s} = \mu_0 \int \vec{H} d\vec{s} = 0 \quad (2.40)$$

Співвідношення (2.0) означатиме, що повний магнітний потік, який перетинає повітряний зазор (утворений між обмотками статора та ротора), дорівнює нулю. Отже, середня величина $H_{\delta}(\varphi)$ має теж дорівнювати нулю.

Таким чином, для отримання нульового значення середньої величини $H_{\delta}(\varphi)$, необхідно досягти симетрії відповідного розподілення магнітного поля по відношенню до координати φ (див. рис. 2.22в). Це означатиме, що постійна складова $H_{\delta}(0)$ дорівнюватиме

$$H_{\delta}(0) = -\frac{i}{2\delta} \quad (2.41)$$

При цьому напруженість магнітного поля в повітряному зазорі електричної машини вигляд як на рис. 2.22г.

2.8. Зв'язок магнітного поля в повітряному зазорі з напругою на обмотках

Розглянемо пристрій у вигляді тороїдального осердя з двома обмотками (рис. 2.23), в якому існуватиме пульсуюче магнітне поле.

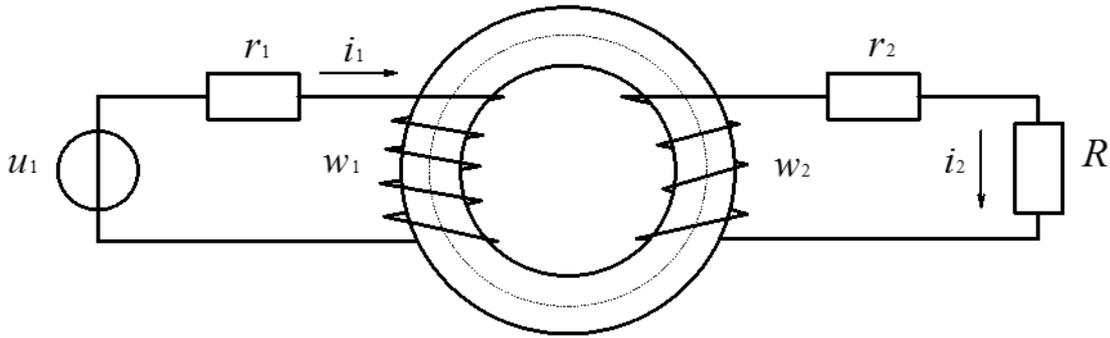


Рис. 2.23. Електромагнітний пристрій з тороїдальним осердям

Нехтуючи потоками розсіювання, співвідношення рівноваги (рівняння стану) для первинного та вторинного кіл можна записати, скориставшись другим законом Кірхгофа і нехтуючи потоками розсіювання, рівняння стану для первинного та вторинного кіл можна записати у такому вигляді

$$u_1 = r_1 i_1 + w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad u_2 = (r_2 + R) i_2 + w_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.42)$$

Припустивши, що $r_1 i_1 \ll w_1 d\Phi/dt$, для первинного електричного кола матимемо

$$u_1 \approx w_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.43)$$

За умови, що прикладена до первинної обмотки напруга визначається як $u = \sqrt{2}U \cos(\omega t)$, розв'язок рівняння (2.43) відносно магнітного потоку матиме вигляд

$$\Phi \approx \frac{\sqrt{2}U}{\omega w} \sin(\omega t) = \Phi_m \sin(\omega t) \quad (2.44)$$

Отже, якщо нехтувати активним опором та магнітним потоком розсіювання, прикладена напруга повністю визначає магнітний потік в осерді. Фізично це означає, що в осерді має встановитися такий потік, який наводить ЕРС, здатну врівноважити прикладену напругу і головне – цей потік не залежить від вторинного струму.

2.9. Ієрархічний зв'язок рівнянь електромагнітного поля для різних типів електромеханічних перетворювачів енергії

Шляхом узагальнення рівнянь Максвела будемо вирішувати задачу пошуку загальних ознак в ієрархічному зв'язку рівнянь електромагнітного поля для

різних типів електромеханічних перетворювачів енергії і принципами побудови імітаційних моделей в об'єктно-орієнтованому проектуванні ЕМП. В якості базових приймаються рівняння Максвелла класичної електродинаміки:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{D} = \rho, \\ \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{B} = 0, \end{cases} \quad (2.45)$$

В (2.45) вектори напруженості електричного \vec{E} і магнітного \vec{H} полів пов'язані співвідношеннями:

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad \vec{J} = \sigma \vec{E}, \quad (2.46)$$

з векторами електричної \vec{D} і магнітної \vec{B} індукцій, вектором густини електричного струму \vec{J} , який є відгуком середовища на наявність в ній електромагнітного поля; ρ – об'ємна густина стороннього заряду; ε_0 і μ_0 – електрична і магнітна постійні, σ – питома електрична провідність; відносні діелектрична ε і магнітна μ проникності середовища; t – час.

Векторний потенціал магнітного поля A , густина струму \vec{J} і напруженість магнітного поля \vec{E} у плоскопаралельному наближенні для асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором (АД з КЗР) мають по єдиній складовій:

$$\vec{A} = \vec{e}_z A_z; \quad \vec{J} = \vec{e}_z J_z; \quad \vec{E} = \vec{e}_z E_z. \quad (2.47)$$

В такому разі індукція \vec{B} і напруженість магнітного поля \vec{H} мають по дві складових, спрямованих по радіальній та тангенціальній вісям у циліндричній системі координат (R, φ, z) :

$$\vec{B} = \vec{e}_R B_R + \vec{e}_\varphi B_\varphi; \quad \vec{H} = \vec{e}_R H_R + \vec{e}_\varphi H_\varphi. \quad (2.48)$$

Для спрощення математичного опису при вирішенні плоскопаралельної задачі прийнято ряд допущень:

- 1) не враховується зміна магнітного поля уздовж аксіальної вісі;
- 2) магнітна проникність матеріалу осердя не залежить від просторової координати φ , де $0 \leq \varphi \leq 2\pi$;
- 3) не враховується насичення матеріалу магнітопроводу (магнітна провідність вважається сталою);
- 4) осердя магнітопроводів не мають пазів, а їх вплив враховується еквівалентним збільшенням повітряного проміжку;

5) струми обмотки статора внаслідок відсутності пазів винесено у проміжок машини і рівномірно розподілені по його висоті.

З урахуванням прийнятих допущень рівняння векторного магнітного потенціалу у повітряному проміжку АД з КЗР записується як

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\vec{A}\right)=\vec{J}_{\text{ст}}+\vec{J}_{\text{р}}, \quad (2.49)$$

де $J_{\text{ст}}$ – густина струму в обмотці статора; $J_{\text{р}}$ – густина струму в обмотці ротора.

Використовуючи рівняння Максвелла (2.45), виконуючи математичні перетворення з урахуванням (2.47), (2.48), (2.49) і проєцюючи отримані вирази на координатну вісь z , записуються рівняння магнітного поля для АД з КЗР

$$\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial R}\left(R\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_z}{\partial z}\right)+\frac{1}{R^2}\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_z}{\partial\varphi}\right)=-J_{\text{ст}}-J_{\text{р}}. \quad (2.50)$$

Рівняння (2.50) представляється у вигляді суми, перший член якої являє собою розподіл магнітної індукції у ярмі машини, а другий – потоки розсіювання ротора

$$\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial R}\left(R\frac{1}{\mu}\frac{\partial A}{\partial R}\right)=\left[\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial R}\left(R\frac{1}{\mu}\frac{\partial A}{\partial R}\right)\right]_a+\left[\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial R}\left(R\frac{1}{\mu}\frac{\partial A}{\partial R}\right)\right]_{\sigma} \quad (2.51)$$

Перша складова (2.51) після перетворень має вигляд

$$\left[\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial R}\left(R\frac{1}{\mu}\frac{\partial A}{\partial R}\right)\right]_a=-qA. \quad (2.52)$$

Потоки розсіювання у пазах ротора пропорційні струму ротора, тому друга складова (2.51) записується у вигляді.

$$\left[\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial R}\left(R\frac{1}{\mu}\frac{\partial A}{\partial R}\right)\right]_{\sigma}=K_{\sigma 2}J_{\text{р}}. \quad (2.53)$$

Коефіцієнт $K_{\sigma 2}$ у (2.53) розглядається як відношення індуктивного опору ротора до опору контуру намагнічування $X_{\sigma 2}/X_{\mu}$. Підставляючи (2.52) і (2.53) у (2.51), отримуються диференційні рівняння для векторного магнітного потенціалу АД з КЗР, яке враховує вплив магнітних опорів осердь статора і ротора, а також розсіювання обмотки статора

$$\frac{1}{R_0^2}\frac{d^2A}{d\varphi^2}-qA=-\mu_0J_{\text{ст}}-\mu_0(1+K_{\sigma 2})J_{\text{р}}, \quad (2.54)$$

де R_0 – радіус середньої лінії повітряного проміжку.

Рівняння (2.54) з нульовими граничними умовами ($A = 0$) по координаті R і періодичними умовами по координаті φ утворюють двовимірну крайову задачу, рішення якої визначає магнітне поле у проміжку машини і магнітопроводах статора і ротора. Отримане диференційне рівняння (2.54) вирішувалось кінцево-різницевим методом за допомогою розробленої програми у пакеті Matlab.

Досліджено і проаналізовано аналогічним чином рівняння електромагнітного поля, записані для електромеханічних перетворювачів енергії циліндричного типу: асинхронного двигуна з фазним ротором (АД з ФР), асинхронного двигуна з масивним ротором (АД з МР), конденсаторного асинхронного двигуна (КАД), синхронного генератора (СГ). В рівняннях Максвелла наведених типів електромеханічних перетворювачів енергії виділено відмітні ознаки та сформовано їх ієрархічну структуру. За наявності базового класу узагальненого електромеханічного перетворювача енергії шляхом спадкоємства, що використовує розглянуті принципи ООП, додаються або відсікаються ті ознаки, які призводять до синтезу конкретної моделі розподілу електромагнітного поля. Результати остаточних перетворень при наявності вказаних граничних умов наведені у табл.2.2, з якої можна зробити такі висновки:

- 1) первинне (статорне) коло для різних типів електромеханічних перетворювачів енергії загальне і визначається топологією групи циліндричних машин;
- 2) система живлення (права частина рівнянь) не впливає на матрицю розрахункової моделі;
- 3) вторинне (роторне) коло визначається видовими ознаками електромеханічних перетворювачів енергії.

Користуючись класовим шаблоном узагальненого електромеханічного перетворювача енергії і вибираючи певні ознаки, здійснюється перехід до об'єкту конкретного електромеханічного перетворювача енергії. Різні комбінації джерел струму і закони їх зміни дозволяють отримувати моделі різноманітних типів машин. Доведено, що аналогічно породжуються об'єктні структури як відомих типів електромеханічних перетворювачів енергії, так і ще не створених, наділяючи їх новими ознаками. Формування математичної моделі перехідних процесів конкретного типу електромеханічного перетворювача енергії виконувалась із складових компонентів базової моделі, керуючись розробленими принципами спадкоємства, ієрархії і поліморфізму.

Таблиця 2.2. Рівняння Максвелла для циліндричних електромеханічних перетворювачів енергії

ЕМПЕ	Ліва частина рівняння	Права частина рівняння
АД з КЗР	$\frac{1}{R_0^2} \frac{d^2 A}{d\varphi^2} - qA$	$-\mu_0 J_{ст} - \mu_0(1 + K_{\sigma 2})J_p$
АД з ФР	$\frac{1}{R_0^2} \frac{d^2 A}{d\varphi^2} - qA$	$-\mu_0 J_{ст} - \mu_0(1 + K_{\sigma 2})J_p$
КАД	$\frac{1}{R_0^2} \frac{d^2 A}{d\varphi^2} - qA$	$-\mu_0 J_{p.o} - \mu_0 J_{k.o} - \mu_0 J_p$
АД з МР	$\frac{1}{R_0^2} \frac{d^2 A}{d\varphi^2} - qA$	$-\mu_0(J_{ст} + J_p)$
ДПТ	$\frac{1}{R_0^2} \frac{d^2 A}{d\varphi^2} - qA$	$-\mu_0(J_3 + J_a + J_k + J_{д.п})$
СГ	$\frac{1}{R_0^2} \frac{d^2 A}{d\varphi^2} - qA$	$-\mu_0(J_3 + J_a)$

Система рівнянь електромеханічних перетворювачів енергії базової машини в динамічних режимах роботи складається з чотирьох рівнянь Кірхгофа, рівнянь електромагнітного моменту і руху. Для узагальненого електромеханічного перетворювача енергії справедливі відомі рівняння напруги в системі координат uv , яка обертається з довільною кутовою швидкістю ω_k

$$\begin{bmatrix} u_{su} \\ u_{ru} \\ u_{rv} \\ u_{sv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{su} + \frac{d}{dt} L_{su} & \frac{d}{dt} M & M\omega_k & L_{sv}\omega_k \\ \frac{d}{dt} M & r_{ru} + \frac{d}{dt} L_{ru} & L_{rv}(\omega_k - \omega_r) & M(\omega_k - \omega_r) \\ -M(\omega_k - \omega_r) & -L_{ru}(\omega_k - \omega_r) & r_{ru} + \frac{d}{dt} L_{ru} & \frac{d}{dt} M \\ -L_{su}\omega_k & -M\omega_k & \frac{d}{dt} M & r_{su} + \frac{d}{dt} L_{su} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{su} \\ i_{ru} \\ i_{rv} \\ i_{sv} \end{bmatrix}, \quad (2.55)$$

рівняння електромагнітного моменту :

$$M_e = pM(i_{sv} \cdot i_{ru} - i_{su} \cdot i_{rv}), \quad (2.56)$$

рівняння руху :

$$J \frac{d\omega_r}{dt} \pm M_c = M_3. \quad (2.57)$$

2.10. Розвиток концепції взаємозв'язку нерівноважної статистичної фізики та стохастичної термодинаміки в додатках до електромеханічних систем

Поведінка багатьох складних систем часто є результатом одночасного протікання електромагнітних, термомеханічних і хімічних процесів. Переробка в електромеханічному гідролізері сировини, що містить кератин, є типовим прикладом спряжених процесів, де хімічний процес відбувається з впливом магнітного поля, електромагнітних зусиль і температури та призводить до утворення нового продукту та локальному руйнуванню матриці десульфідних зв'язків. Тому поглиблене розуміння пов'язаних мультифізичних процесів приваблює значний дослідницький інтерес. Разом з тим більшість існуючих пояснень сутності зв'язку, які зараз доступні, обмежені частковим зв'язком або окремими конкретними процесами.

Сучасна статистична механіка базується на стохастичній теорії, де динамічна система описує стохастичний процес. Коли система наближена до рівноваги, її динаміка є простим коливанням поблизу рівноважного стану.

Для задач повного термохімічного зв'язку пропонується варіаційний принцип хімічної функції Гіббса, варіаційний принцип функції Гельмгольца та варіаційний принцип внутрішньої енергії, що базуються на незворотній термодинаміці. Процеси, що описують повний зв'язок, включаючи теплопровідність, масодифузію та хімічні реакції, взаємозв'язки між активними процесами описуються коефіцієнтами зв'язку (або коефіцієнтами Онсагера). Конвективний ефект також може бути природним чином виведений з варіаційних принципів у рівнях дифузії та енергії. Крім того, умови стрибка концентрацій та ентропії на рухомій межі розділення між продуктами хімічних реакцій та матрицею можуть бути природним чином виведені з варіаційних принципів.

Відповідно до 2-го закону термодинаміки, ентропія ізольованої системи ніколи не зменшиться. Відмінність біологічних систем полягає в тому, що живі клітини обмінюються енергією і матеріалами із зовнішньою середовищем, споживають необхідну енергію і життєві речовини для біохімічних реакцій і вибирають відходи і тепло з реакцій. З точки зору статистичної фізики, система підтримується в стані низької ентропії, щоб забезпечити собі життя, поглинаючи «негативну ентропію» з навколишнього середовища, щоб звести до нуля виробництво ентропії від її необхідної біологічної діяльності.

Отримано вираз різної рівноваги вільної енергії між двома конфігураціями системи, виражене в ансамблі кінцевих вимірювань роботи, виконаної при параметричному переключенні з однієї конфігурації в іншу. Показано, що різницю вільної енергії Гельмгольца між двома рівноважними конфігураціями системи можна отримати з ансамблю вимірювань роботи,

Парадигматичні системи - це окремі колоїдні електричні частинки в пастках, що залежать від часу, полімери у зовнішньому потоці, ферменти та молекулярні двигуни в аналізах окремих молекул, невеликі біомережі та термопристрої, що включають транспорт окремих електронів. Для таких систем енергетичний баланс, подібний до першого закону, можна ідентифікувати вздовж флуктуюючих траєкторій. Наслідки та застосування цих концепцій включають оптимальне переміщення між заданими станами за скінченний час, визначення ролі процесів зворотного зв'язку на основі вимірювання та зв'язку між дисипацією та незворотністю. Ефективність, і зокрема ефективність при максимальній потужності, можна систематично обговорювати між межами лінійного режиму впливу для двох класів молекулярних машин: ізотермічних, таких як молекулярні двигуни, та теплових двигунів, таких як термоелектричні пристрої, використовуючи загальну структуру, засновану на циклічному розкладі виробництва ентропії.

У рівноважній термодинаміці існує добре встановлений зв'язок між динамічними флуктуаціями фізичної системи та розсіюванням її енергії в навколишньому середовищі. Однак для опису фізичних систем, що знаходяться поза рівновагою, доступно небагато подібних кількісних інструментів. Запропоновано новий клас нерівностей, відомих як термодинамічні співвідношення невизначеності, які показали, що розсіювання обмежує поточні флуктуації в стійких станах, довільно далеких від рівноваги.

Для аналізу та оптимізації частотно-регульованого асинхронного електроприводу застосовано метод моделювання стаціонарних процесів на основі енергії. Це дозволяє визначити ступінь зв'язку між входом і виходом електромагнітної частини асинхронного двигуна, врахувати втрати в сталі і міді на різних частотах і напругах, а також просто визначити оптимальне з енергетичної точки зору значення ковзання двигуна за критерієм максимальної термодинамічної ефективності.

У деяких роботах пропонується підхід і розробляється відповідний метод застосування лінійної нерівноважної термодинаміки для аналізу енергетичних процесів, зокрема, на прикладі системи перетворення енергії вітру з безпосередньо підключеною вертикально-осевою вітровою турбіною та векторно-керованим синхронним генератором на постійних магнітах. Основними кроками запропонованого підходу є опис складових підсистем як універсальних лінійних або лінеаризованих перетворювачів енергії, які характеризуються декількома безрозмірними параметрами, основними з яких є ступінь зв'язку між входом і виходом. За їх значенням, а також обґрунтованим критерієм ефективності визначаються оптимальні робочі точки кожного перетворювача енергії. Наступним кроком є з'єднання отриманих перетворювачів енергії. Це відкриває можливість проаналізувати вплив вже реальних параметрів взаємозв'язаних каскадованих підсистем на якість їх з'єднань і обґрунтувати конкретні рішення, які не були б розглянуті без такого підходу.

Наразі в наявних дослідженнях практично відсутні дослідження сучасних технологічних систем, в яких проходять одночасно електромеханічні, теплові та хімічні процеси, що формують нові властивості переробленої сировини. Тому актуальною задачею є дослідження подібних систем і ми розглядаємо це далі на прикладі аналізу енергоефективності електромеханічного гідролізера.

2.11. Математичний опис моделей роботи системи гідротермічної обробки сировини в якості лінеаризованої системи перетворення енергії

Система гідротермальної обробки являє собою відкриту термодинамічну систему, яка може обмінюватися з навколишнім середовищем не тільки енергією, але і речовинами. Відбувається нерівноважний термодинамічний процес, при якому система не знаходиться в балансі з навколишньою середовищем. У стані термодинамічного балансу притоки речовин у відкриту систему і вихід речовин від неї збалансовані. В цьому стані хімічний потенціал кожного типу частинок у системі вирівняний. Найбільш важливими критеріями, які визначають, який із термодинамічних підходів слід враховувати в математическому моделюванні конкретної системи, є швидкість досліджуваного процесу та бажаний рівень координації теоретичних результатів з експериментом. Оскільки в структурі поліфункціонального пристрою – електромеханічного гідролізера – оптимізації підлягають, власне кажучи, одночасно чотири процеси перетворення енергії (електричної в механічну, електричної в теплову, механічної в теплову, теплової в енергію хімічного процесу), необхідний пошук нових методів, що розкривають взаємний вплив цих чотирьох процесів і формують зміст керуючих функцій. У хімічному процесі гідротермічного гідролізу сировини, що містить кератин, включаючи пір'я, вихідні молекули розкладаються з участю молекул води з вивільненням нових речовин. Не повинно залишатися без уваги питання супервентності між мікроскопічними компонентами хімічного процесу та макроскопічними властивостями системи електромеханічного гідролізера. Існує два типи енергії: перший пов'язаний з термодинамікою, коли енергія виділяється або поглинається, а реагенти перетворюються в продукти, а інший тип пов'язаний з кінетичною реакцією, коли рівень енергії, з якою реагують молекули, повинен перевищити енергетичний бар'єр для перетворення в продуктах .

У відповідності з першим законом термодинаміки сума тепла і роботи, якою система обмінюється із середовищем, є функцією стану. Хоча теплота не є самою собою функцією стану системи, але вона тісно пов'язана з функцією стану, званої ентропією S , зміна якої dS в рівноважному процесі визначає зміну співвідношення кількості тепла dS_T , підведеного до системи або відведеного від неї, до термодинамічної температури T системи. Величина S не є постійною, точніше $dS \geq 0$.

Виробництво ентропії та функція дисипації представляють собою суми добутоків потоків, тобто швидкостей процесів і «сил» F_i (різності вільної енергії або температури, які викликають ці потоки):

$$\sigma_S = \sum_{k=1}^n J_k F_k \quad (2.58)$$

В рамках термодинаміки нерівноважних процесів (ТДНП) будь-який перетворювач вільної енергії може бути представлений «чорним ящиком», який перетворює вільну енергію на вході у вихідну вільну енергію. Загальна енергетична схема системи гідротермічної переробки сировини показана на рис. 2.24.



Рис. 2.24. Загальна енергетична схема системи гідротермічної переробки сировини

Потоки J_1, J_2, J_3 являють собою відповідно швидкість надходження електричної енергії до обмотки статорів, до електричного нагрівача корпусу шнека і вхідну швидкість надходження сировини електромеханічного гідролізера (ЕМГ), потоки J_4, J_5, J_6 – відповідно швидкість виходу готового продукту, середню швидкість передачі теплової енергії з потоком готового продукту і середню швидкість розсіювання теплової енергії в навколишнє середовище. Сила $F_1 = U_{1\phi}$ - фазна напруга статорної обмотки ЕМГ, $F_2 = U_h$ - напруга, що подається на нагрівач, $F_3, F_4 = F_5$ - сила впливу ковзання ротора-шнека на потоки, $F_5 = F_{1\Delta T}$ - сила температурного впливу на потоки, що залежить від різниці температур масивного ротора, корпусу шнека і переробленого матеріалу, $F_6 = F_{2\Delta T}$ - сила температурного впливу на потоки, що залежить від різниці температур ΔT корпусу шнека і навколишнього середовища.

Кожен потік J_i є функцією не тільки своєї власної термодинамічної сили, але й інших сил системи F_i та додаткових динамічних факторів. До числа останніх можуть бути віднесені перенапруження в електричній мережі, зміни

продуктивності, різькі зміни навантаження та умови теплообміну ротора ЕМН. Загальне зображення для потоку J_i з урахуванням перехідних процесів являє собою ряд Тейлора в околицях точки рівноважного стану.

Для аналізу в першому зближенні ми розглядаємо електромеханічну частину системи гідротермічної переробки сировини, що включає процеси перетворення енергії в пристрої нагрівання корпусу шнека та енергії, що стосується термодинамічної та кінетичної хімічних реакцій перетворення сировини у продукцію. На рис. 2.25 представлена енергетична схема електромеханічної частини системи гідротермічної переробки сировини.

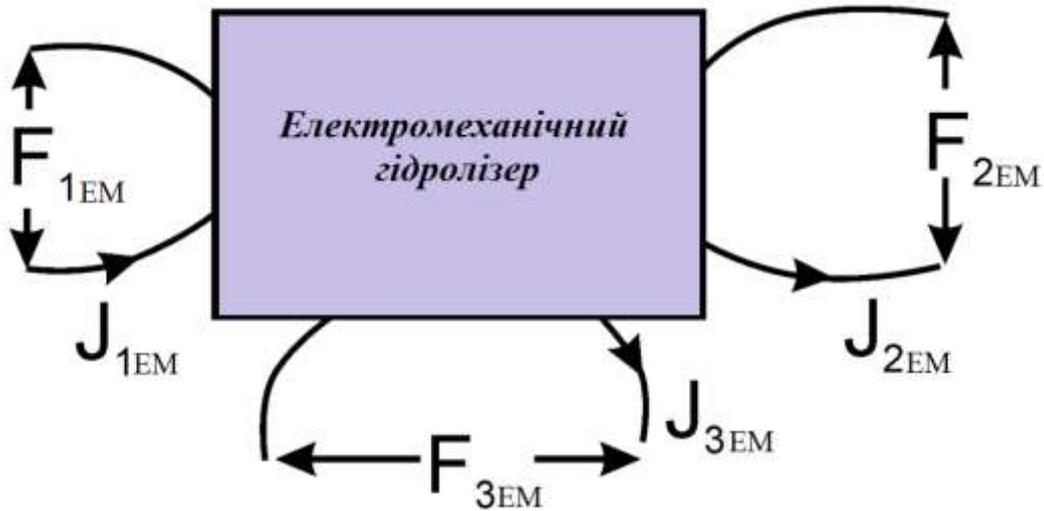


Рис. 2.25. Енергетична схема електромеханічної частини системи гідротермічної переробки сировини

Потоки J_{1EM} , J_{2EM} , J_{3EM} являють собою відповідно швидкість появи електричної, вихідної механічної та теплової енергії. Якщо розглядати електромеханічну частину системи ЕМГ в безпосередній близькості до стану рівноваги, то членами другого і більш високого порядків ряду Тейлора можна знехтувати. У цьому випадку рівняння потоків і функція виробництва ентропії можуть бути представлені наступними виразами:

$$J_i = N_{ii} F_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n N_{ik} \cdot F_k, \quad (2.59)$$

$$\sigma_S = \sum_{i=1}^n N_{ii} \cdot F_i^2 + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n N_{ik} \cdot F_i \cdot F_k, \quad (2.60)$$

де $N_{ik} = \left[\frac{\partial J_i}{\partial F_k} \right]_{F_i = \text{const}}$ - феноменологічні коефіцієнти, що вказують на ступінь термодинамічного спряження в системі сил.

Для умов, що розглядаються, приймаємо принцип Онзагера, згідно з яким $N_{ik} = N_{-ki}$, тобто у відповідності до стану рівноваги при відсутності зовнішнього магнітного поля і обертання системи в цілому лінійна залежність будь-якого потоку J_i від будь-якої сили F_k співпадає з аналогічною залежністю сили потоку F_k від F_i . Щоб виключити явища зриву термодинамічного сполучення, яке може наступити при одночасному збільшенні коефіцієнтів N_{ii} і $-N_{ik}$ вводиться так звана ступінь спряження ζ . Крім того, для універсального представлення результатів у рамках ТДНП введені нормовані величини: феноменологічна стехіометрія Z і відношення діючих сил χ . Для випадку дії у перетворювачі енергії двох сил і двох потоків зв'язок між ними може бути представлений таким чином:

$$\begin{cases} J_1 = N_{11}F_1 + N_{12}F_2 \\ J_2 = N_{21}F_1 + N_{22}F_2 \end{cases} \quad (2.61)$$

Відповідні нормовані величини для зазначених співвідношень такі: ступінь поєднання вихідного процесу з вхідним $\zeta = N_{12} / \sqrt{N_{11} \cdot N_{22}}$; феноменологічна стехіометрія $Z = \sqrt{N_{22} / N_{11}}$; співвідношення сил $\chi = F_2 / F_1$.

Для системи, зображеної на рис.2.25, вхідний потік J_{1EM} і сила F_{1EM} виходячи з фізичної суті процесів формують два паралельно діючі процеси: перетворення електричної енергії в механічну; перетворення електричної енергії на теплову. Систему, що складається з цих двох перетворень, можна описати наступним чином

$$\begin{bmatrix} J_{1EM} \\ J_{2EM} \\ J_{1EM} \\ J_{3EM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & 0 & 0 \\ N_{21} & N_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_{33} & N_{34} \\ 0 & 0 & N_{43} & N_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{1EM} \\ F_{2EM} \\ F_{1EM} \\ F_{3EM} \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

Таке уявлення перетворень енергії справедливе для стаціонарного режиму роботи звичайних асинхронних двигунів. Але функціональна та структурна побудова ЕМГ передбачає роботу одного з його модулів у режимі противключення, коли певна частка механічної енергії рухового модуля, що передається на загальний масивний ротор, перетворюється гальмівним модулем на теплову енергію. Тому для вивчення елементарних процесів, відповідальних за функціонування ЕМГ як системи, ми скористаємося принципами мозаїчної нерівноважної термодинаміки, яка передбачає відкриття «чорної скриньки». Відповідно до правила збереження симетрії система матиме онсангерівську симетричність, якщо матриці всіх незалежних («елементарних») процесів, з яких складається система, мають властивість симетрії Онзагера.

На рис. 2.26 представлена фізична модель шнекового ЕМГ, де електричні параметри сталі масивного ротора показані у вигляді еквівалентних обмоток $L_{a2} - L_{c2}, R_{a2} - R_{c2}$ для рухового модуля (ЕМ) і гальмівного модуля (ВМ). Загальний масивний ротор розділений по довжині на дві ділянки, відповідних зон електромагнітної дії статора ЕМ (зона 1), що працює в руховому режимі, і ВМ (зона 2), що працює в режимі електромагнітного гальмування (протиковлючення).

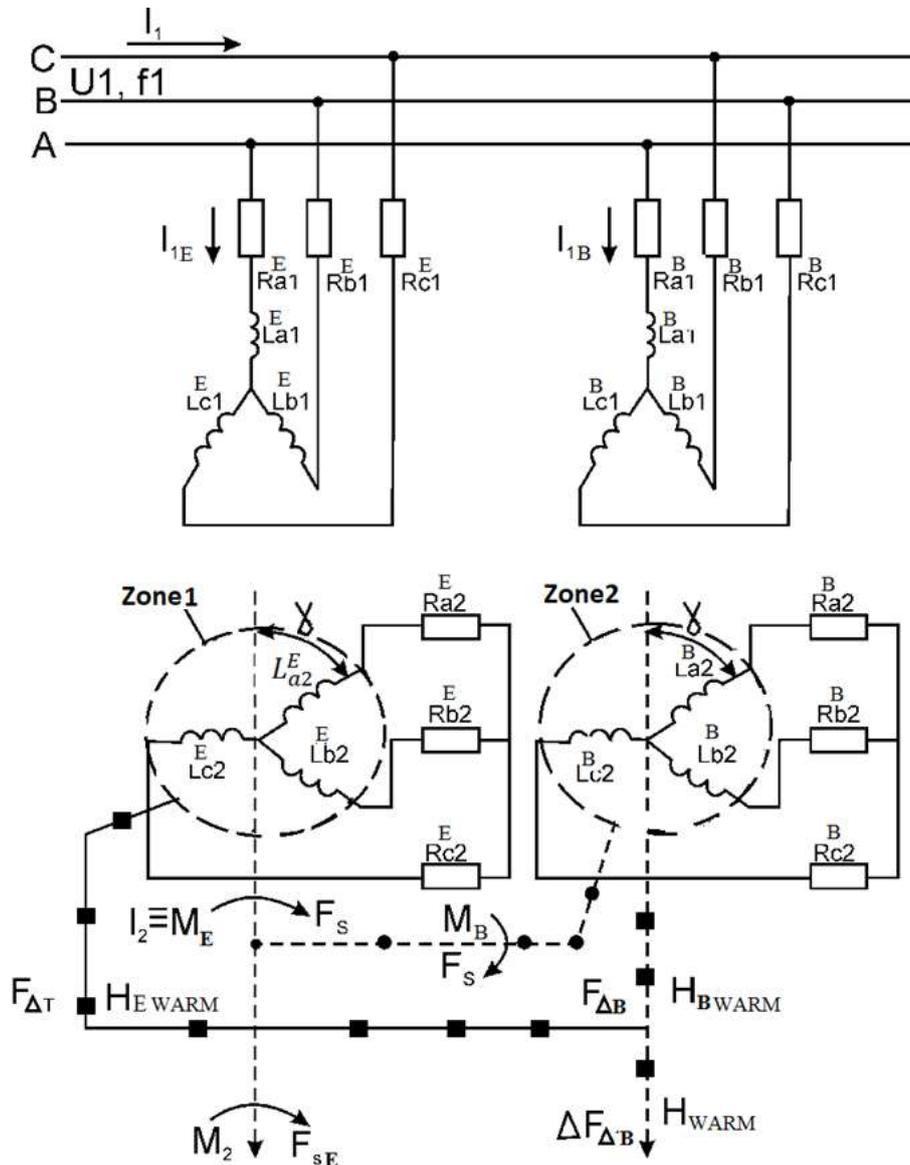


Рис.2.26. Фізична модель електромеханічної частини системи гідролізера

Потоки енергії, що діють, представлені наступним переліком:

$$J_{1E} = I_{1E} - \text{струм статора ЕМ};$$

$$J_{1B} = I_{1B} - \text{струм статора ВМ};$$

$J_{2E} = I'_{2E} \equiv M_E$ - струм головного кола Т-образної схеми заміщення ЕМ, пропорційний електромагнітному моменту;

$J_{2B}^B = M_B \cdot \omega_p$ - складова повної механічної потужності ЕМ, яка передається механічним шляхом ВМ;

$J_2 = M_2 \cdot \omega_p$ - навантаження ЕМГ . В сталому режимі $M_2 = M_E - M_B$. Для спрощення картини розподілу потоків енергії момент холостого ходу ЕМГ врахований у складовій M_B ;

$J_3 = H_{warm}$ - тепловий потік ротора ЕМГ, пропорційний вторинному струму.

Розподіл термодинамічних сил можна представити наступним чином:

$F_1 = U_{1ph}$ - фазна напруга статорної обмотки;

$F_2 = F_S$ - сила впливу ковзання на потоки моделей ЕМГ ;

$F_3 = F_{\Delta T}$ - сила температурного впливу на потоки модулів ЕМГ, що залежить від різниці температур ΔT масивного ротора і матеріалу, що переробляється.

Математична модель ЕМ ЕМГ у загальному вигляді представлена системою феноменологічних рівнянь:

$$\begin{bmatrix} I_{1E} \\ I_{2E} \\ I_{1E} \\ I_{2E} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{11}^E & N_{12}^E & 0 & 0 \\ N_{21}^E & N_{22}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_{33}^E & N_{34}^E \\ 0 & 0 & N_{43}^E & N_{44}^E \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{1\phi} \\ F_s \\ U_{1\phi} \\ F_{\Delta T} \end{bmatrix}, \quad (2.63)$$

где $N_{11}^E, N_{12}^E, N_{21}^E, N_{22}^E$ - феноменологічні коефіцієнти процесу перетворення електричної енергії на механічну для ЕМ; $N_{33}^E, N_{34}^E, N_{43}^E, N_{44}^E$ - феноменологічні коефіцієнти процесу перетворення електричної енергії на теплову.

Дисипативна функція зазначених перетворень енергії в ЕМ має вигляд

$$\Phi_{dE} = I_{1\phi} U_{1\phi} + I_2 F_s + I_2 F_{\Delta T}. \quad (2.64)$$

Далі у феноменологічних рівняннях використовуємо саме відносні значення електричних величин.

2.12. Схема заміщення та феноменологічні рівняння перетворення енергії модулів електромеханічного гідролізера

В зонах досить сильного поверхневого ефекту, тобто. у діапазоні великих ковзань, різниця між вторинними параметрами, одержуваними з хвильової і традиційної схем заміщення, несуттєва.

Важливим етапом є розрахунок приведених параметрів ротора. Для масивного феромагнітного ротора з питомим опором ρ_2 і магнітною проникністю μ_2 , беремо такі дані обмотки: кількість фаз $m_2 = 2p$; кількість котушок у фазі $w_2 =$

0,5; коефіцієнт обмотки $k_{w2} = 0,95$. Тоді осьова складова густини вихрових струмів на ділянці ротора для окремого модуля визначається за формулою:

$$j = \frac{2I_2' m_1 W_1 k_{w1}}{\tau \cdot p} \sqrt{\frac{\mu_2 \cdot \omega}{2\rho_2}}. \quad (2.65)$$

Питома поверхнева потужність в області ротора

$$p_0 = \int_0^\infty j^2 \rho dy = \frac{j^2 \cdot \rho}{4} \sqrt{\frac{2\rho_2}{\mu_2 \cdot \omega}}, \quad (2.66)$$

де y – координата вглиб роторного масиву.

Прирівнюючи джоулеве тепловиділення у всій модульній секції ротора до виразу $m_1(I_2')^2 R_2'$, отримуємо потрібне значення приведенного активного, а потім і реактивного вторинного опору

$$R_2' = a_r k_\beta \frac{2(w_1 k_{w1})^2}{p} \sqrt{\frac{\mu_0 \omega_1 \rho_2}{2}} \cdot \sqrt{\mu' s} \quad (2.67)$$

$$X_2' = \frac{a_x}{a_r} R_2' \quad (2.68)$$

З формул (2.67) і (2.68) випливає, що вторинні параметри залежать від значення $\sqrt{\mu s}$. Оскільки відносна проникність ротора μ залежить від напруженості магнітного поля на поверхні ротора, яка, у свою чергу, залежить від вторинного струму I_2' , параметри ротора є функцією струму. Використовуючи вже відоме значення вторинного струму, встановлюємо значення відносної магнітної проникності з відомих залежностей $\mu = f(H)$ для області сильних магнітних полів.

При живленні одного з модулів від перетворювача частоти необхідно використовувати абсолютне ковзання ротора $\gamma = a_f s$ в формулах (2.67), (2.68), де $a_f = f/f_1$ – відносна частота напруги живлення. На рис. 2.27 представлена схема заміщення однієї из модифікацій ЕМГ.

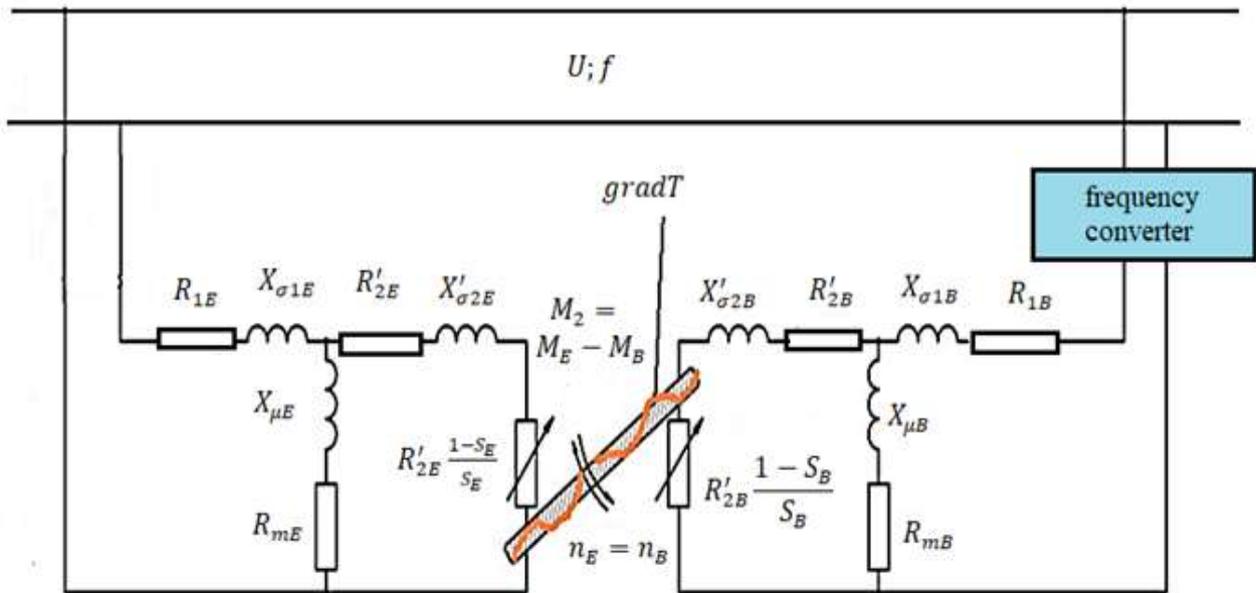


Рис.2.27. Схема заміщення двостаторної модифікації ЕМГ

Результати моделювання та експериментальних випробувань дослідних зразків ЕМГ, а також інших типів асинхронних машин з масивним ротором вказують на характерну особливість, що полягає в тому, що в робочому діапазоні ковзань $0,8 < s_p < 1$ значення первинного та вторинного струмів змінюється незначно. Ця обставина дозволяє прийняти у першому наближенні поточне значення вторинного струму $I_{2E} = K_{ni}$, де K_{ni} – кратність пускового струму ЕМГ.

Враховуючи властивість нерозривності процесів перетворення енергії в два інших види, взаємний вплив сил механічного і теплового впливу, обов'язкова наявність у складі цільової функції компонент теплової та механічної енергії, а також та обставина, що вхідні та вихідні потоки в системі (2.63) характеризуються одними і тими ж первинним і вторинним струмами, доцільно, подати перетворення енергії однією системою феноменологічних рівнянь:

$$\dot{I}_{1E} = \frac{1}{(1 + \sigma_1) \dot{Z}_m} \cdot \dot{U}_{1\phi} - \frac{\sqrt{K_{ni}}}{(1 + j \frac{a_x}{a_R}) R'_2(1)} \cdot \dot{E}'_2 \sqrt{\frac{s_E}{1 + \alpha_R \Delta T}} \quad (2.69)$$

$$-\dot{I}'_{2E} = -\frac{\sqrt{K_{ni}}}{(1 + j \frac{a_x}{a_R}) R'_2(1)} \dot{U}_{1\phi} + \left(\frac{1}{\dot{Z}_m} + \frac{(1 + \sigma_1) \cdot \dot{Z}_1 \cdot \sqrt{K_{ni}}}{(1 + j \frac{a_x}{a_R}) R'_2(1) \cdot \left[\dot{Z}_1 + \left(1 + j \frac{a_x}{a_R} \right) \cdot R'_2(1) \right]} \right) \times$$

$$\times \dot{E}'_2 \sqrt{\frac{s_E}{1 + \alpha_R \Delta T}} \quad (2.70)$$

де \dot{E}'_2 – ЕРС нерухомого ротора; α_R - позитивний температурний коефіцієнт активного опору масивного ротора. Для ротора із Ст. 3 $-\alpha_R = 0,006$; $\sigma_1 = \frac{x_1}{x_m}$ - коефіцієнт розсіювання обмотки статора ЕМГ; s_E – поточне ковзання ЕМГ; величини: $R'_2(1)$ – наведений активний опір ротора при ковзанні $s = 1$, $I_2 = I_{1H} = 1$ взяті з досвіду короткого замикання при номінальному струмі статора.

Представлена система рівнянь справедлива для діапазону великих ковзань. В області малих ковзань, коли глибина проникнення поля перевищує радіальні розміри ротора, $\lim_{s \rightarrow 0} I'_2 = I_{\mu,r}$, де $I_{\mu,r}$ - складова струму холостого ходу, яка йде на створення магніторушійної сили ротора. Величина $\dot{E}'_2 \sqrt{s_D / (1 + \alpha_R \Delta T)}$ - сила теплового та механічного впливу на потоки I_{1E} та $I'_2 \equiv M_E$, $I'_2 \equiv H_r$.

Феноменологічні рівняння перетворення енергії у ВМ складаються з тією лише різницею, що ковзання в режимі противмикання дорівнює $(2 - s_E)$.

Закон регулювання теплової та механічної потужності ЕМГ, який визначається технологічним режимом переробки кератинової сировини, може формуватися на основі аналізу феноменологічних рівнянь та нормованих величин ξ, Z, χ . Надалі відзначатимемо індексами «і» та «о» величини відповідно на вході та виході ЕМГ.

Почнемо із аналізу феноменологічних коефіцієнтів. Чим більш негативне значення $N_{io} = N_{oi}$ в порівнянні зі значеннями інших коефіцієнтів, тим вищий ступінь впливу сили на вході F_i , що викликає потік на виході. Разом з тим при більш негативних значеннях N_{io} збільшується ступінь інгібування (приглушення) вхідного потоку силою на виході F_o . Це говорить про те, що коефіцієнт N_{io} у будь-якому з рівнянь пов'язаний зі ступенем сполучення один з одним вхідного та вихідного процесів. Але збільшення N_{io} не завжди відповідає сильному поєднанню. При одночасному зростанні однаковою мірою всіх коефіцієнтів (N_{ii} , N_{oo} и $-N_{io}$) - вхідний і вихідний потоки зростають у тій самій мірі. При цьому вже не можна говорити про зміну поєднання між двома потоками. Як зазначалося раніше, щоб уникнути такого явища, так звана ступінь термодинамічного сполучення ξ визначається як коефіцієнт N_{io} , нормований на коефіцієнти N_{ii} та N_{oo} : $\xi = N_{io} / \sqrt{N_{ii} \cdot N_{oo}} \leq 1$.

Термін «термодинамічне сполучення» означає, що існує фізичний процес, що сполучає два процеси, які в іншому випадку не могли б бути поєднані один з одним. У нашому випадку таким процесом є односпрямований електромагнітний процес.

Очевидно, що кожен потік викликається своєю сполученою силою. Але можливість термодинамічного сполучення означає, що на даний потік може також впливати будь-яка з сил, що є в системі. Феноменологічна стехіометрія $Z = \sqrt{N_{oo} / N_{ii}}$ змінюється разом із способом та ступенем сполучення.

Для кожної із систем рівнянь необхідно провести нормування потоків на вхідний потік при нульовій вихідній силі. При введених позначеннях сил, потоків та феноменологічних коефіцієнтів зазначену систему можна представити у вигляді:

$$\frac{J_i}{N_{ii} \cdot F_i} = \xi \cdot Z\chi + 1 \quad (2.71)$$

$$\frac{J_o}{Z \cdot N_{ii} \cdot F_i} = Z\chi + 1 \quad (2.72)$$

Далі визначаємо нормоване відношення вихідного потоку до вхідного

$$j = \frac{J_o}{J_i} = Z \frac{Z\chi + 1}{\xi \cdot (Z\chi) + 1} \quad (2.73)$$

Як очевидно з останнього висловлювання, при $\xi = 1$ вихідний потік відрізняється від вхідного завжди на постійне число разів, рівне Z , тобто. обидва потоки жорстко пов'язані. При $\xi = 0$ вихідний потік викликається власною силою F_o , тече мимовільно і спрямований у бік зменшення F_o . Це той випадок, коли вихідний потік взагалі не пов'язаний із вхідним потоком, наприклад, вирівнювання температур ротора та матеріалу, що переробляється, або зниження швидкості та зупинка ротора при відключенні ЕМГ від мережі. При значеннях ξ , що знаходяться між -1 і 0 , вихідний потік підтримується вхідним потоком, але відношення двох потоків змінюється разом із зміною відношення сил $\left(\chi = \frac{\dot{E}'_2 \sqrt{S_E} / 1 + \alpha_R \Delta T}{U_{1ph}} \right)$. При цьому вхідний та вихідний процеси лише частково пов'язані.

На рис.2.28 представлені універсальні залежності нормованого вихідного потоку та відношення потоків від нормованого відношення сил при різних ступенях сполучення, які застосовні для будь-якого перетворювача енергії. При високих значеннях відношення сил, навіть за значеннях близьких до одиниці, відношення потоків може бути досить низьким. У табл.2.3 представлені нормовані співвідношення потоків та сил для систем феноменологічних рівнянь ЕМ та ВМ.

У перетворенні «1» при зниженні фазної напруги U_{1ph} і збільшення ковзання S_E співвідношення сил зростає. При цьому співвідношення потоків і вихідний потік зменшуються, так як збільшення ковзання «затримує» зниження первинного струму за рахунок відносного зростання складової, що намагнічує.

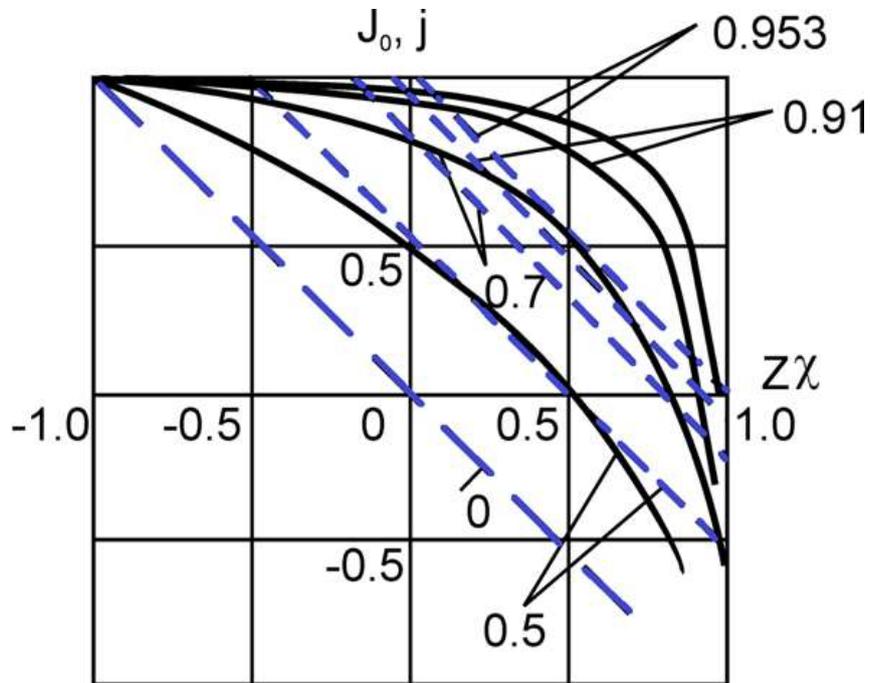


Рис.2.28. Залежність нормованих вихідного потоку та співвідношення потоків від нормованого відношення сил при різних ступенях сполучення

Таблиця 2.3. Зв'язок між потоками та силами для систем феноменологічних рівнянь модулів ЕМГ

Тип перетворення	Модуль ЕМГ	Співвідношення потоків	Співвідношення сил
1.Електрична енергія → механічна енергія + тепла енергія	ЕМ	$Z \cdot \frac{\dot{I}'_{2E}}{\dot{I}_{1E}}$	$Z \cdot \frac{\dot{E}'_2 \sqrt{S_E} / (1 + \alpha_R \Delta T)}{U_{1ph}}$

$\frac{2. \text{ (Електрична + механічна) енергія}}{\downarrow}$ Теплова енергія	ВМ	$Z \cdot \frac{\dot{I}'_{2B}}{\dot{I}_{1B}}$	$Z \cdot \frac{\dot{E}'_2}{U_{1ph}} \sqrt{\frac{2 - s_E}{1 + \alpha_R \Delta T}}$
--	----	--	---

При прагненні різниці температур ΔT між ротором-шнеком ЕМГ і матеріалом (охолоджувальне середовище) до нуля, що відповідає або холодному стану системи ЕМГ - матеріал, або вирівнюванню температур ротора і матеріалу в гарячому стані, співвідношення сил збільшується, а співвідношення потоків зменшується. При запуску ЕМГ у холодному стані ($\Delta T = 0$) співвідношення потоків деякий час зменшується через випереджальне зниження вторинного струму.

У фазі «гарячого» стану зменшення співвідношення потоків пов'язане з погіршенням теплообміну ротора з навколишнім середовищем, його посиленням перегрівом, і, як наслідок, випереджаючим зниженням вторинного струму. При цьому досягти рівноважного "гарячого" стану $\Delta T = 0$ при переміщенні (оновленні) матеріалу, що знаходиться в контакті з ротором, практично не вдається. Найімовірнішим є «гарячий» стан з $\Delta T = 0$ за тривалої стоянки (заштибуванні) ротора-шнека.

Відсутність матеріалу в шнековому ЕМГ означає зниження механічного навантаження на масивний ротор і, як наслідок, зниження ковзання s_E . Умови теплообміну змінилися, і ми спостерігатимемо постійне зниження ΔT . Але в початковий момент співвідношення сил і потоків у перетвореннях «1» і «2» ведуть себе по-різному: зростає співвідношення сил і знижується співвідношення потоків ВМ; знижується співвідношення сил і підвищується співвідношення потоків ЕМ. Частка механічної потужності, що передається ВМ від ЕМ, залишається приблизно на попередньому рівні, а гальмівний електромагнітний момент ВМ, що зріс, був компенсований за рахунок збільшення споживаного з мережі струму статорної обмотки ВМ. Зменшення ковзання ЕМ викликає деяке зниження намагнічувальної складової первинного струму ЕМ поряд із загальним зниженням I_{IE} та I'_{2E} . Зменшення веде до зниження активного опору масивного ротора і, отже, деякого збільшення струмів ВМ і ЕМ. Однак співвідношення сил і потоків у ЕМ суттєво не зміниться, оскільки зростання викликає додаткове збільшення електромагнітного моменту та зниження ковзання s_E . У ВМ відбувається деяке збільшення співвідношення сил і відповідне зниження співвідношення потоків, при цьому величина споживаного струму з мережі I_{1B} збільшується. Зміна рівнів напруг живлення ЕМ і ВМ викликає відповідні зміни співвідношення сил і потоків.

Струм ротора I_2 не повністю відображає потік вихідної енергії, оскільки не враховує частину теплової енергії, що виділяється в статорі у вигляді джоулевих

втрат у міді обмотки та сталі пакета, а також механічних втрат у підшипникових вузлах. Більш правильним, очевидно, було призначення в якості вихідного потоку енергії деякої інтегруючої величини, що враховує як потік теплової енергії від активних і механічних частин, так і корисну механічну потужність. Однак це надзвичайно ускладнило б побудову феноменологічних рівнянь. Разом з тим, результати випробувань ЕМГ і теоретичні розрахунки показують, частка корисної активної енергії, що пов'язана з ротором, становить понад 84%, тобто практично вся електромагнітна потужність перетворюється на корисну потужність. Крім того, сформована структура інтеграції теплової енергії передбачає каналізацію теплової енергії статора в зону матеріалу, що переробляється, транзитом через ротор. Таким чином, величина ΔT у феноменологічних рівняннях (2.69), (2.70) формується з урахуванням теплового потоку статора, а струм ротора, як величина, що відображає вихідний потік ЕМ ЕМГ, також отримує посилення за ступенем сполучення. В результаті підсумкова міра сполучення в ЕМ ЕМН може досягати величини $\xi=0,98$. Ще більше ускладнюється структура феноменологічних рівнянь для ВМ, оскільки частина механічної потужності на «вал» ВМ делегує ЕМ і вона, природно, не враховується у вхідному потоці I_{IB} . Тому ступінь сполучення у процесах перетворення енергії для ВМ дещо нижчий і може становити 0,8-0,9 одиниць.

Оцінка ефективності перетворення енергії у електромеханічному гідролізері. Раніше ми вказували на відмінності в оцінках ефективності перетворення енергії в ЕМГ від традиційних електромеханічних перетворювачів (електричних машин), що полягають у тому, що всі види теплових виділень в ЕМГ віднесені до корисної потужності, що гріє. В рамках ТДНП ефективність перетворення енергії в ЕМГ може оцінюватися термодинамічної ефективністю функціонування, яка визначається як відношення швидкості, з якою ЕМГ виробляє вихідну вільну енергію до швидкості, з якою він споживає вільну вхідну енергію:

$$\eta_{td} = -\frac{(J_2 \cdot F_2 + J_3 \cdot F_3)}{J_1 \cdot F_1} = j \cdot \chi = (Z \chi) \frac{(Z \cdot \chi) + \xi}{\xi(Z \cdot \chi) + 1} \quad (2.74)$$

Взявши похідну $d\eta_{td} / d(Z \cdot \chi)$ при постійному ξ та прирівнявши її до нуля, можна знайти оптимальне співвідношення сил для відповідного ступеня сполучення:

$$\chi_{opt.\eta} = -\frac{\xi}{Z(1 + \sqrt{1 - \xi^2})} \quad (2.75)$$

Проте доцільність запропонованої оцінки ефективності для ЕМН не завжди очевидна. Наприклад, якщо прийняти поєднання у системі повним, тобто $\xi = -1$, то максимальна ефективність відповідає відношенню вихідних та вхідних сил

χ_1 рівному $1/Z$. Але при такому високому відношенні сил абсолютна величина потоку на виході падає до нуля (див. рис.2.28): процес термодинамічно ефективний, але марний, оскільки його швидкість мінімальна. Таким чином, щоб перетворення йшло із помітною швидкістю, необхідно частково знизити термодинамічну ефективність.

Можлива ще одна оцінка ефективності перетворення енергії з урахуванням компромісу у відносинах між швидкістю процесу та її термодинамічної ефективністю, а саме, стан максимальної вихідної потужності. ЕМГ оптимізується щодо $-(J_2 \cdot F_2 + J_3 \cdot F_3)$, тобто по відношенню до швидкості утворення вільної енергії на виході

$$-\frac{(J_2 \cdot F_2 + J_3 \cdot F_3)}{N_{ii} \cdot F_i^2} = -(Z\chi + \xi) \cdot (Z\chi) \quad (2.76)$$

На рис.2.29 представлені термодинамічна ефективність та нормована вихідна потужність залежно від нормованого відношення сил при різних ξ . Штрихпунктирною лінією з'єднані максимуми кривих. З рис.2.29 випливає, що стан оптимальної ефективності не збігається зі станами з максимальною вихідною потужністю для однакових ступенів сполучення, що знаходяться вище значення $\xi = 0,5$. Для кожного ступеня сполучення ефективність максимальна при вищому відношенні сил ніж вихідна потужність. Примітна ще одна точка: в стані, близькому до повного сполучення, максимальна вихідна потужність настає при співвідношенні сил $Z \cdot \chi = 0,5$, а ефективність процесу дорівнює 50%.

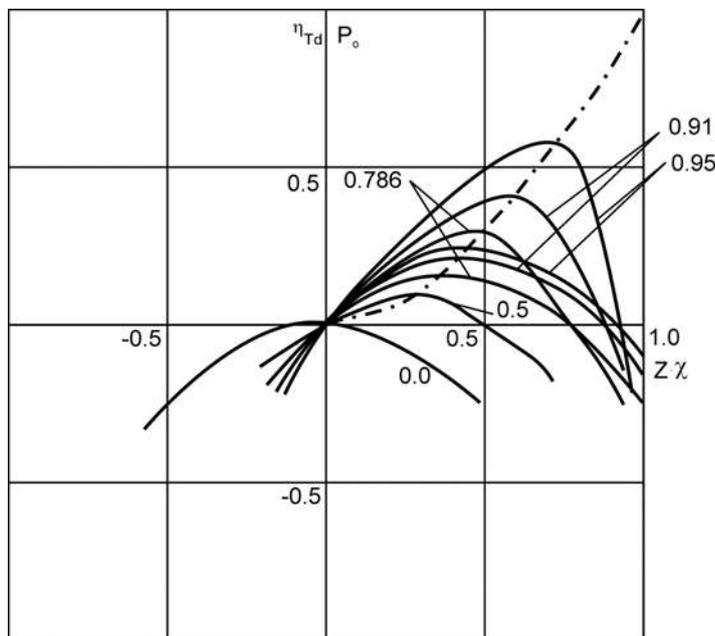


Рис.2.29. Термодинамічна ефективність та нормована вихідна потужність як функція від нормованого відношення сил при різних ступенях сполучення

Відповідно до (2.74) термодинамічна ефективність ЕМГ визначається як відношення швидкостей вироблення та споживання вільної енергії. Тому енергетичний процес необхідно розглядати на основі векторного уявлення споживаної повної потужності S та її ортогональних складових P , Q , N . Вихідною є лише активна потужність. Потужність спотворення N , обумовлена наявністю вищих гармонік струму, визначається як потужність нев'язки між повною потужністю S та її активною P та реактивною складовими Q . Просторову модель досліджуваних квазістаціонарних енергетичних процесів можна представити у вигляді наступних відомих співвідношень:

$$P = S \cdot \gamma = S \cdot v \cos \varphi$$

$$Q = S \sqrt{v^2 - \gamma^2} = S v \sin \varphi$$

$$N = S \sqrt{1 - v^2}$$

$$N^2 = S^2 - P^2 - Q^2$$

де γ , $\cos \varphi$, $\sin \varphi$ - енергетичні параметри перетворень;

v - коефіцієнт спотворення кривої первинного струму;

φ - кут зсуву між векторами напруги мережі живлення і споживаним струмом.

Потужність, яка пов'язана з несиметрією пропорційна змінним складовим подвійній частоти, але додаткові джоулеві виділення енергії від несинусоїдності струмів приблизно втричі більше втрат, які викликаються несиметрією.

Очевидно, що термодинамічна ефективність не є еквівалентом коефіцієнта корисної дії, визначеного як співвідношення корисної та споживаної активних потужностей. При прагненні потужності спотворення N до нуля, термодинамічна ефективність прийматиме значення, близькі до енергетичного критерію:

$$\lim_{N \rightarrow 0} \eta_{td} = K_{EN} = \eta_{EN} \cdot \eta_{heat} \cdot \cos \varphi \quad (2.77)$$

де η_{EN} , η_{heat} - відповідно електричний і тепловий коефіцієнти корисної дії.

Електричний коефіцієнт корисної дії оцінюється як співвідношення корисної та споживаної активних потужностей, причому до корисної потужності віднесено такі складові:

$P_{cop1} = m_1 I_1^2 r_1$ - теплова потужність джоулевих виділень у статорній обмотці;

$P_{cop2} = m_1 I_2'^2 \cdot r_2'$ - теплова потужність джоулевих виділень у масивному роторі, що дисипує в тепло;

$P_{st} = m_1 E_1 \cdot I_o \cos \phi_o$ - теплова потужність від вихрових струмів та перемагнічування в сталі пакета статора;

P_{2mech} - корисна механічна потужність ротора, що витрачається на транспортування та перемішування матеріалу;

P_{mech} , P_{add} – теплова потужність від тертя у механічних вузлах та додаткових тепловиділень в елементах конструкції ЕМГ.

Тепловий коефіцієнт корисної дії ЕМГ можна визначити за такою формулою:

$$\eta_T = \frac{P_{heat.prod}}{P_{total\ heat}} \quad (2.78)$$

де $P_{heat.prod}$ – теплова потужність, передана продукту, що нагрівається;

$P_{total\ heat}$ – сумарна гріюча потужність ($P_{total\ heat} = P_{cop1} + P_{cop2} + P_{st} + P_{mech} + P_{add}$).

Теплову потужність можна формалізувати наступним співвідношенням

$P_{heat.prod}$:

$$P_{heat.prod} = \sum_{k=1}^{k=n} \alpha_k S_{hex,k} \cdot \Delta T_k \quad (2.79)$$

де α_k - коефіцієнт теплообміну на k -й поверхні теплознімання $S_{TO,k}$;

ΔT_k - різниця температур між k -й поверхнею і продуктом.

Втрати в сталі ротора окремо не виділяються, оскільки втрати в масивному роторі в комплексі становлять і втрати в «міді» і втрати в «сталі». Споживана ЕМГ з мережі реактивна потужність представлена таким співвідношенням:

$$Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sin \varphi_1 \quad (2.80)$$

Баланс реактивної потужності ЕМГ формується такими складовими:

$$Q_1 = Q_{\sigma 1} + Q_M + Q_{\sigma 2} \quad (2.81)$$

де $Q_{\sigma 1} = m_1 I_1^2 X_1$ - реактивна потужність, що витрачається на створення магнітного поля розсіяння обмотки статора;

$Q_M = m_1 E_1 I_0 \sin \psi_0$ - потужність, що витрачається на створення магнітного потоку в магнітопроводі ЕМГ;

$Q_{\sigma 2} = m_1 I_2^2 X_2'$ - реактивна потужність магнітного поля розсіяння масивного ротора.

Активні і індуктивні опори статора і ротора визначаються в межах відповідних активних зон ЕМГ. Необхідно відзначити, що представлені у виразі (2.77) втрати активної потужності в статорі, механічних вузлах і додаткові

втрати, є умовними «втратами», оскільки вони дисипують в тепло і, зрештою, також беруть участь у формуванні гріючої потужності ЕМГ.

Залежно від технологічних завдань, що розв'язуються, ЕМГ не завжди повинен характеризуватись максимальною термодинамічною ефективністю або максимальною вихідною потужністю. Для ряду випадків важливішою може бути робота в режимі максимального вихідного потоку та ін. Однак, для ЕМГ термодинамічна ефективність завжди буде однією з функцій, до якої оптимізують перетворювач енергії.

Підхід лінійної нерівноважної термодинаміки до опису таких об'єктів як ЕМГ є перспективним для аналізу енергетичних процесів та підвищення ефективності систем. Подальше застосування опису систем, подібних до ЕМГ за допомогою системи безрозмірних параметрів і характеристик дозволяє отримати ступені зв'язку між входом і виходом цих пристроїв, вибрати параметри їх оптимальних робочих точок на основі певних критеріїв (відповідних максимальної вихідної потужності і максимальному ККД) і оцінити показники їх ефективності.

Використання цього методу може поширюватися на варіант аналізу енергетичних параметрів, коли в одному з модулів ЕМГ використовується частотно-регульована подача електричної енергії.

ВИСНОВОК

1. До основних законів та принципів електромеханічного перетворення енергії слід віднести:

– закон електромагнітної індукції Майкла Фарадея;

– закон сили Ампера;

– закон сили Лоренца;

– перший принцип електромеханіки: в електромеханічних перетворювачах (ЕМП) енергія одного виду (електрична енергія, що надходить від зовнішнього електричного кола з відповідним джерелом електроживлення) перетворюється в енергію двох (рідше трьох чи більше) видів;

– другий принцип електромеханіки відображає зворотний характер процесів, що відбуваються в електромеханічному перетворювачі. За умови, що до ЕМП підводиться електрична енергія з електромережі, він працюватиме в режимі актюатора (двигуна), якщо ж до ЕМП підводиться механічна енергія – встановлюється режим сенсора (генератора, генерації електричної енергії).

– третій принцип електромеханіки характеризує просторову взаємодію магнітних полів, якими супроводжується процес перетворення енергії в ЕМП. Нерухомі відносно одне одного магнітні поля створюють в структурі електромеханічного перетворювача результуюче поле та електромагнітний момент, а поля, які переміщуються в повітряному зазорі (який обов'язково присутній в ЕМП всіх видів), створюють потік теплової енергії, що приводить до втрат та зменшенню ККД.

2. Аналіз функціональної та технічної еволюції ЕМП показує велику різноманітність електричних машин та електромеханічних пристроїв, робота яких безпосередньо пов'язана зі змінами структури та геометрії їх активної зони в просторі та часі. У концепції структурно-системного підходу ці електромеханічні об'єкти (ЕМ-об'єкти) та пристрої належать до класу генетично організованих систем, структурна різноманітність яких визначається відповідними генетичними програмами, а їх розвиток регулюється системними законами генетичної еволюції.

3. Поведінка багатьох складних систем часто є результатом одночасного протікання електромагнітних, термомеханічних і хімічних процесів. В рамках термодинаміки нерівноважних процесів (ТДНП) будь-який перетворювач вільної енергії може бути представлений «чорним ящиком», який перетворює вільну енергію на вході у вихідну вільну енергію. Залежно від технологічних завдань, що розв'язуються, електромеханічні перетворювачі технологічного призначення не завжди повинні характеризуватись максимальною термодинамічною ефективністю або максимальною вихідною потужністю. Для ряду випадків важливішою може бути робота в режимі максимального вихідного потоку та ін.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Математичне моделювання електромагнітних пристроїв та електромеханічних перетворювачів енергії : навч. посіб. / А.В. Жильцов, Г.О. Мірських. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 400 с.

2. Шинкаренко В. Основи теорії еволюції електромеханічних систем, К.: Наукова думка, 2002, 288с/

3. Shynkarenko V., Makki A., Kotliarova V., Shymanska A., Krasovskyi P. Genetic Organization and Evolution of Electromechanical Objects with Adaptive Geometry of Active Zone: Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J. 5(2020), 512-525 doi:10.25046/aj050564

4. Bolyukh, V. F. (2021). Excitation of a pulse electromechanical converter of electrodynamic type from a two-section capacitor energy storage. Technical Electrodynamics/Tekhnichna Elektrodynamika, (3).

<https://doi.org/10.15407/techned2021.02.058>

5. Induction Motor Design by Use of Genetic Optimization Algorithms / N. Zablodskij, V. Pliugin, J. Lettl, K. Buhr, S. Khomitskiy // Transactions on electrical engineering. – Prague. – 2013. – N. 3. – P. 65–69.

6. Геометричні основи об'єктно-орієнтованого проектування електромеханічних перетворювачів енергії [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.01 / Плюгін Владислав Євгенович ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". - Харків, 2015. - 36 с.

7. Zablodskiy, M. M., Kovalchuk, S. I., Pliuhin, V. E., & Tietieriev, V. O. (2022). Indirect field-oriented control of twin-screw electromechanical hydrolyzer. Electrical

Engineering & Electromechanics, (1(eng)), 3-11. Doi.org/10.20998/2074-272X.2022.1.01.

8. Kaplun, V., Makarevych, S., Chuienko, R. Modified compensated asynchronous machine for increasing energy efficiency of autonomous alternator in low-power supply system. *Przeglad Elektrotechniczny* 2023(10), pp. 178–181. <https://doi:10.15199/48.2023.10.34>

9. Zhang, D., & Ouyang, Q. (2021). Nonequilibrium thermodynamics in biochemical systems and its application. *Entropy*, 23(3), 271. <https://doi.org/10.3390/e23030271>.

10. Shchur, I., Lis, M., & Biletskyi, Y. (2023). A non-equilibrium thermodynamic approach for analysis of power conversion efficiency in the wind energy system. *Energies*, 16(13), 5234. ; <https://doi.org/10.3390/en16135234>.

11. Parameters of induction machines with a common external massive rotor. Zablodskiy, M., Kozyrskiy, V., Gritsyuk, V. Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2017, 2017, 2018-January, pp. 108–111.

ПИТАННЯ ДЛЯ ОБГОВОРЕННЯ ТА САМОПЕРЕВІРКИ

1. *Надайте загальну характеристику існуючим моделям конструктивного виконання електромеханічних перетворювачів.*

2. *Сформулюйте основні припущення, спрямовані на побудови прийнятної моделі електромеханічного перетворювача.*

3. *Як визначається напруженість магнітного поля, яке утворюється найпростішою обмоткою у вигляді котушки?*

4. *Що являє собою обмоткова функція обмотки?*

5. *Що таке електричні кути та як вони пов'язані з геометричними кутами?*

6. *Поясніть фізичний зміст понять «власна індуктивність» та «взаємна індуктивність» обмотки.*

7. *Чим визначається взаємна індуктивність двох обмоток?*

8. *Чому магнітне поле, утворене однофазною обмоткою, зветься «пульсуючим магнітним полем».*

9. *Сформулюйте необхідні умови утворення магнітного поля, яке обертається.*

10. *Напишіть співвідношення для визначення ЕРС, яка наводиться в обмотці обертовим магнітним полем.*

11. *Напишіть рівняння балансу видів енергії в електромеханічній системі.*

12. *Як визначається сила в електромеханічній системі?*

13. *Напишіть співвідношення для визначення магнітної енергії, яка запасается в лінійній електромеханічній системі.*

14. *Як в електромеханічній системі визначаються сила та момент в термінах індуктивностей цієї системи?*

15. *В чому полягає принцип зворотності електромеханічної системи?*

16. *Вкажіть фізичні засади можливості створення узагальненої моделі електричної машини.*

17. Назвіть умови, за яких математична модель електромеханічного перетворювача енергії відповідатиме

- синхронній машині;
- машині постійного струму;
- асинхронній машині.

18. Яке принципове відрізнєння електричної машини постійного струму від машин змінного струму?

19. Що розуміють під еквівалентною схемою заміщення електричної машини?

20. Надайте характеристику моделей конструкційного виконання обертових електромеханічних перетворювачів.

21. Надайте характеристику моделей конструкційного виконання електромеханічних перетворювачів лінійного руху.

22. Надайте обґрунтування ієрархічного зв'язку рівнянь електромагнітного поля для різних типів електромеханічних перетворювачів енергії.

23. Сформулюйте основні положення концепції взаємозв'язку нерівноважної статистичної фізики та стохастичної термодинаміки в додатках до електромеханічних систем.

РОЗДІЛ 3. УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ВЗАЄМОДІЇ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З НАВАНТАЖУВАЛЬНО-ОХОЛОДЖУЮЧИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

На сьогодні формується перспективний клас поліфункціональних електромеханічних перетворювачів енергії, в яких передбачена конструктивна і функціональна інтеграція з ланками технологічних процесів, що забезпечує формування поліфункціональних електромеханічних агрегатів (ПЕМА). При цьому всі види дисипативної складової енергії електромеханічних перетворювачів використовуються в технологічному процесі, зокрема, для переробки сировинних матеріалів. Зовнішній масивний ротор, наприклад, шнекового електромеханічного перетворювача (ШЕМП), суміщений з виконавчим органом – шнеком, безпосередньо контактує з робочим навантажувально-охолоджуючим середовищем (РНОС) і здатен формувати мультифізичні процеси обробки сировинних матеріалів.

ШЕМП –термодинамічна відкрита система, яка енергетично взаємодіє з технологічним середовищем. Визначення закономірностей здійснюється для системи, яка перебуває в нерівноважному стані без урахування молекулярної будови ШЕМП.

Термодинамічна гетерогенна система містить такі складові, що обмінюються енергією:

- а) електромагнітна система ШЕМП ;
- б) повітряно-вентиляційна мережа ;
- в) РНОС, що безпосередньо контактує з поверхнею ротора ШЕМП .

РНОС представлено різними сировинними матеріалами з певною вологістю і гранулометричним складом, або їх сумішами, що переробляються відповідно до технологічного процесу включаючи магнітну обробку.

РНОС створює для ШЕМП механічне навантаження, яке формується впливом тертя і гідродинамічних процесів на лінійно-обертову частину ШЕМП. Одночасно РНОС виступає і як охолоджуюче середовище, яке забезпечує відбір теплової енергії від частин ШЕМП.

3.1. Модель тепломеханічних навантажень в робочій зоні шнекового електромеханічного перетворювача

Для досліджень процесів руху сировинного матеріалу в шнековій зоні ШЕМП застосовуємо математичну модель, що визначає поведінку деформованих тіл при статичних і динамічних навантаженнях (механічні сили, температура, електромагнітні поля).

На рис. 3.1 показана модель температурно-механічних навантажень при транспортуванні дисперсної суміші.

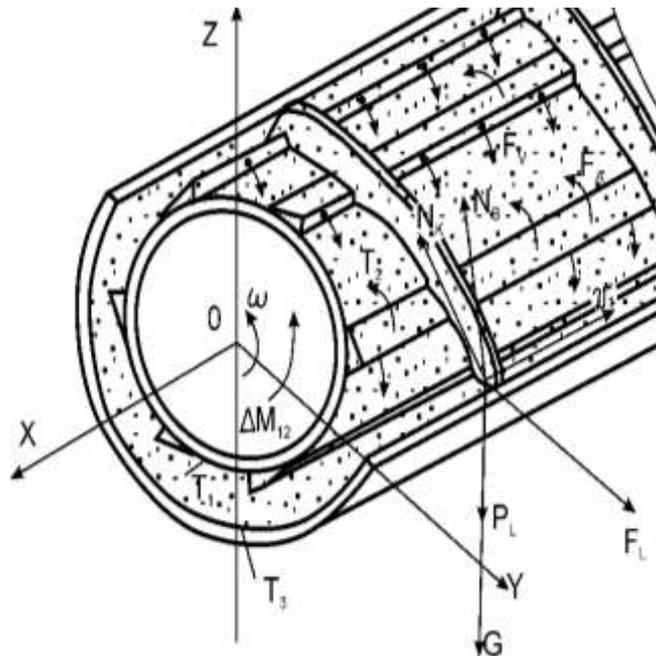


Рис.3.1. Розподіл зусиль і обертових моментів ШЕМП

Перше диференційне рівняння – закон збереження маси – швидкість накопичення маси всередині об'єму шнека дорівнює різниці між масою, що надходить до шнеку, і масою, що виходить з нього:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0, \quad (3.1)$$

де ρ - щільність матеріалу; $\partial/\partial x$, $\partial/\partial y$, $\partial/\partial z$ - проекції швидкості руху матеріалу в певній точці в системі координат.

Зміни швидкостей при зсуві речовини пов'язані з локальними температурними і конвективними змінами щільності:

$$\theta = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_x}{\partial z}. \quad (3.2)$$

Також використовуємо диференційне рівняння зміни кількості руху частинок речовини в малих об'ємах:

$$\begin{aligned} & p \left(\frac{\partial v_k}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_k}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_k}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_k}{\partial z} \right) = \\ & = \rho G_k - \frac{\partial p}{\partial k} + 2 \frac{\partial}{\partial k} \left(\mu \frac{\partial v_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left[\mu \left(\frac{\partial v_1}{\partial k} + \frac{\partial v_k}{\partial t} \right) \right] + \end{aligned}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial t} \left[\mu \left(\frac{\partial v_m}{\partial k} + \frac{\partial v_k}{\partial m} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial k} \mu \theta, \quad (3.3)$$

де $k, l, m = x, y, z$; μ - в'язкість матеріалу; Gk – проекція об'ємної сили на вісь k .

Рівняння зміни повної енергії, що об'єднує потоки кінетичної й внутрішньої енергій, тепловий потік і роботу напруг над цим об'ємом речовини

$$p \left(\frac{\partial E}{\partial t} + v_x \frac{\partial E}{\partial x} + v_y \frac{\partial E}{\partial y} + v_z \frac{\partial E}{\partial z} \right) = q - p\theta + \\ + \frac{1}{A} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + D, \quad (3.4)$$

де E – внутрішня енергія одиниці маси; λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу; q – приплив тепла за одиницю часу в одиниці об'єму внаслідок причин, відмінних від теплопровідності; A – термічний еквівалент роботи; D – диссипативна функція, що представляє собою теплову енергію, виділену при проходженні вихрових струмів у масивному роторі й днищі шнека, а також механічну роботу сил в'язкості.

Спільний розв'язок рівнянь (3.1)–(3.4) дає можливість провести енергетичну оцінку і визначити величини виникаючих навантажень при обробці сировини. За причини нелінійності диференціального рівняння (3.3), розв'язок шукаємо з використання наближеного методу, а саме розглядаємо не об'ємну, а плоску задачу.

Відповідно до рис.3.1 в процесі транспортування речовини в шнековому ШЕМП розглядаються такі такі параметри і характеристики:

➤ відцентрова сила $(P_1+G)v_y^2/g \cdot r$, яка діє на частинку речовини; Ця сила змушує долає силу тертя $\mu(G + P_1) \cos(\alpha + \gamma)$, складову сили ваги G і «сили положення» P_1 і забезпечує ковзання частинки по шнеку.

➤ електромагнітний момент ΔM_{12} , що є результируючим від дії моментів рухового і гальмуючого модулів і який забезпечує спільне обертання частинки речовини зі шнеком зі швидкістю ω ;

➤ У проміжках між гвинтовими лопатями розміщені осьові лопаті для формування більш інтенсивного перемішування речовини шляхом дії сили F_A й реактивних сил напірних струменів повітря F_v . Остання додається до дії результируючого електромагнітного моменту ШЕМП.

3.2. Динамічні моделі навантаження шнекового електромеханічного перетворювача

Механічну частину ШЕМП представляємо системами в різних режимах його роботи:

- одномасової системи на холостому ході (рис. 3.2, а);
- двохмасової системи в режимі заповнення шнека в'язкою масою зі змінними жорсткістю C_{12} і моментом інерції J_2 (рис. 3.2, б);
- двохмасової системи робочого режиму з постійними C_{12} і J_2 (рис. 3.2, в);
- двохмасової системи у режимі очищення шнека від речовини, що транспортується (рис. 3.2, г);
- двохмасової системи перехідного режиму руйнування застиглої маси (рис. 3.2, д).

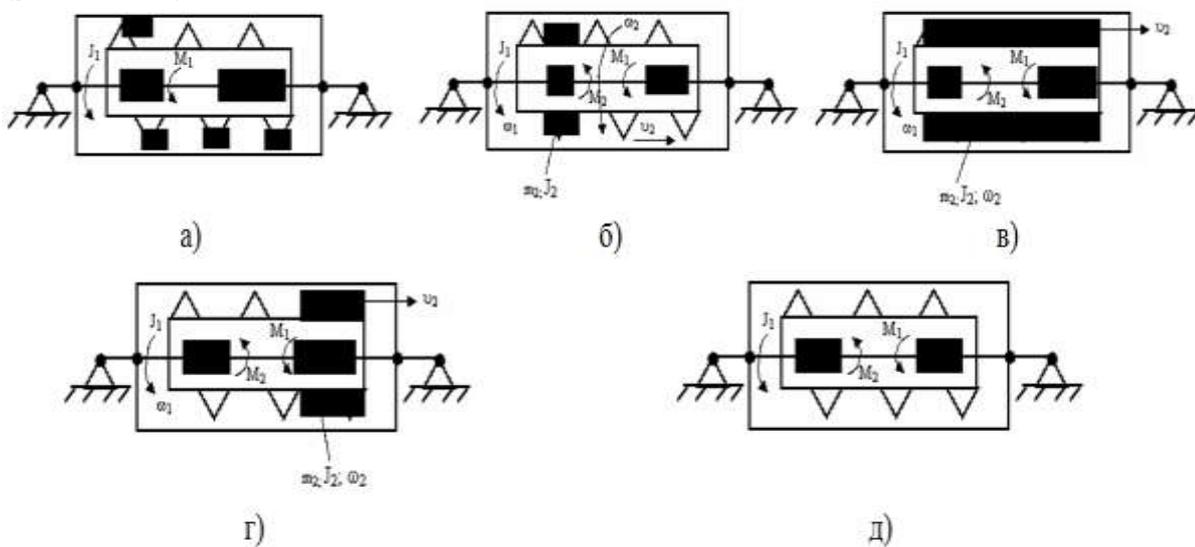


Рис.3.2. Уявлення поведінки механічної частини ШЕМП в різних режимах його роботи

На рис. 3.3, а, б наведені структурні схеми ШЕМП як систем електропривода у режимах одночасної роботи рухомого й гальмуючого модулів, а також режимі узгодженої за напрямком обертання для усіх модулів. Тривалість часу форсованого режиму, як правило, не перевищує 0,5 с. Застосовані такі позначення: β_c - жорсткість характеристики шнека; $J_1(\cdot)$ - загальний момент інерції оберткових мас шнека з урахуванням речовини; β_1 і β_2 - жорсткості механічних характеристик рухомого й гальмуючого модулів; $T_{\omega 1}$, $T_{\omega 2}$ - постійні часу електромагнітних процесів відповідних модулів; ω_p , ω_m - кутова швидкості ротора й сировинного матеріалу.

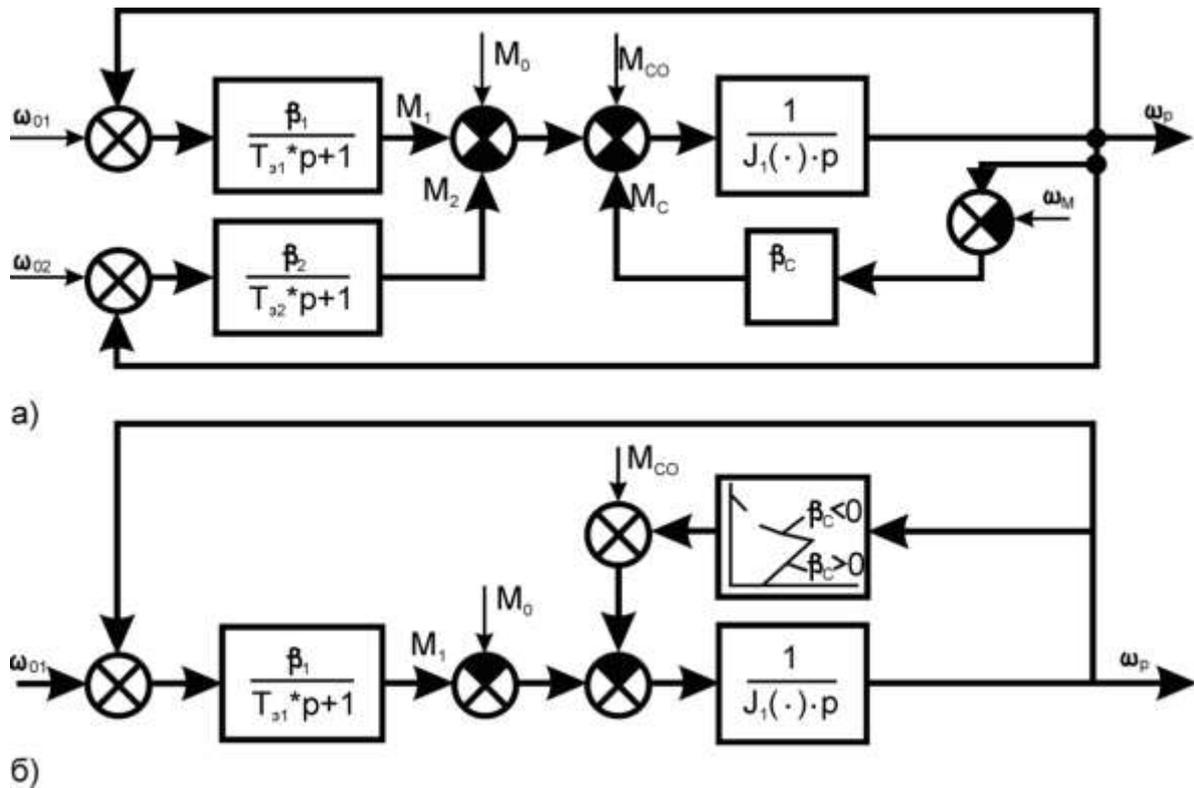


Рис.3.3. Структурні схеми ШЕМП як систем електропривода

Для такої складної електромеханічної системи ШЕМП рівняння руху представлено у такому вигляді:

$$\sum_{i=1}^n M_i - \sum_{i=1}^n M_{ci} = J_p \frac{d\omega_p}{dt} + \sum_{i=1}^n J_i \frac{d\omega_{im}}{dt}, \quad (3.5)$$

де M_i , M_{ci} , J_i , ω_{im} - відповідно електромагнітний, навантажувальний, інерційний моменти, а також кутова швидкість обертового руху речовини на i -й ділянці вздовж вісі шнека; J_p , ω_p - момент інерції й кутова швидкість феромагнітного ротора – шнека.

Загальна питома механічна потужність ШЕМП:

$$N_{пт.і} = N_{1пт.і} + N_{2пт.і} + N_{3пт.і} + N_{4пт.і} + N_{к.э.пт.і}, \quad (3.6)$$

де $N_{1пт.і}$, ..., $N_{4пт.і}$ – потужності відповідно по таким операціям: підйом матеріалу, подолання опору тертя матеріалу по лопаті і по ринву, змішування й подрібнення речовини; $N_{к.э.пт.і}$ – потужність, що делегується матеріалу для додавання необхідної кінетичної енергії.

Для певної швидкості ШЕМП розраховуються відповідні моменти навантаження M_{ci} на ділянках шнека. Усталений режим роботи ШЕМП

досягається при урівноваженні електромагнітних моментів і сумарного момента навантаження

$$\sum_{i=1}^n M_i - \sum_{i=1}^n M_{ci} = 0. \quad (3.7)$$

При транспортуванні сировинного матеріалу потужність P_{Σ} ШЕМП складається з трьох компонент, які є функцією фактичної продуктивності Q_{ϕ} , ковзання речовини $(\omega_p - \omega_m)$ щодо шнека й коефіцієнта тертя f_2 речовини об поверхню жолоба шнека:

потужність на підйом речовини на висоту H

$$P_{n.m} = \frac{\gamma_o}{3670 \cdot 10^2} Q_{\phi} \cdot H = f(Q_{\phi}); \quad (3.8)$$

потужність на подолання опору тертя речовини об гвинтову навивку

$$P_{тр.л} = f \left[Q_{\phi}; (\omega_p - \omega_m); \omega_m^2 \right]; \quad (3.9)$$

потужність на подолання опору руху речовини уздовж стінок жолоба

$$P_{тр.дн} = f \left[Q_{\phi}; f_2; \omega_m^2; (\omega_p - \omega_m) \right], \quad (3.10)$$

де ω_m, γ_o - відповідно абсолютна кутова швидкість і об'ємна вага речовини.

Отже, навантажувальний момент шнека визначається за формулою:

$$M_c = \frac{1000 \cdot P_{\Sigma}}{\omega_p}. \quad (3.11)$$

На гвинт шнека діє поздовжня сила

$$F_{np} = \frac{M_c}{r \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_1)}, \quad (3.12)$$

де r - радіус, на якому прикладена сила F_{np} ($r = (0,7 \div 0,8)D/2$, де D - діаметр шнека);

α - кут підйому гвинтової лінії на радіусі r ;

$\varphi_1, \operatorname{tg}\varphi_1 = f_1$ - кут тертя і коефіцієнт тертя речовини об поверхню гвинта.

Для характеристики реального режиму навантаження ШЕМП, в якому процеси можна віднести до інфранизькочастотних, запропонована така математична модель:

$$\psi(t) = R(t) \cdot S(t), \quad (3.15)$$

де $R(t)$ - складова, що характеризує стохастический характер зміни властивостей й інтенсивності потоку завантаження речовини. Ця складова має безперервний характер; $S(t)$ - пульсуюча складова.

Для пульсуючої складової режиму навантаження $S(t)$ закон розподілу подається як імовірність знаходження ШЕМП у робочому режимі у вигляді математичного очікування:

$$S_i = 0, \quad R_i = \frac{\tau_{\Pi}}{\tau_P + \tau_{\Pi}}; \quad (3.16)$$

$$S_i = 1, \quad R_i = \frac{\tau_P}{\tau_P + \tau_{\Pi}},$$

де τ_P, τ_{Π} – відповідно періоди дії і відсутності навантаження ШЕМП.

Власне закон режиму навантаження ШЕМП:

$$f(\psi) = \frac{\bar{\tau}_{\Pi}}{\bar{\tau}_{\Pi} + \bar{\tau}_P} \cdot \delta(0) + \frac{\bar{\tau}_P}{\bar{\tau}_P + \bar{\tau}_{\Pi}} \cdot \frac{1}{\sigma_R \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\log R - \bar{R}^2)}{2\sigma_R^2}\right], \quad (3.17)$$

де $\delta(0)$ - функція щільності розподілу моменту неробочого ходу шнека й гальмуючого моменту в період відсутності навантаження;

$\bar{\tau}_P$ і $\bar{\tau}_{\Pi}$ - математичне очікування періодів дії й відсутності навантаження.

Як приклад, на рис. 3.4 у графічній формі наведені зміни у часі величини споживаної активної потужності P , моменту навантаження M_c й генерованої теплової потужності $P_{\text{теп}}$, які відтворюють результати спостережень за роботою ШЕМП в процесі сушіння вугільного шламу.

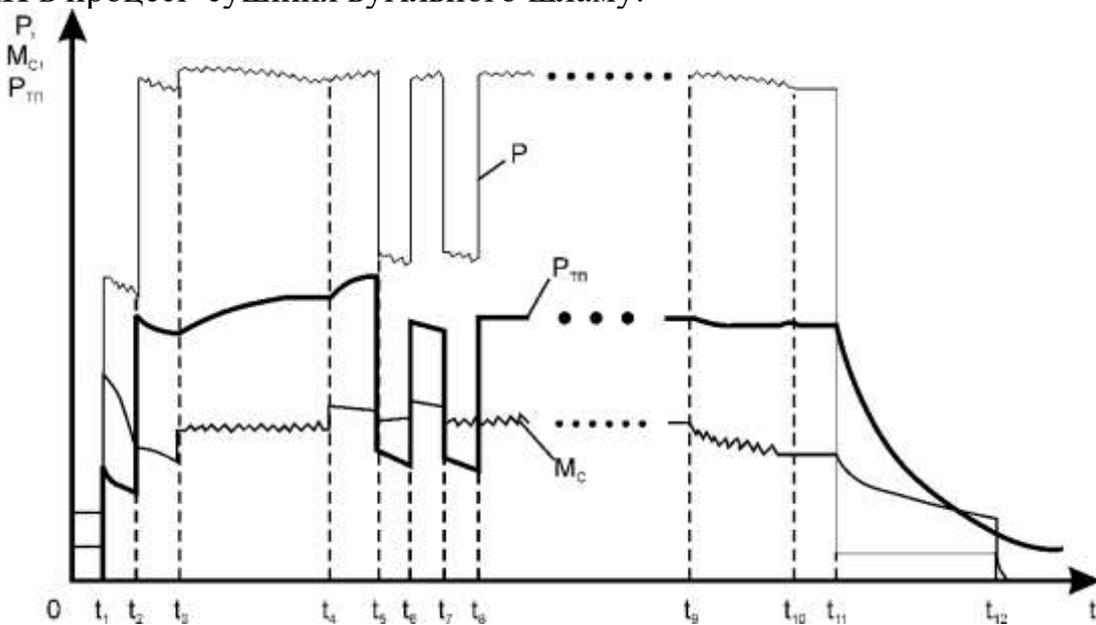


Рис.3.4. Зміни енерговитрат і навантажень ШЕМП у технологічному циклі

На рисунку представлені такі періоди стану окремих вузлів ШЕМП :

(0 – t_1) – введення в роботу вентилятора високого тиску;

(t_1 – t_2) – активуючий режим шнека при включенні тільки рухового модуля);

(t_2 – t_3) – неробочий хід шнека з додатковим підключенням гальмуючого модуля ;

(t_3 – t_4) – штатний режим роботи шнека по нагріванню й транспортуванню речовини;

(t_4 – t_5) – випадкове заштибування шнеку;

(t_5 – t_8) – повторюваний форсований режим шнека;

(t_8 – t_9) – відновлення штатного режиму роботи шнека по нагріванню й транспортуванню речовини;

(t_9 – t_{10}) – «прокачування» залишків речовини;

(t_{10} – t_{11}) – неробочий режим шнека;

(t_{11} – t_{12}) – охолодження шнека вентилятором високого тиску (модулі відключені від мережі живлення);

t_{12} – відключення вентилятора.

3.3. Процеси енергетичних перетворень у шнековому електромеханічному агрегаті

Оскільки система ШЕМП теплоізольована від навколишнього середовища, енергетичні процеси розглядаємо в адіабатичному режимі. На рис. 3.5 наведена активна зона транспортування речовини в ШЕМП і її плоска модель.

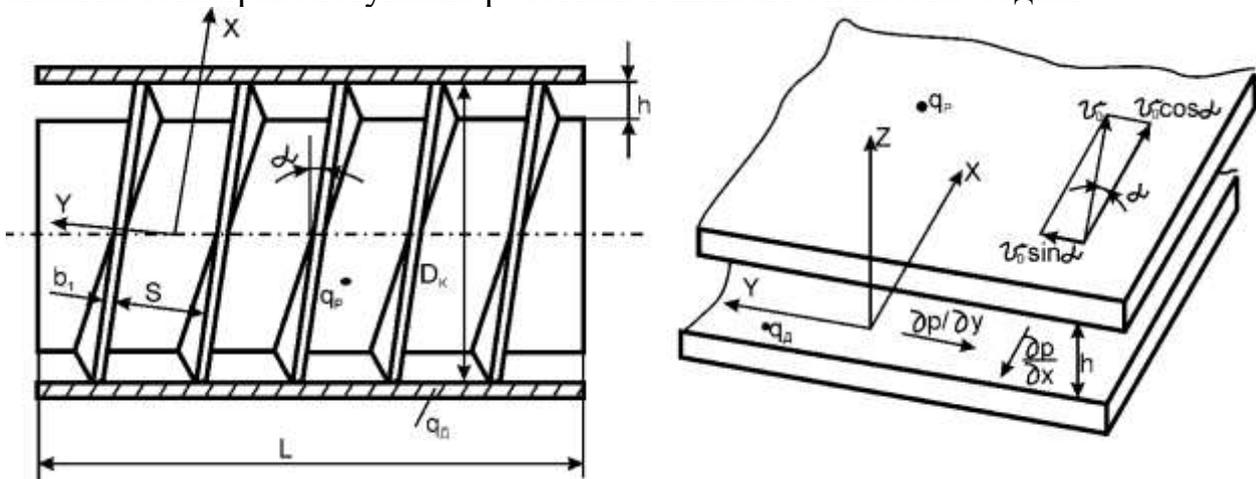


Рис.3.5. Активна зона транспортування й нагрівання речовини в ШЕМП і її плоска модель

Речовина, що має певні реологічні властивості, рухається зі у гвинтовому каналі глибиною h , утвореному гвинтовими лопатями із кроком S , жолобом і поверхнею ротора – шнека ШЕМП. Ізотермічні поверхні ротора й жолоба шнека є джерелами нагрівання речовини з відповідними питомими тепловиділеннями

q_p і q_d . Крім того, нагрівання речовини відбувається в умовах складного зсуву й тертя з частковою дисипацією механічної енергії.

Нижня пластина плоскої моделі гвинта (рис.3.5) нерухлива, а швидкість переміщення верхньої – має дві складові: повздовжу по осі каналу й поперечну. По цих осях у каналі глибиною h між пластинами діють постійні за величиною градієнти тиску $\partial p / \partial x > 0$, $\partial p / \partial y > 0$.

Дотичні механічних напруг знаходимо в результаті інтегрування рівнянь руху речовини в каналі шнека:

$$\frac{d\tau_{xz}}{dz} = \frac{\partial p}{\partial x}; \quad \frac{d\tau_{yz}}{dz} = \frac{\partial p}{\partial y}. \quad (3.18)$$

$$\tau_{xz} = \frac{\partial p}{\partial x}(Z - C_1 h); \tau_{yz} = \frac{\partial p}{\partial y}(Z - C_2 h), \quad (3.19)$$

де C_1 і C_2 – постійні інтегрування.

Для врахування реологічних властивостей речовини застосовуємо залежність її в'язкості від температури:

$$D_\tau = \frac{B_1}{\exp(n_o T)} \left(\frac{I_n}{2} \right)^{-m/2} \cdot D_\varepsilon, \quad (3.20)$$

де B_1 , n_o і m - незалежні від температури реологічні константи й узагальнений індекс плинучості;

D_τ - девіатор тензора напруг;

D_ε - тензор швидкостей деформації;

I_n - квадратичний інваріант тензора швидкостей деформації.

Щодо постійних інтегрування C_1 і C_2 , то це є ординати точок на епюрі швидкостей, у яких в градієнти швидкостей і механічних напруг дорівнюють нулю, а при $Z=0$ – є безрозмірними дотичними напругами на жолобі шнека. Для моделі, прийнятої за рис.3.5, вкажемо граничні умови:

$$\frac{I_n}{2} = \left(\frac{\partial \omega_x}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \omega_y}{\partial z} \right)^2 \quad (3.21)$$

$$\omega_x = 0, \quad \omega_y = 0 \quad \text{при } Z = 0;$$

$$(3.22)$$

$$\omega_x = \eta v_o \cos \alpha; \quad \omega_y = \eta v_o \sin \alpha \quad \text{при } Z = h,$$

де η - коефіцієнт проковзування; ω_x, ω_y - проекції швидкості часток речовини на осі x та y ; v_o - колова швидкість гвинта шнека.

Складовій теплового потоку, пов'язаної з теплопровідністю, зневажаємо, беручи в увагу тільки конвективну складову.

Рівняння енергетичного балансу ШЕМП при транспортуванні й нагріванні елементарного обсягу речовини з урахуванням тільки конвективної складової теплового потоку:

$$\begin{aligned} & \frac{B_1}{\exp(n_o T)} \frac{(\eta v_o)^{2-m}}{h^{1-m}} F \cdot P_x \cdot S \cdot \varepsilon \cdot \cos \alpha \cdot dx + 2\alpha \cdot (S + h) \cdot T_{\Delta cp} dx = \\ & = C_M \rho_M \cdot U_x \cdot U_{\max} \cdot \eta v_o h \cdot S \cdot dT + \\ & + U_x \cdot U_{\max} \cdot \eta v_o h \cdot S \cdot P_x \frac{B_1}{\exp(n_o T) h^{2-m}} \left(\frac{\eta v_o}{A} \right)^{1-m} \cos \alpha \cdot dx, \end{aligned} \quad (3.23)$$

де m – індекс аномалії в'язкості (для в'язкопластичної речовини $m \leq 1$);

$P_x = \frac{\partial p / \partial x}{(\partial p / \partial x)_{\max}}$ - градієнт тиску у напрямку транспортування;

$\varepsilon = (1 - C_1) \cos \alpha + \operatorname{tg} \alpha (1 - C_2) \sin \alpha$;

C_M, ρ - відповідно теплоємність і щільність речовини;

U_x, U_{\max} – поточне й максимальне значення витрати речовини;

$T_{\Delta cp}$ - середнє перевищення температури стінок каналу над температурою

речовини;

α - коефіцієнт тепловіддачі гріючих поверхонь ротора-шнека;

$A = (1 - \xi_m)^\vartheta - \xi_m^\vartheta$;

$F = \left(\frac{\vartheta}{A} \right)^{\frac{1}{\vartheta-1}}$, де $\vartheta = \frac{2-m}{1-m}$.

Вкажемо три основні значення безрозмірної координати ξ :

1) $\xi_o = Z_o / h$; Z_o – координата крапки на епюрі швидкостей, у якій механічна напруга й градієнт дорівнюють нулю;

2) $\xi = Z / h$;

3) $\xi_{\max} = C_1 = C_2$ - відповідає режиму заблокованого виходу.

Перша складова лівої частини рівняння (3.23) – механічна потужність, яку затрачує ШЕМП на подолання сил тертя. Друга складова лівої частини – тепла енергія, що передається теплообміном від стінок каналу до речовини:

$$dP_\alpha = 2\alpha \cdot T_{\Delta cp} \cdot (S + h) \cdot dx, \quad (3.24)$$

де $T_{\Delta cp}$ - різниця температур стінок каналу і речовини (бажана величина підтримується системою автоматичного регулювання температури); α – коефіцієнт тепловіддачі, що визначається із критеріального рівняння теплообміну:

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}. \quad (3.25)$$

В цьому рівнянні для руху речовини при обертанні шнека ШЕМП число Рейнольдса визначається за виразом:

$$Re = (\rho/\mu)R_{cp} \cdot h \cdot \omega,$$

де R_{cp} - середній радіус між циліндрами ротора і жолоба;
 μ - ефективна в'язкість на середньому радіусі;
 ω - кутова швидкість.

Температурна залежність в'язкості $\mu(T)$ речовини визначається за формулою Рейнольдса $\mu = \mu_o \exp(-aT)$, при цьому цей вплив дуже суттєвий: зміни температури речовини на 100°C викликають зміни її в'язкості в 30 раз.

Отже, потужність стороннього нагрівання P_α речовини від джерел змінної потужності q_p і q_d визначається шляхом інтегрування рівняння (3.24).

Еквівалентна потужність ШЕМП, яка витрачається на транспортування й нагрівання матеріалу до певної температури T , визначається за виразом:

$$P = \frac{U_x \cdot U_{\max} \cdot \eta v_o}{\varepsilon - U_x \cdot U_{\max}} hS \cdot \varepsilon \rho \cdot \Delta T. \quad (3.26)$$

Механічна потужність ШЕМП, що витрачається на транспортування й дисипативний розігрів речовини, дорівнює $P_{mex} = P - P_\alpha$.

3.4. Спосіб підвищення енергетичних показників поліфункціональних електромеханічних перетворювачів

Завдяки жорсткій конструкції електродвигуни з масивним феромагнітним ротором можуть працювати з найвищими необхідними швидкостями обертання, мають здатність працювати в середовищах з високою вологістю та наявністю агресивних речовин. Але основним недоліком цих електродвигунів є значна доля реактивної складової у споживаному струмі. На прикладі ШЕМП нижче буде представлено спосіб ємнісної компенсації реактивної складової споживаного струму і підвищення енергетичних показників поліфункціональних електромеханічних перетворювачів.

На рис.3.6 представлена конструктивна схема ШЕМП. Для валідації результатів моделювання ми свідомо вибираємо елементи електромагнітної системи ШЕМП, а саме, статори з номенклатури кранових двигунів номінальною

потужністю $P_n = 1,4$ кВт, синхронною частотою обертання 1000 об/хв, одношаровою концентричною обмоткою з схемою з'єднання фаз у зірку. Він приймається за базовий варіант ШЕМП.

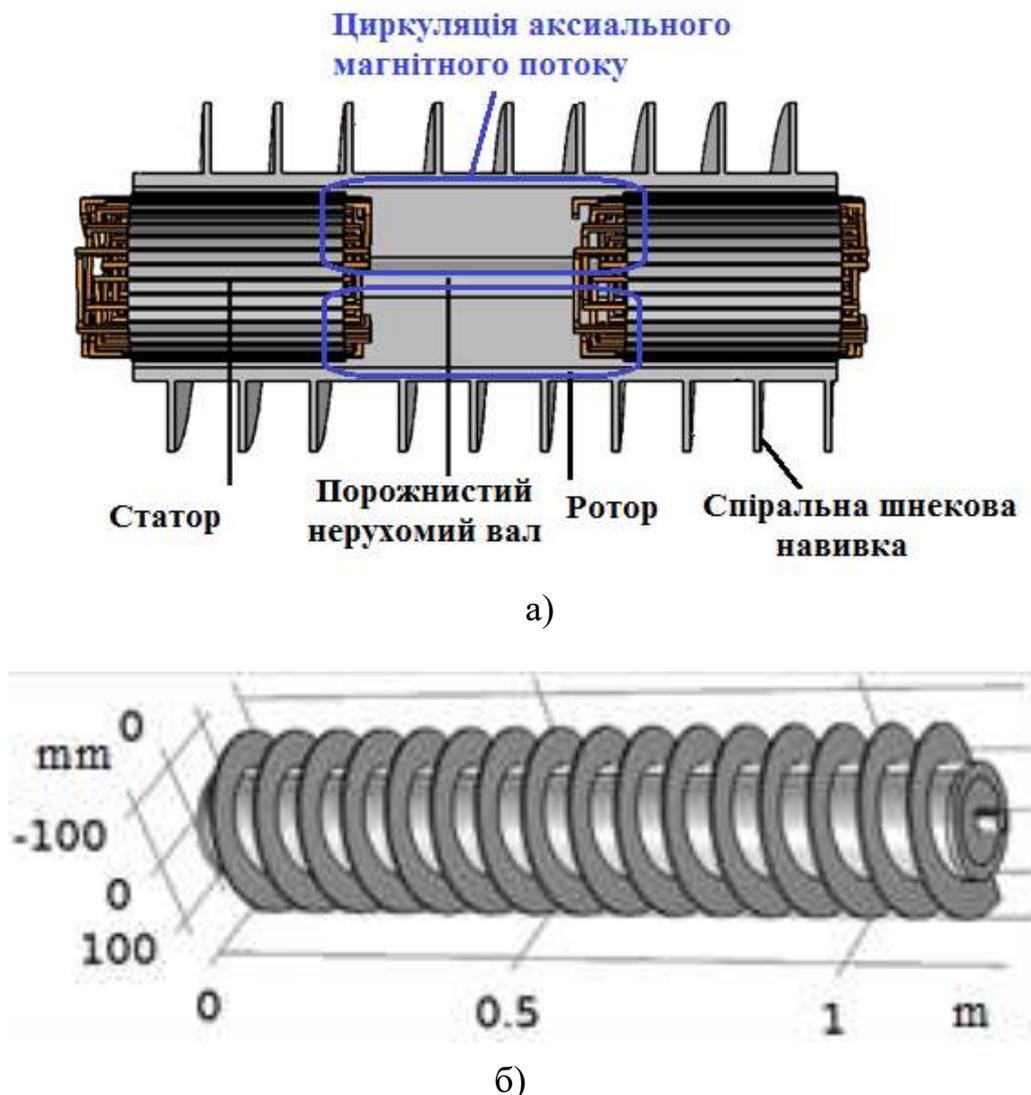


Рис.3.6. Конструктивна схема поліфункціонального електромеханічного перетворювача: а – електромагнітна система; б – розрахункова схема для моделювання

У модифікованому ШЕМП для підвищення енергетичних показників і величини електромагнітного моменту впроваджено ємнісну внутрішню компенсацію реактивної складової струму. У статорі базового ШЕМП застосовано обмотку із повним кроком, одною паралельною віткою і двома котушками у групі (рис.3.7,а). Для модифікованого ШЕМП прийняті такі обмоткові дані: кількість паралельних віток $a = 2$, кількість котушок у котушковій групі – 1, при цьому вдвічі зростає кількість котушкових груп (рис.3.7,б). До мережі живлення приєднується дві напів - обмотки: робоча обмотка, яка створена однією з паралельних віток, а друга паралельна вітка утворює додаткову обмотку, яка зміщена у пазах статора на 30° відносно робочої

обмотки і має послідовно включену електричну ємність (рис. 3.8,*a*). При цьому формуються умови покращення характеристик ШЕМП, а саме зміна значення і фази струмів, магніторушійних сил і обертового моменту.

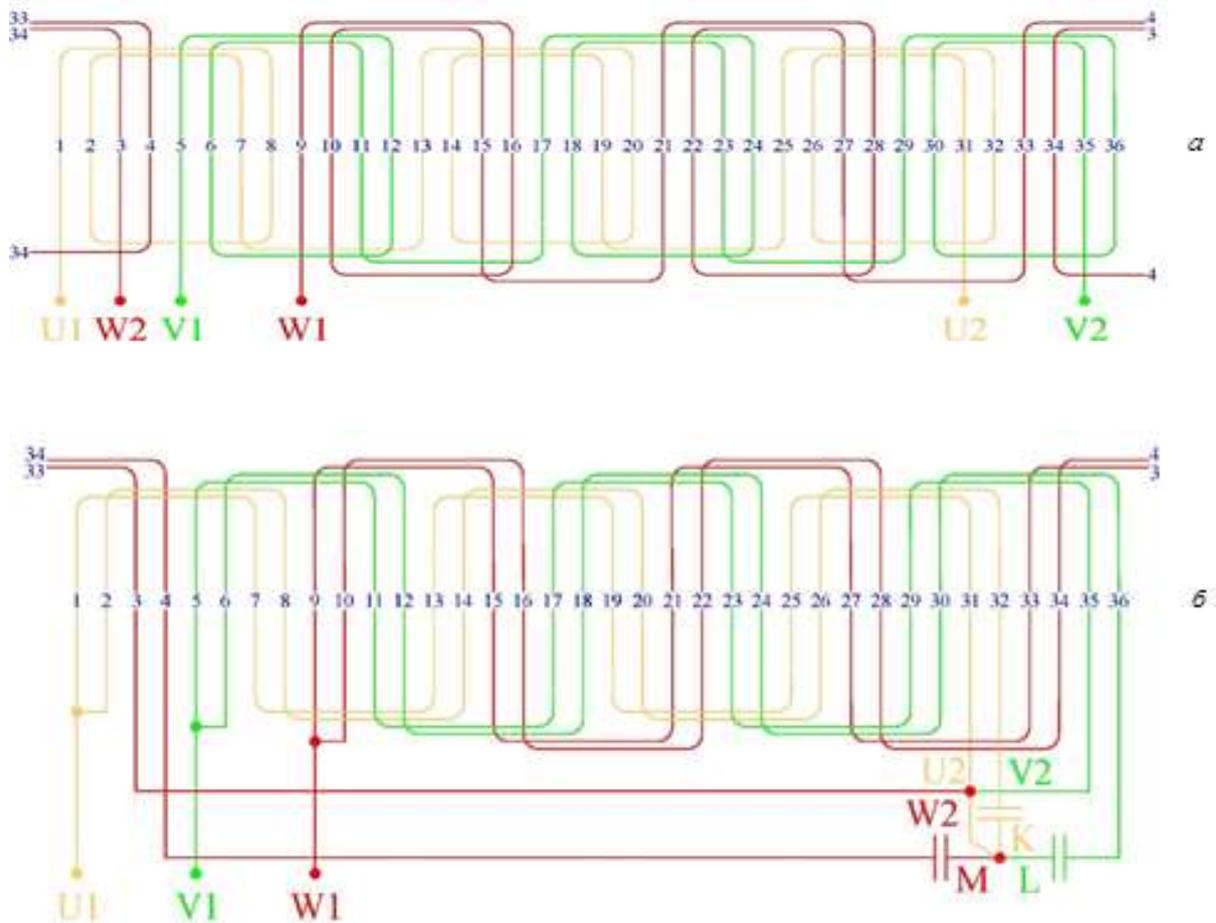


Рис. 3.7. Електричні розгорнуті схеми обмоток статора базового (*a*) та модифікованого (*б*) ШЕМП

Різниця досягається за рахунок того, що на відміну від базового ШЕМП, в якому струм обмотки статора зберігає активно-індуктивний характер у всіх режимах роботи, струм робочої обмотки I_1 статора модифікованого ШЕМП має активно-індуктивний характер, а струм додаткової обмотки I_Δ із послідовно увімкненим конденсатором набуває ємнісно-активного характеру (рис. 3.8,*б*).

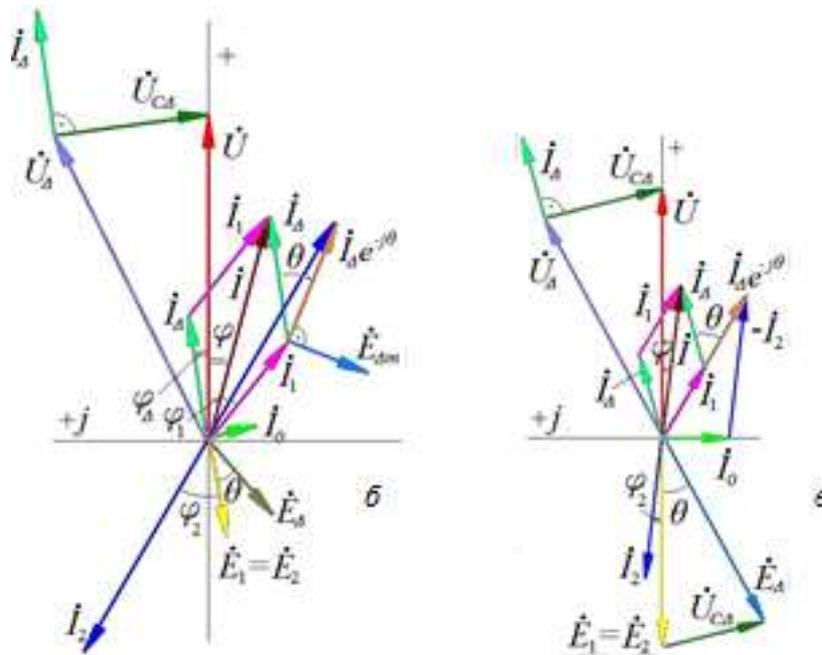
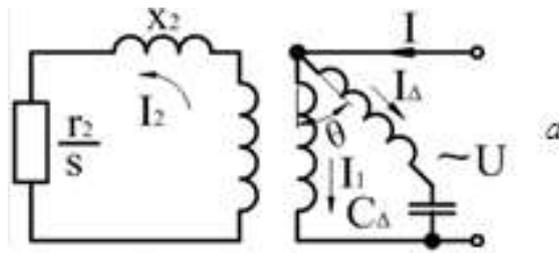


Рис. 3.8. Модифікований ПЕМП: а–електрична схема для однієї фази обмотки; б– векторна діаграма для пускового режиму; в – векторна діаграма за номінального навантаження

Струм $i_{\Delta} e^{-j\theta}$ приймає участь у створенні струму намагнічування ШЕМП $i_0 = i_1 + i_{\Delta} e^{-j\theta} + i_2$ та формує додаткову ЕРС $E_{\Delta m} = -jx_m i_{\Delta} e^{-j\theta}$, яка відповідно збільшує основні ЕРС статорної і роторної обмоток. Важливо, що збільшення ЕРС ротора приводить до збільшення пускового струму і моменту модифікованого ШЕМП. При цьому скорочується у часі процес розгону ротора ШЕМП і у робочому режимі порівняно із базовим ШЕМП формується більш жорсткіша механічна характеристика. Взаємозв'язок електричних величин за номінального навантаження модифікованого ШЕМП відображено на векторній діаграмі рис. 3.8,в. За даними розрахунків і експеримента збільшення на 20-30 % пускового моменту за рівного із базовим ШЕМП пусковим струмом досягається при значеннях кута у 30° просторового зрушення робочої і додаткової обмоток фаз статора модифікованого ШЕМП. Крім того, при такому способі забезпечується Врахована також досить проста технологія виконання обмоток статора модифікованого ШЕМП: фазна зона 60° обмотки базового ШЕМП поділяється на дві рівні частини.

Моделювання електромагнітних і електромеханічних характеристик здійснювалось для ШЕМП з такими вихідними параметрами: активна довжина

магнітопровода статора $L_s = 90$ мм; розрахункова довжина відповідної ділянки спільного зовнішнього ротора, на яку впливає електромагнітне поле окремого статора складає $L_r = 300$ мм; частота струму $f_0 = 50$ Гц; об'ємна щільність сталі ротора $\rho_{st} = 7850$ кг/м³; амплітудне значення струму $I_0 = 13\sqrt{2}$ А.

Змінні величини базового ШЕМП: струм фази U $I_U = I_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t)$ А; струм фази W $I_W = I_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + 120^\circ)$ А; струм фази V $I_V = I_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t - 120^\circ)$ А, де $\omega_0 = 2\pi f_0$, кутова швидкість, рад/с; t – параметр часу.

Змінні величини модифікованого ШЕМП: струми фаз робочої обмотки U – $I_U = I_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t)$ А; струм фази W – $I_W = I_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + 120^\circ)$ А; струм фази V – $I_V = I_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t - 120^\circ)$ А;

струми фаз додаткової обмотки K – $I_K = I_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + 30^\circ)$ А; струм фази M – $I_M = I_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + 150^\circ)$ А; струм фази L – $I_L = I_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t - 90^\circ)$ А. На рис. 3.9 показано порядок укладання обмоток статора для двох варіантів ШЕМП, що розглядаються.

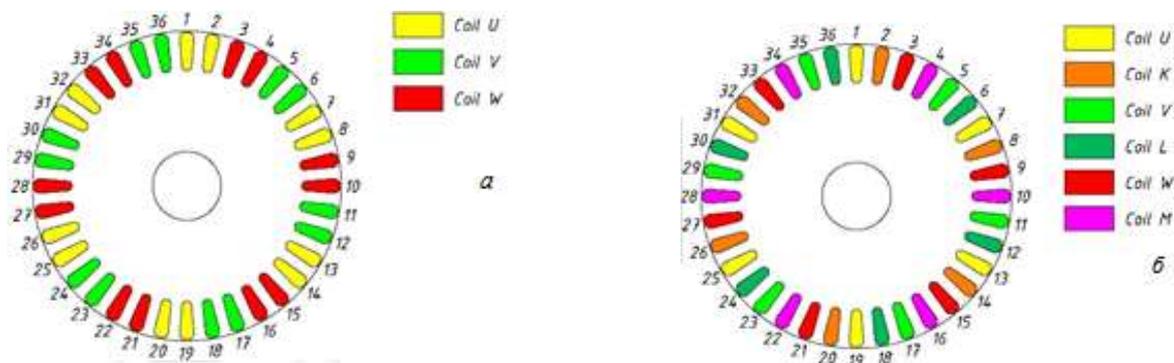


Рис. 3.9. Розташування обмоток в пазах статорів базового і модифікованого варіантів ШЕМП

Ємність конденсатора як у пусковому, так і в режимі навантаження впливає на струми робочої та додаткової обмоток, втрати в двигуні, фазу струму додаткової обмотки. Тому обирається ємність конденсатора, яка забезпечує рівність струмі у робочій та додатковій обмотках фаз статора ШЕМП. Для прийнятих вихідних обмоткових даних такий режим роботи модифікованого ШЕМП забезпечується при ємності конденсатора 25 мкФ з розрахунку на 1 кВт номінальної потужності.

Використовуючи розрахункову схему рис.3.6,б здійснюють моделювання електромагнітних, електромеханічних і теплових процесів в програмному комплексі Comsol Multiphysics. Математичні моделі, які використовуються для чисельного аналізу електромагнітних, електромеханічних і теплових процесів, представлені системою моделей, що застосовні до типових електромагнітних модулів ШЕМП, що містять статор і відповідну ділянку масивного ротора. Для розрахунку і аналізу задач електромагнітного процесу використовується така система рівнянь :

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad (3.27)$$

де \mathbf{H} – вектор напруженості магнітного поля, А/м;
 \mathbf{J} – вектор густини струму, А/м²;

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad (3.28)$$

де \mathbf{B} – вектор густини магнітного поля, Тл; \mathbf{A} – магнітний векторний потенціал, Вб/м;

$$\mathbf{E} = -\partial \mathbf{A} / \partial t, \quad (3.29)$$

де \mathbf{E} – вектор напруженості електричного поля, В/м;

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (3.30)$$

де σ – електропровідність, См.

Рівняння для скалярного потенціалу:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (3.31)$$

з граничною умовою – нормальна складова густини магнітного потоку на зовнішній межі дорівнює нулю:

$$n \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (3.32)$$

Намагніченість феромагнітного ротора визначається B - H кривою і розраховується за виразом:

$$B = f(|H|) \frac{H}{|H|}. \quad (3.33)$$

Багатовиткові обмотки статора в моделі застосовуються як джерело струму і забезпечують необхідну густину струму J_e вздовж провідників (рис. 3.7, 3.9):

$$J_e = \frac{N \cdot I_{coil}}{A} \cdot e_{coil}, \quad (3.34)$$

де N – кількість витків в обмотці; A – загальна площа перерізу обмотки, м²; I_{coil} – струм, А; e_{coil} – векторний параметр для визначення напрямку намотування обмотки.

Програмне середовище Comsol Multiphysics дозволяє вести моделювання теплових процесів в області дослідження, об'єднуючи фізичні закономірності теплопередачі в твердих тілах, частотного індукційного та електричного нагріву та розповсюдження магнітного поля. Чисельний аналіз теплообмінних процесів при наявності джерел тепла здійснюється з використанням диференціальної форми закону Фур'є:

$$d_z \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + d_z \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = d_z Q + q_0 + d_z Q_{ted}, \quad (3.35)$$

де d_z – товщина ділянки в напрямку нормалі, м; ρ – щільність матеріала середовища, кг/м³; C_p – питома теплоємність при постійному тиску, Дж/(кг·К); T – температура, К; t – час, с; \mathbf{u} – вектор швидкості, м/с; \mathbf{q} – тепловий потік, Вт/м²; Q – джерело тепла, Вт/м³; q_0 – внутрішній тепловий потік, Вт/м²; Q_{ted} – розсіювання енергії через нерівномірний розподіл температури в матеріалі під час деформації, Вт/м³.

$$\mathbf{q} = -d_z k \nabla T, \quad (3.36)$$

де k – теплопровідність, Вт/(м·К).

Гранична умова при застосованні теплоізоляції на зовнішніх межах моделі:

$$-n \cdot \mathbf{q} = 0, \quad (3.37)$$

де n – індекс заломлення.

Тепловий потік з поверхонь в рівнянні (3.35) визначається таким чином:

$$-n \cdot \mathbf{q} = d_z q_0, \quad (3.38)$$

$$q_0 = h \cdot (T_{ext} - T) \quad (3.39)$$

де h – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); T_{ext} – зовнішня температура, К.

Випромінювання тепла до навколишнього середовища від поверхні розрахункової моделі:

$$-n \cdot \mathbf{q} = d_z \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4), \quad (3.40)$$

де ε – показник ефективності теплового випромінювання; σ – постійна Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴); T_{amb} – температура зовнішнього середовища, К.

Нагрів за рахунок впливу електромагнітного поля:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_e, \quad (3.41)$$

де Q_e – об'ємна щільність електромагнітного джерела тепла, Вт/м³:

$$Q_e = Q_{rh} + Q_{mi}, \quad (3.42)$$

де Q_{rh} – резистивні втрати, Вт/м²; Q_{mi} – магнітні втрати, Вт/м².

Визначення резистивних і магнітних втрат за заданої частоти в певний момент часу здійснюємо за виразами:

$$Q_{rh} = 0,5 \cdot \text{Re}(\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}^*); \quad (3.43)$$

$$Q_{mi} = 0,5 \cdot \text{Re}(i\omega \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}^*); \quad (3.44)$$

де \mathbf{E}^* – вектор напруженості електричного поля, В/м; \mathbf{H}^* – вектор напруженості магнітного поля, А/м.

Аналіз результатів моделювання. Більша частина характеристик ШЕМП показана в площині його поперечного перерізу. На рис.3.10 показано суттєву відмінність в розподілі z -компоненти густини струму, особливо для пазових зон статора: у порівнянні з базовим варіантом модифікований ШЕМП має удвічі меншу кількість пазів з густиною струму близькою до нуля.

У на глибині масива ротора модифікованого варіанта ШЕМП, де амплітуда електромагнітної хвилі зменшується до $(1/e)$ від початкового значення на поверхні середовища, налічується 6 ділянок (по кількості полюсів) з значеннями густини струму, які майже на 15 % перевищують густину струмів на відповідних ділянках базового ШЕМП.

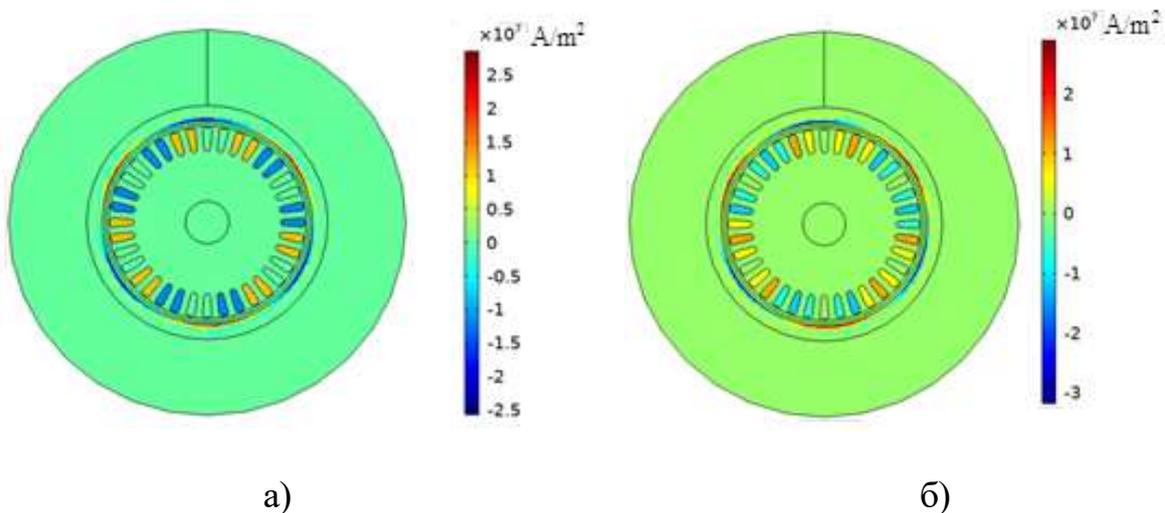


Рис.3.10. z -компонента густини струму для базового (а) та модифікованого (б) ШЕМП

Розподіл об'ємної густини електричної енергії, який відображає концентрацію і потенціал активної енергії в статорі, представлено на рис.3.11. За результатами моделювання об'ємна густина електричної енергії статора модифікованого ШЕМП перевищує у середньому на 19 % густину електричної енергії статора базового ШЕМП.

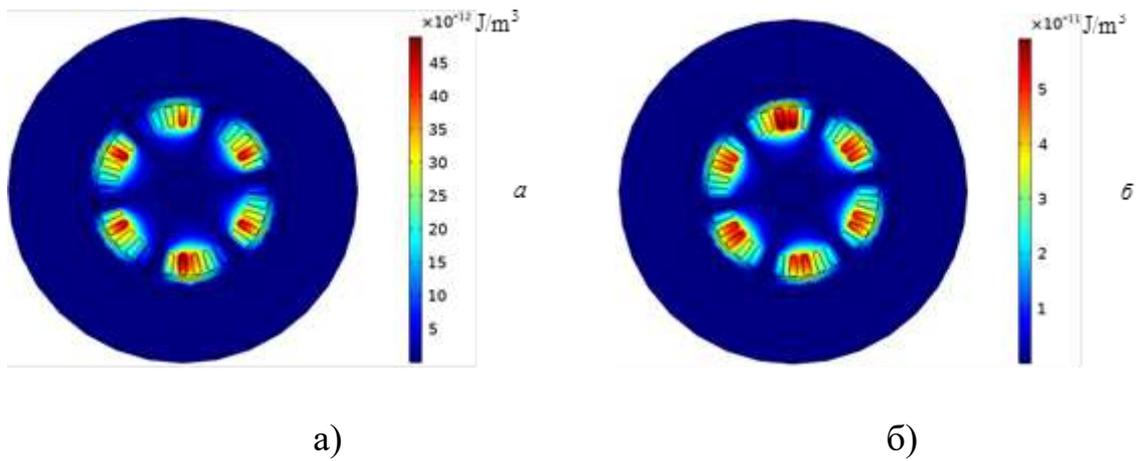


Рис.3.11. Розподіл об'ємної густини електричної енергії базового (а) та модифікованого (б) ШЕМП

На рис.3.12 наведено залежність електромагнітного моменту в процесі пуску для базового та модифікованого варіанта ШЕМП. Значне, півтораразове зростання та зменшення екстремальних пульсацій електромагнітного моменту зафіксоване для модифікованого ШЕМП (рис. 3.12,б).

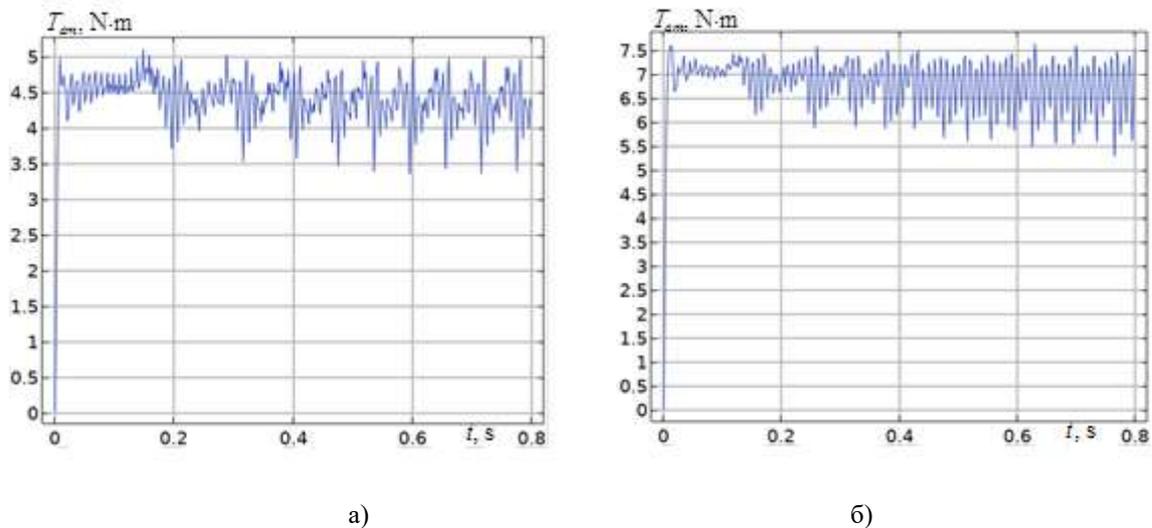


Рис. 3.12. Електромагнітний момент в процесі пуску базового (а) та модифікованого (б) ШЕМП

На рис. 3.13, 3.14 продемонстровано можливість змінювати значення та фазу струму обмотки статора при застосуванні внутрішньої ємнісної компенсації.

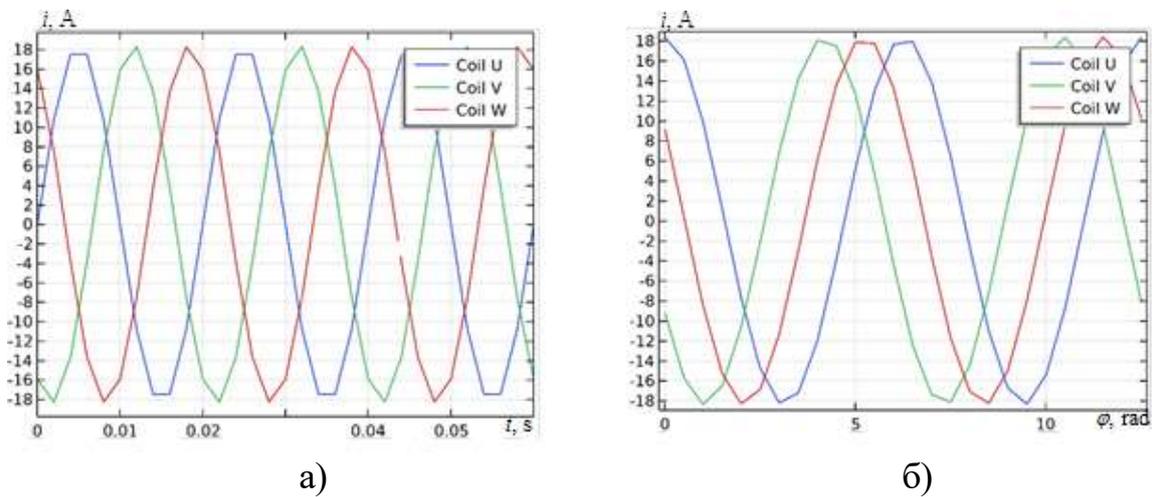


Рис. 3.13. Осцилограма струмів (а) та фазові зсуви (б) струмів модуля базового ШЕМП

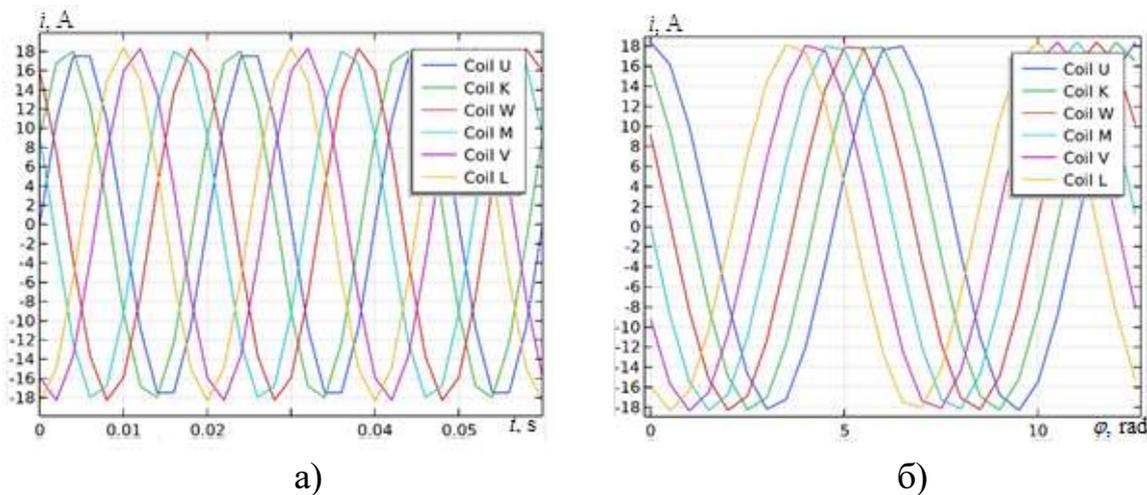


Рис. 3.14. Осцилограма струмів (а) та фазові зсуви (б) струмів модуля модифікованого ШЕМП

Отже, при зміщенні за фазою струму додаткової обмотки відносно струму робочої обмотки на 30° призводить до зростання обертового моменту та розширення зони дії створюваних у роторі вихрових струмів (рис. 3.10) модифікованого ШЕМП.

На рис. 3.15, 3.16 відповідно показані розподіли густини магнітного поля (X-Y компоненти) та намагніченості базового та модифікованого ШЕМП. У розподілі індукції магнітного поля по X-Y компонентах для цих двох варіантів ШЕМП наявна суттєва відмінність: для базового варіанта відмічаються однакові значення індукції під серединою полюсів по X-Y компонентах, а для модифікованого ШЕМП різниця доволі суттєва.

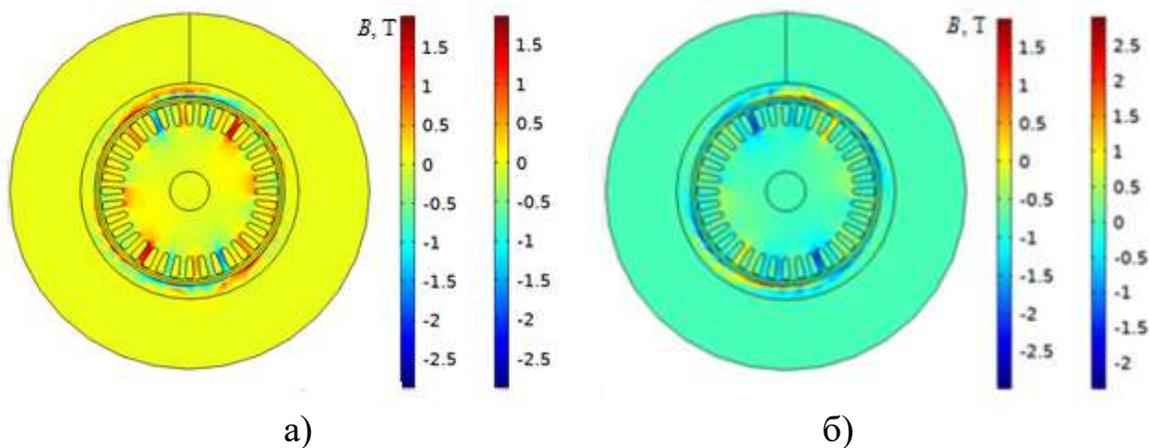


Рис. 3.15. Розподіл індукції магнітного поля базового (а) та модифікованого (б) ШЕМП (ліва шкала – X -компонента, права шкала – Y -компонента)

На рис. 3.16 представлено розподіл ступеня намагніченості порівнювальних зразків ШЕМП. Виходячи з отриманих результатів можна стверджувати, що в модифікованому ШЕМП діє менший магнітний опір на шляху магнітного потоку, у порівнянні з модифікованим спостерігається перевищення на 23 % намагніченості магнітопроводу статора базового ШЕМП, а також значно більша об’ємна густина активної енергії статора для модифікованого ШЕМП.

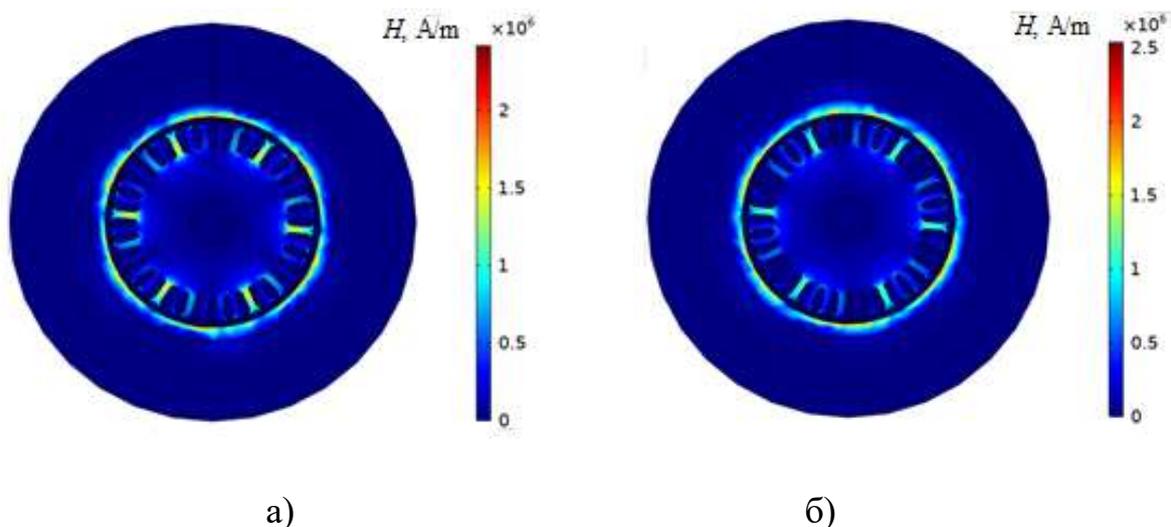


Рис. 3.16. Розподіл намагніченості базового (а) та модифікованого (б) ШЕМП

Це непряме підтвердження підвищення коефіцієнта потужності для модифікованого ШЕМП.

За результатами моделювання побудована табл.3.1 енергетичних і електромеханічних параметрів порівнювальних зразків ШЕМП.

Таблиця 3.1. Результати розрахунку електромеханічних і енергетичних параметрів результатами моделювання базового та модифікованого ШЕМП

Параметр	Базовий варіант	Модифікований варіант	Різниця
----------	-----------------	-----------------------	---------

Споживана активна потужність, Вт	1080,70	1293,56	212,86
Механічна потужність шнека, Вт	103,62	148,60	44,98
Втрати в сталі магнітної системи, Вт	484,28	652,13	167,85
Електричні втрати, Вт	492,80	492,80	0
Частота обертання ротора-шнека, об/хв	180	200	20
Електромагнітний момент, Н·м	5,5	7,1	1,6
ККД по механічній потужності, %	9,58	11,44	1,86
Коефіцієнт потужності, $\cos \varphi$	0,59	0,71	0,12

За рахунок застосування внутрішньої ємнісної компенсації $\cos \varphi$ модифікованого ШЕМП збільшується на 20,3 %, а електромагнітний момент – на 29 %.

Важливим є висновок, що за рахунок зростання втрат в сталі переважно масиву ротора модифікованого ШЕМП збільшиться кількість теплоти, яка передається речовині, що обробляється, тому загальний ККД модифікованого ШЕМП, який є добутком ККД по механічній потужності і термічного ККД, суттєво зростає.

3.5. Методика і результати експериментальних досліджень дослідного зразка ШЕМП

Для перевірки результатів моделювання здійснюється випробування дослідного зразка базового (без внутрішньої ємнісної компенсації) варіанта двостаторного ШЕМП. На рис.3.17 представлено вузли дослідного зразка ШЕМП з визначенням зон вимірювання електромагнітних і температурних параметрів.



Рис.3.17. Дослідний зразок ШЕМП: а - розподіл зон вимірювання електромагнітних, температурних і механічних параметрів на поверхні зовнішнього ротора, б - система суміжних статорів, які розміщені у порожнині зовнішнього ротора

Параметри номінального режиму: споживана активна потужність $P = 2078$ Вт; трифазна напруга живлення $U = 80$ В; споживаний струм двох модулів $I = 30$ А; $\cos\varphi = 0,5$; кількість пар полюсів $2p=3$; частота обертання ротора при узгодженому обертанні магнітних полів двох модулів $n = 450$ об/хв.

Вимірювання магнітної індукції, напруженості електричного поля, густини потоку електромагнітного випромінювання і температур виконувалось в режимі короткого замикання (загальмований ротор) при зниженні напруги живлення до рівня номінального струму.

Для визначення параметрів і характеристик ШЕМП застосовувались такі вимірювальні прилади:

- динамометр аналоговий пружинний універсальний НК-300 , клас точності 0,5 %, використано для вимірювання пускового моменту (рис.3.17);
- для вимірювання електромагнітних полів наднизької частоти від 30 Гц до 300 Гц застосовано прилад Tenmars TM-191 Magnetic Field Meter;
- для вимірювання високочастотних електромагнітних полів в діапазоні частот від 50 МГц до 3,5 ГГц і низькочастотних електричних і магнітних полів на частотах 50-60 Гц застосовано прилад Tenmars TM-190 Multi Field EMF Meter ;
- для безконтактного вимірювання температур застосовано два прилади: інфрачервоний, оптичний пірометр Venetech GM533A, діапазон вимірювання $-50...+530$ °С, показник візування 12:1, коефіцієнт теплового випромінювання 0,1-1, спектр 5-14 мкм; тепловізор Xintest НТІ НТ-18, теплова чутливість 0,07 °С, діапазон температур: $-20...+300$ °С, частота захоплення зображення 8 Гц, діапазон довжин хвиль 8-14 мкм;
- для вимірювання електричних параметрів (потужності, струми і напруги) використано вимірювач К540-3.

Механічне навантаження ШЕМП забезпечувалось шляхом фрикційного впливу механічного гальма на торцеву частину ротора-шнека з підтриманням постійного моменту навантаження на рівні 7,4 Н·м.

В табл.3.2 наведені експериментально встановлені електричні і енергетичні показники, а в табл.3.3 представлені експериментальні дані поверхневих електромагнітних параметрів (магнітна індукція, напруженість електричного поля, густина потоку електромагнітного випромінювання) дослідного зразка базового ШЕМП. Поверхневі електромагнітні параметри визначались в режимі короткого замикання на мінімально можливій відстані 1 мм від циліндричної поверхні ротора.

Принципову схему вимірювального стенду для реєстрації осцилограм струмів з застосуванням датчиків струму ACS758 на ефекті Холла з чутливістю 40 мВ/А наведено на рис.3.18.

Таблиця 3.2. Експериментально встановлені електричні і енергетичні показники дослідного зразка базового ШЕМП

Напряга живлення, В	Споживана активна потужність, Вт		Струм в режимі КЗ, А		Струм при навантаженні, А		Пусковий момент модуля, Н·м	Коефіцієнт потужності		Ковзання
	режим навантаження	режим КЗ	загальний	модуля	загальний	модуля		режим навантаження	режим КЗ	
60,5	1120	1320	23,17	11,6	23	11,5	4	0,508	0,546	0,84
70	1594	1876	27,5	13,75	26,2	13,1	5,6	0,5	0,556	0,73
77	1878	2266	30,12	15,7	28,5	14,3	12,3	0,492	0,562	0,63
81	2040	2384	33,7	22,5	29,8	14,9	13,7	0,486	0,57	0,55

Таблиця 3.3. Експериментально встановлені електромагнітні параметри на поверхні ротора дослідного зразка ШЕМП

Зона виміру	Параметри при напрузі живлення $U = 81$ В			Температура, °С
	Магнітна індукція, мТ	Напруженість електричного поля, В/м	Густина потоку електромагнітного випромінювання, мВт/м ²	
1	60	0,03	0,7	28,5
2	100	0,03	0,9	30,5
3	170	0,03	1,8	41,2
4	400	0,2	523	61
5	380	0,15	520	63,3
6	410	0,15	525	63,1

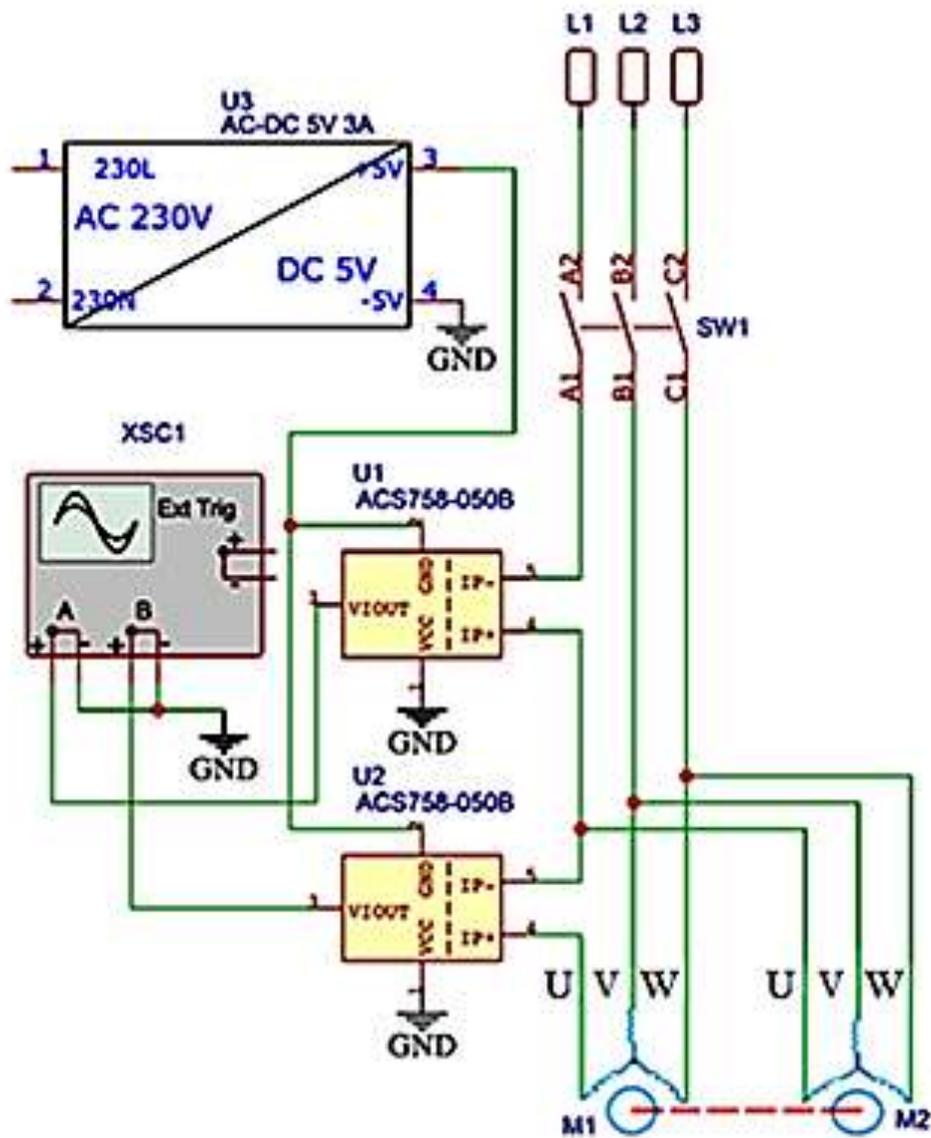
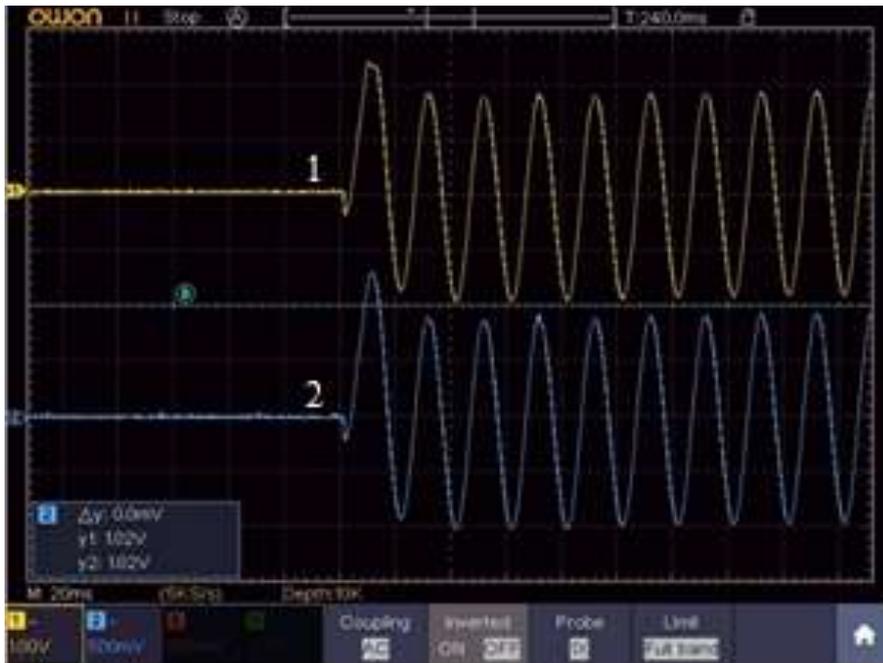


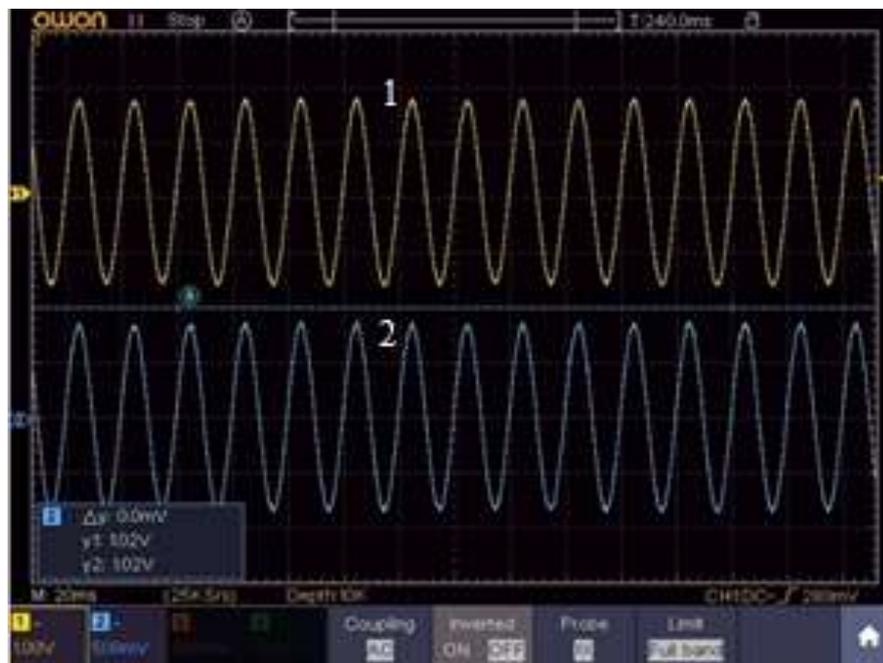
Рис.3.18. Принципова схема вимірювального стенду для реєстрації осцилограм струмів

Осцилограми загального струму ШЕМП і струму окремого модуля при лінійній напрузі живлення $U = 81 \text{ В}$ наведені на рис.3.19. Впродовж 7 хвилин роботи ШЕМП через зміну параметрів електромагнітної системи спостерігається зменшення амплітуд і діючих значень струмів до 5 %.

Здійснено порівняння розподілу температурного поля на поверхні ротора дослідного зразка ШЕМП з результатами моделювання. Термограми дослідного зразка з довільним азимутальним розташуванням лобових частин суміжних статорів (рис.3.20) одразу зафіксовані в режимі зупинки ротора після 7 хвилин обертання на неробочому ході при напрузі 81 В, частоті обертання 450 об/хв.



а)



б)

Рис. 3.19 Осцилограми загального струму (1) і струму окремого модуля (2) ШЕМП: а - період пускового режиму, б –режим після 7 хвилин роботи при навантаженні

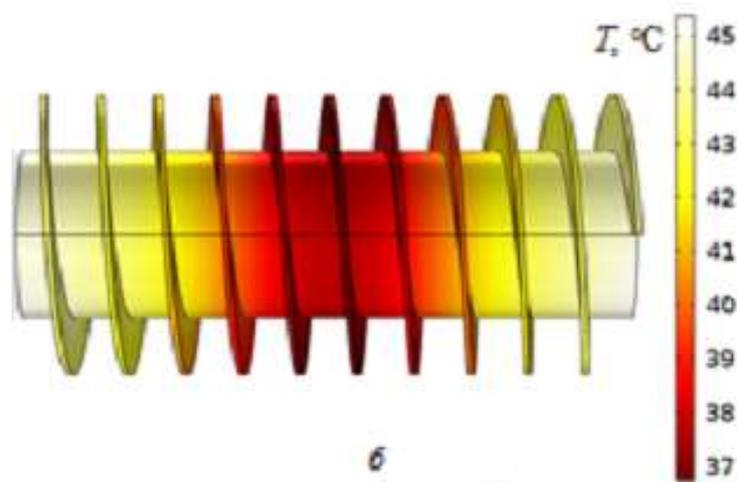
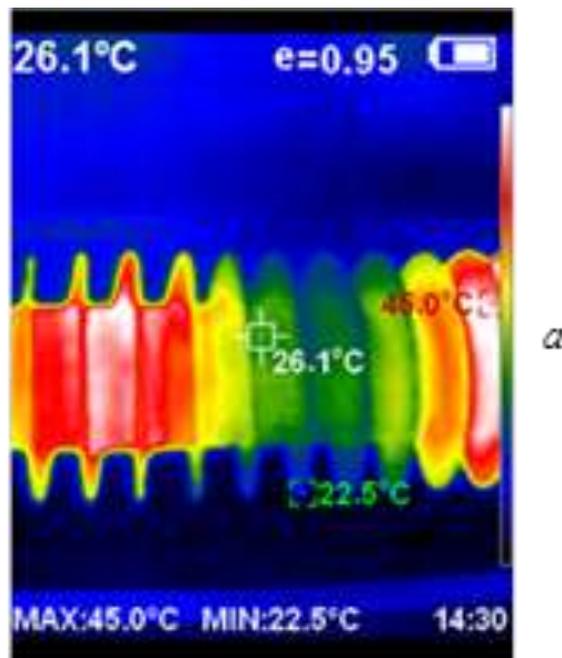


Рис.3.20. Порівняння розподілу температур на поверхні ротора ШЕМП: а – експериментальна термограма дослідного зразка; б – температурне поле по результатам моделювання

Порівняння результатів експериментальних досліджень (табл. 3.2, 3.3, рис. 3.19, 3.20) з результатами моделювання вказують на те, що параметри модуля ШЕМП, а саме: пусковий момент і струм; момент і струми при навантаженні, густина магнітного поля, температури поверхні ротора, з точністю до 11 % співпадають з розрахунковими. Це свідчить про адекватність математичної моделі ШЕМП.

ВИСНОВОК

1. На сьогодні формується перспективний клас поліфункціональних електромеханічних перетворювачів енергії, в яких передбачена конструктивна і

функціональна інтеграція з ланками технологічних процесів, що забезпечує формування поліфункціональних електромеханічних агрегатів (ПЕМА). При цьому всі види дисипативної складової енергії електромеханічних перетворювачів використовуються в технологічному процесі, зокрема, для переробки сировинних матеріалів.

2. Шнековий електромеханічний перетворювач (ШЕМП) –термодинамічна відкрита система, яка енергетично взаємодіє з технологічним середовищем. Визначення закономірностей здійснюється для системи, яка перебуває в нерівноважному стані без урахування молекулярної будови ШЕМП.

3. Для досліджень процесів руху сировинного матеріалу в шнековій зоні ШЕМП застосовується математична модель, що визначає поведінку деформованих тіл при статичних і динамічних навантаженнях (механічні сили, температура, електромагнітні поля).

4. Для характеристики реального режиму навантаження ШЕМП, в якому процеси можна віднести до інфранизькочастотних, застосовується математична модель, яка містить складову, що характеризує стохастический характер зміни властивостей й інтенсивності потоку завантаження речовини, а також пульсуючу складову.

5. Для підвищення енергетичних показників і величини електромагнітного моменту доцільним є впровадження ємнісної внутрішньої компенсації реактивної складової струму. До мережі живлення приєднуються дві напів - обмотки: робоча обмотка, яка створена однією з паралельних віток, а друга паралельна вітка утворює додаткову обмотку, яка зміщена у пазах статора на 30° відносно робочої обмотки і має послідовно включену електричну ємність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електричні поліфункціональні агрегати в технологіях переробки дисперсних речовин: Монографія/ М.М.Заблудський, В.Є.Плюгін, В.Ю. Грицюк.– Київ: ЦП «Компринт», 2017.-316 с.

2. Zablodskiy, M. M., Chuenko, R. M., Kovalchuk, S. I., Kruhliak, H. V., & Kovalchuk, O. I. (2024). Внутрішня ємнісна компенсація реактивної потужності шнекового електромеханічного перетворювача. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (3), 11-21.

3. AC/DC Module User's Guide. COMSOL Inc., Burlington, MA, USA, 2018.

4. Zablodsky N., Chuenko R., Gritsyuk V., Kovalchuk S., Romanenko O. The Numerical Analysis of Electromechanical Characteristics of Twin-Screw Electromechanical Hydrolyzer. 2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), 2021, pp. 130-135. doi: <https://doi.org/10.1109/ACIT52158.2021.9548392>.

5. Heat Transfer Module User's Guide. COMSOL Inc., Burlington, MA, USA, 2018.

ПИТАННЯ ДЛЯ ОБГОВОРЕННЯ ТА САМОПЕРЕВІРКИ

1. В яких перетворювачах енергії всі види дисипативної складової енергії використовуються в технологічному процесі, зокрема, для переробки сировинних матеріалів?

2. Які складові формують термодинамічну гетерогенну систему шнекового електромеханічного перетворювача?

3. Як побудована математична модель для досліджень процесів руху сировинного матеріалу в шнековій зоні ШЕМП? Які закони енергетичних перетворень при цьому застосовуються?

4. Запропонуйте варіанти динамічних моделей навантаження шнекового електромеханічного перетворювача.

5. Опишіть спосіб підвищення енергетичних показників поліфункціональних електромеханічних перетворювачів.

РОЗДІЛ 4. ОПТИЧНІ ТА ФОТОЕЛЕКТРОКАТАЛІТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ

4.1. Загальні закономірності перетворення оптичної енергії

Закономірності перетворення оптичної енергії або енергії оптичного випромінювання сформульовано дещо відмінно від перетворень інших видів енергії, зокрема тому, що дослідження її природи і взаємодії з навколишнім світом проводилось з давніх часів різними доступними методами і відповідно тогочасним уявленням про світ.

В даний час узагальнюючим є представлення оптичної енергії наступним чином:

Оптичне випромінювання – це особливий вид матерії, який має властивості хвилі та частинки.

При розповсюдженні в просторі (середовищі) від джерела оптичного випромінювання його енергія передається у вигляді хвильового коливання. Величина енергії визначається довжиною хвилі, амплітудою і просторовим кутом.

*При взаємодії із структурами поверхні сприймаючого тіла, на яке оптичне випромінювання падає, прийнято вважати, що діє потік частинок (**квантів - фотонів**), енергія яких прямо пропорційна частоті коливання хвилі при розповсюдженні її в просторі від джерела.*

Коротка історія формування бачення людством природи оптичного випромінювання. Природа світла була предметом досліджень з часів античності. У сімнадцятому столітті Ісаак Ньютон проводив експерименти з лінзами та призмами та зміг продемонструвати, що біле світло складається з окремих кольорів веселки, об'єднаних разом. Ньютон пояснив свої оптичні відкриття з точки зору «корпускулярного» погляду на світло, в якому світло складалося з потоків надзвичайно крихітних різних частинок, що рухаються з високою швидкістю відповідно до законів руху Ньютона.

Інші вчені в сімнадцятому столітті, наприклад, Християн Гюйгенс, показали, що оптичні явища, такі як відбиття та заломлення, можна також добре пояснити з точки зору світла, як хвилі, що рухаються з високою швидкістю через середовище під назвою «світловий ефір», яке, як вважалося, пронизує весь простір.

На початку дев'ятнадцятого століття Томас Янг експериментально продемонстрував, що світло, проходячи крізь вузькі, близько розташовані щілини, створює інтерференційні картини, які неможливо пояснити з точки зору ньютонівських частинок, але легко можна пояснити з точки зору хвиль. Пізніше в дев'ятнадцятому столітті, після того, як Джеймс Клерк Максвелл розробив свою теорію електромагнітного випромінювання та показав, що світло є складовою (видимою) частиною широкого спектру електромагнітних хвиль, корпускулярний погляд на світло був повністю дискредитований.

До кінця дев'ятнадцятого століття вчені розглядали фізичний Всесвіт як такий, що приблизно складається з двох окремих областей: матерії, що складається з частинок, що рухаються відповідно до законів руху Ньютона, та електромагнітного випромінювання, що складається з хвиль, що керуються рівняннями Максвелла.

Наступний парадокс у класичній теорії, який потрібно було вирішити, стосувався фотоелектричного ефекту. Було помічено, що електрони можуть викидатися з чистої поверхні металу, коли на неї спрямоване світло з частотою, що перевищує деяку порогову частоту. Дивно, але кінетична енергія викинутих електронів не залежала від яскравості світла, а зростала зі збільшенням частоти світла. Оскільки електрони в металі мали певну енергію зв'язку, яка утримувала їх там, падаюче світло потребувало більшої енергії, щоб вивільнити електрони. Згідно з класичною хвильовою теорією, енергія хвилі залежить від її інтенсивності (яка залежить від її амплітуди), а не від її частоти. Одним з результатів цих спостережень було те, що кількість електронів, викинутих протягом певного періоду часу, збільшувалася зі збільшенням яскравості.

У 1905 році Альберт Ейнштейн зміг пояснити цей парадокс, включивши висновки Планка про квантування в дискредитований корпускулярний погляд на світло (Ейнштейн насправді отримав Нобелівську премію за цю роботу, а не за свої теорії відносності, якими він найбільш відомий).

Ейнштейн стверджував, що квантовані енергії, постульовані Планком у його трактуванні випромінювання чорного тіла, можна застосувати до світла у фотоелектричному ефекті, так що світло, яке падає на поверхню металу, слід розглядати не як хвилю, а як потік частинок (пізніше названих фотонами).

Енергія фотона пропорційна частоті електромагнітних коливань ν і обернено пропорційна довжині хвилі λ :

$$W_{\phi} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (4.1)$$

де $h \cong 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постійна Планка;

$c = 3 \cdot 10^8$ м·с⁻¹ – швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі.

Між швидкістю поширення світла у вакуумі, довжиною хвилі і частотою коливань існує залежність

$$\lambda = \frac{c}{\nu}. \quad (4.2)$$

Електрони викидаються, коли на них потрапляють фотони з достатньою енергією (частота, більша за поріг). Чим більша частота, тим більша кінетична енергія, що передається електронам, які вилітають внаслідок зіткнень. Ейнштейн також стверджував, що інтенсивність світла не залежить від амплітуди вхідної хвилі, а відповідає кількості фотонів, що потрапляють на поверхню протягом заданого періоду часу. Це пояснює, чому кількість викинутих електронів збільшується зі збільшенням яскравості, оскільки чим більша кількість вхідних фотонів, тим більша ймовірність того, що вони зіткнуться з деякими з електронів.

З відкриттями Ейнштейна природа світла набула нового шару таємничості. Хоча багато світлових явищ можна пояснити або з точки зору хвиль, або частинок, деякі явища, такі як інтерференційні картини, що виникають, коли світло проходить через подвійну щілину, повністю суперечили корпускулярному погляду на світло, тоді як інші явища, такі як фотоелектричний ефект, повністю суперечили хвильовому погляду на світло. Якимось чином, на глибокому фундаментальному рівні, який досі не до кінця зрозумілий, світло є одночасно хвилеподібним і корпускулярним. В даний час ці парадокси призвели до сучасної концепції, яка тісно пов'язує частинки та хвилі на фундаментальному рівні, який називається корпускулярно-хвильовим дуалізмом, що витіснив класичний погляд.

Корпускулярне бачення видимого світла та інші форми електромагнітного випромінювання відіграють важливу роль у біології, хімії, оскільки їх можна використовувати для визначення енергії електронів в атомах і молекулах. Проте значна частина сучасних технологій базується і на електромагнітному випромінюванні, як хвильовій передачі енергії.

4.1.1. Основні енергетичні величини і одиниці їх вимірювання

Розповсюдження оптичного випромінювання нерозривно пов'язане з перенесенням енергії від випромінюючого тіла до поглинаючого. Це перенесення здійснюється в просторі за допомогою електромагнітних коливань.

Енергія оптичного випромінювання W має розмірність властиву будь-якій формі енергії і вимірюється в джоулях (Дж). На практиці частіше необхідно знати не енергію випромінювання, а її потужність (потік випромінювання).

Потоком (потужністю) випромінювання Φ (Дж/с=Вт) називають енергію випромінювання, що переноситься за одиницю часу від джерела випромінювання до опромінюваного об'єкту:

$$\Phi_e = \frac{dW}{dt}, \quad (4.3)$$

де dW – енергія випромінювання, що передається за час dt , Дж;

dt – проміжок часу, на протязі якого випромінювання може бути сприйнятим, с.

Просторова щільність випромінювання від джерела називається *силою випромінювання* I (Вт · ср⁻¹) і визначається відношенням потоку випромінювання до тілесного кута, у якому він рівномірно розподілений:

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega}, \quad (4.4)$$

де ω – значення тілесного кута. Одиниця вимірювання тілесного кута – стерadian (ср).

Тілесний кут ω – це конічне просторове тіло, вершиною якого служить центр сфери довільного радіуса, а основою – частина поверхні цієї сфери, на яку цей конус опирається. Величина тілесного кута визначається відношенням площі основи сферичної частини конуса до квадрату радіуса.

$$\omega = \frac{A}{R^2}. \quad (4.5)$$

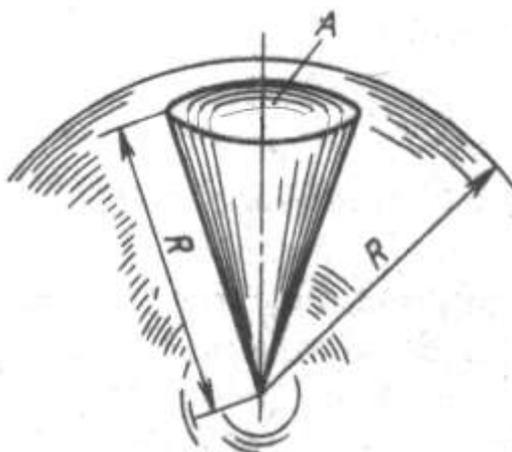


Рис. 4.1. Тілесний кут просторового випромінювання від точкового джерела

Щільність випромінювання R_e ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$) являє собою відношення потоку випромінювання від джерела до площі його випромінюючої поверхні

$$R_e = \frac{d\Phi_e}{dS_e}, \quad (4.6)$$

де dS_n – площа поверхні випромінюючого тіла, в межах якої випромінювання можна вважати рівномірним.

Енергетична опроміненість E_e поверхні сприймаючого тіла являє собою відношення потоку випромінювання, що падає на опромінювану поверхню, до площі цієї поверхні ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$):

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad (4.7)$$

Кількість енергії опромінення H_e (доза, або експозиція), яку отримує поверхня опромінюваного тіла за час опромінення ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}$)

$$H_e = E_e dt. \quad (4.8)$$

Енергія фотонів поглинутого випромінювання, яка спричиняє відповідну дію при опромінюванні об'єкта оптичним випромінюванням складного спектрального складу, визначається з виразу:

$$W = \int^t \int^\lambda \phi(\lambda, t) \cdot k(\lambda) d\lambda dt \quad (4.9)$$

де $\phi(\lambda, t)$ - спектральна інтенсивність потоку випромінювання від джерела;
 $k(\lambda)$ – спектральна реакційна ефективність поглинутого випромінювання;
 λ – довжина хвилі випромінювання; t – час опромінювання.

Системи ефективних величин біологічної дії і одиниці їх вимірювання

Енергія оптичного випромінювання безпосередньо діє на людей, тварин, рослини, мікроорганізми та інше. Основні види фотобіологічної дії наступні:

Світлова дія виражається в зоровому відчутті людини чи тварини, що дозволяє їй отримувати інформацію про навколишнє середовище та та орієнтуватися в ньому. Світло, крім формування зорового образу, суттєво впливає на біологічний стан людей і тварин, воно відіграє домінуючу роль в регулюванні добових і сезонних психологічних ритмів, безпосередньо чинить стимулюючу дію на настрої людини зміною спектрального складу (кольору) та інтенсивності випромінювання.

Фотосинтезна дія узагальнює дію світла на рослини і виражається в тому, що видиме випромінювання енергетично забезпечує процес фотосинтезу, в результаті якого в зелених рослинах із мінеральних речовин та води синтезуються органічні речовини для їх розвитку та виділяється кисень.

Фотоперіодична дія проявляється в тому, що при зміні тривалості періодів освітленості (опроміненості) і темноти спричиняється вплив на швидкість розвитку рослин, тварин і птиці.

Терапевтична дія полягає в наступному. Опромінення людей, тварин, птиці дозованою кількістю ультрафіолетового, видимого або інфрачервоного випромінювання, покращує обмін речовин, підвищує стійкість організму проти інфекційних захворювань.

Бактерицидна дія полягає в тому, що опромінення ультрафіолетовим випромінюванням та, у великих дозах, видимим або інфрачервоним випромінюванням викликає загибель вірусів, шкідливих мікроорганізмів, комах тощо.

Мутагенна дія оптичного випромінювання залежить від тривалої дії на біологічні об'єкти високоенергетичним ультрафіолетовим випромінюванням області В і С. Вона проявляється у виникненні спадкових змін, які можна використати для виведення рослин та інших організмів з новими властивостями.

Тому при створенні систем ефективних величин і одиниць вимірювання різної дії оптичного випромінювання прийняли еталонні приймачі, а саме: для світлової дії – усереднене око людини, для вітальної (еритемної) дії – шкіру

людини, для фотосинтезної дії – усереднений листок рослини, для бактерицидної дії – загибель бактерій.

Система фотосинтезних величин і одиниці вимірювання

Еталонним приймачем прийнято усереднений спектр ефективного поглинання листка рослини. У цій системі оцінюється дія оптичного випромінювання з довжиною хвилі 300-750 нм на фотосинтез (рис.4.2), що відбувається в листі рослин.

Ефективний потік в цій системі називають фітопотокком і вимірюють його в фітах (*фiт*). Фітопотік показує, скільки в загальному випромінюванні міститься енергії, доступної рослинам для здійснення фотосинтезу.

Відносна спектральна ефективність фотосинтезу має вигляд, наведений на рис. 4.2. Максимальна ефективність фотосинтезу досягається при $\lambda = 0,680$ мкм.

Ефективний потік випромінювання в рослинництві – *фiтопотік* – визначається за виразом:

$$\phi_{\phi} = (g_{\lambda}) \int_{\lambda=300}^{\lambda=750} \phi(\lambda) K(\lambda) \phi_{max}, \quad (4.9)$$

де $(g_{\lambda})_{max}$ – максимальна спектральна фотосинтезна ефективність оптичного випромінювання, що дорівнює 0,95.

Просторова щільність фітопотіку (*фiт·ср⁻¹*), під якою розуміється відношення фітопотіку до тілесного кута, в межах якого він рівномірно розподіляється від джерела в просторі:

$$I_{\phi} = \frac{d\phi_{\phi}}{d\omega}. \quad (4.10)$$

Фітоопроміненість (*фiт·м⁻²*), під якою розуміється відношення фітопотіку, що падає на площу опромінення:

$$E_{\phi} = \frac{d\phi_{\phi}}{dS} \quad (4.11)$$

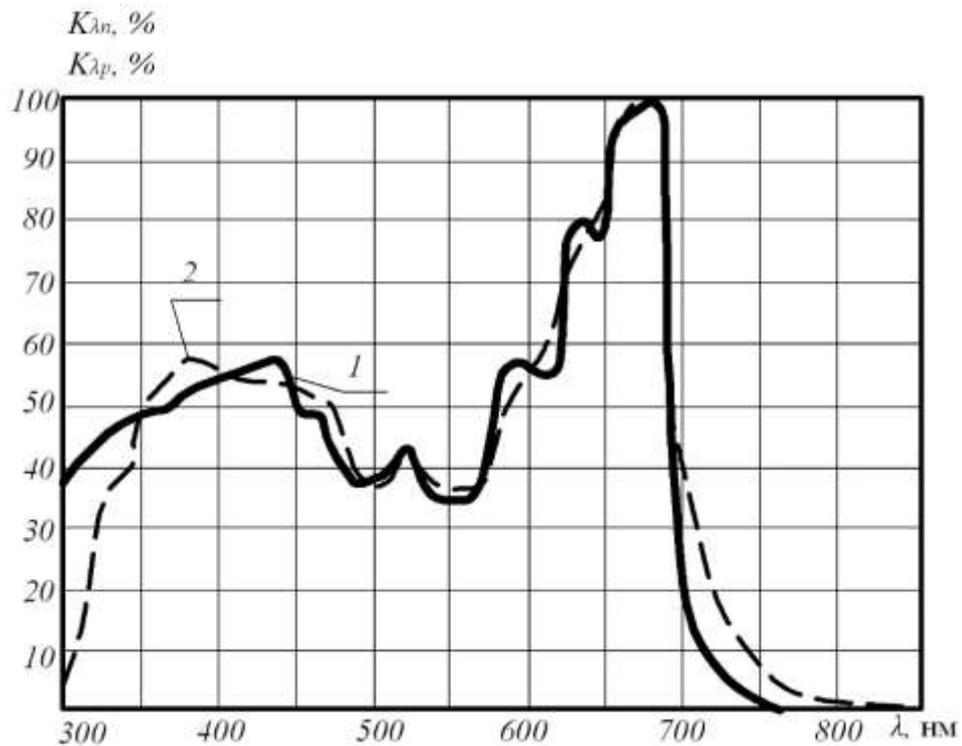


Рис. 4.2. Спектральна характеристика ефективності фотосинтезу (спектр фотосинтезної дії оптичного випромінювання) : 1 – спектр ефективного поглинання усередненого листа рослин; 2 – спектр чутливості вимірювального давача фітометра

Кількість енергії фітоопромінення (доза), ($\text{фiт}\cdot\text{м}^2\cdot\text{с}$) – значення фотосинтетичної активної енергії випромінювання, що досягла опроміненої поверхні протягом часу опромінення:

$$H_{\Phi} = \int_{t_1}^{t_2} E_{\Phi I} dt. \quad (4.12)$$

Світлова (зорова) система видимого випромінювання

За допомогою очей людина отримує більшу частину інформації, що надходить з навколишнього середовища.

Світлооптична частина ока складається, в основному, з опуклої лінзи – кришталіка, діафрагмованого отвором в радужній оболонці – зіницею. Кришталік-лінза фокусує на світлочутливій поверхні сітківки, яка покриває внутрішню поверхню ока, дійсне, зменшене, обернене зображення предметів.

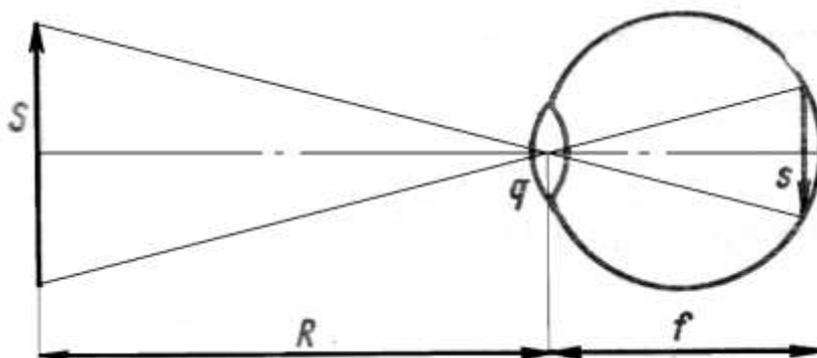


Рис. 4.3. Модель отримання зображення на сітківці ока

Схема отримання цього зображення наведена на рис 4.3. Якщо яскравість предмета L , а площа його проекції на площину, перпендикулярну вісі зору S , то до ока спрямована сила світла LS . При відстані до предмета R і площі зіниці q на неї падає світловий потік Φ :

$$\Phi = \frac{LSq}{R^2}, \quad (4.13)$$

Всередину ока до поверхні сітківки доходить потік, зменшений на коефіцієнт пропускання τ середовища ока. Цей потік розподіляється по площі зображення предмета s , яка при фокусній відстані f визначається співвідношенням

$$s = \frac{Sf^2}{R^2}, \quad (4.14)$$

на цій площі сітківки створюється освітленість E :

$$E = \Phi/s = L\tau q/f^2. \quad (4.15)$$

Сітківка має складну будову і складається з набору приймачів світла (паличок і колбочок), наповнених чутливим до світла пігментом – родопсином, і з'єднаних з нервовими клітинами, від яких імпульси електричного збудження молекул родопсину, створені енергією поглинутих фотонів, передаються по зоровому нерву, який зв'язує очне яблуко з головним мозком.

Всього внутрішня поверхня сітківки ока має біля 130 000 000 паличок і 7 000 000 колбочок, які розрізняються як по своїй формі, так і по чутливості. На оптичній вісі ока розміщена центральна „ямка” (від її латинської назви *fovea centralis* утворився термін „фовеальний зір”, на відміну від периферійного), в якій зосереджені тільки колбочки. Кутовий розмір цієї ямки близько $1,5^\circ$. Вона є центром чіткого зору. Поза нею переважають палички. Палички приєднані до волокон зорового нерва великими групами (з'єднані паралельно), колбочки приєднані до цих волокон по одній або декілька штук (в межах центральної

ямки). Завдяки цьому чітке розпізнавання образу досягається лише фовеальним (центральним) зором.

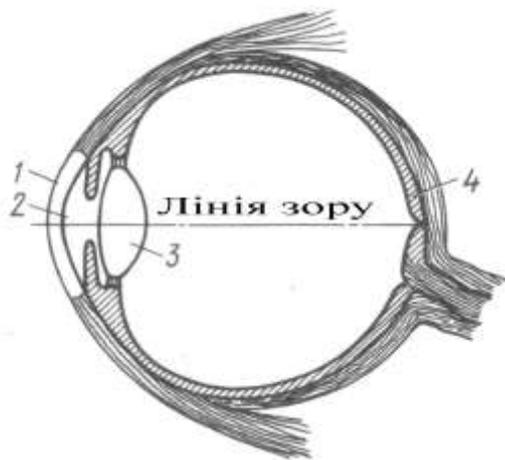


Рис.4.4. Будова ока людини:

- 1 – рогова оболонка;
- 2 – зіниця;
- 3 – кришталик;
- 4 – світлочутлива сітківка з паличок і колбочок.

Процес відновлення світлочутливої речовини (родопсину) відбувається в паличках значно повільніше, ніж в колбочках, відрізняється також їх чутливість до різних довжин хвиль видимого випромінювання: для колбочок максимум чутливості $\lambda = 555$ нм (денний зір); для паличок – $\lambda = 515$ нм (нічний зір). Причому палички, на відміну від колбочок, взагалі не розрізняють кольорів.

При дуже низьких рівнях яскравості реагують палички, які „ввімкнені паралельно” великими групами, а не колбочки. Навпаки, при високих рівнях яскравості працюють колбочки.

Функціонально розрізняють денний, нічний і сутінковий зір. Денний зір – зір нормального ока при яскравості понад 10 кд/м^2 (освітленість поверхні не менше 50 лк); нічний зір – при яскравості $0,01 \text{ кд/м}^2$ (при освітленості не більше $0,05 \text{ лк}$ тієї ж поверхні).

Прийняття ока до розпізнавання видимого об'єкта здійснюється поетапно шляхом:

- *акомодациї*, тобто зміни кривизни кришталика таким чином, щоб зображення предмета опинилось в площині „ямки” сітківки (наведення на фокус);
- *конвергенції*, тобто повороту осей зору обох очей так, щоб вони перетинались на об'єкті розпізнавання;
- *адаптації*, тобто пристосування ока до даного рівня яскравості.

Для техніки освітлення особливе значення має процес адаптації.

Відомо, що при переході із світлого приміщення в темне здатність розрізняти деталі зростає поступово, і навпаки, при виході із темного приміщення на яскраве світло спочатку виникає стан засліпленості.

При переході від високих яскравостей до темноти процес повної адаптації відбувається повільно і закінчується за 1 – 1,5 год. Зворотний процес відбувається швидше і триває 5 – 10 хв. Слід відмітити, що в період процесу адаптації око працює з пониженою працездатністю, тому необхідно уникати створення умов, вимагаючих частої і „глибокої” переадаптації.

В природі всі джерела мають *спектр випромінювання* ($\lambda_1 \dots \lambda_i$) (наприклад, спектр сонця ми бачимо, коли на небі радуга). Немає спектру випромінювання у лазера (є монохроматичне випромінювання однієї довжини хвилі). Тому на практиці широко застосовуються *спектри випромінювання* (у вигляді графіку або таблиці).

Дана система використовується для вимірювання зорової дії оптичного випромінювання видимої ділянки спектру (380...760 нм).

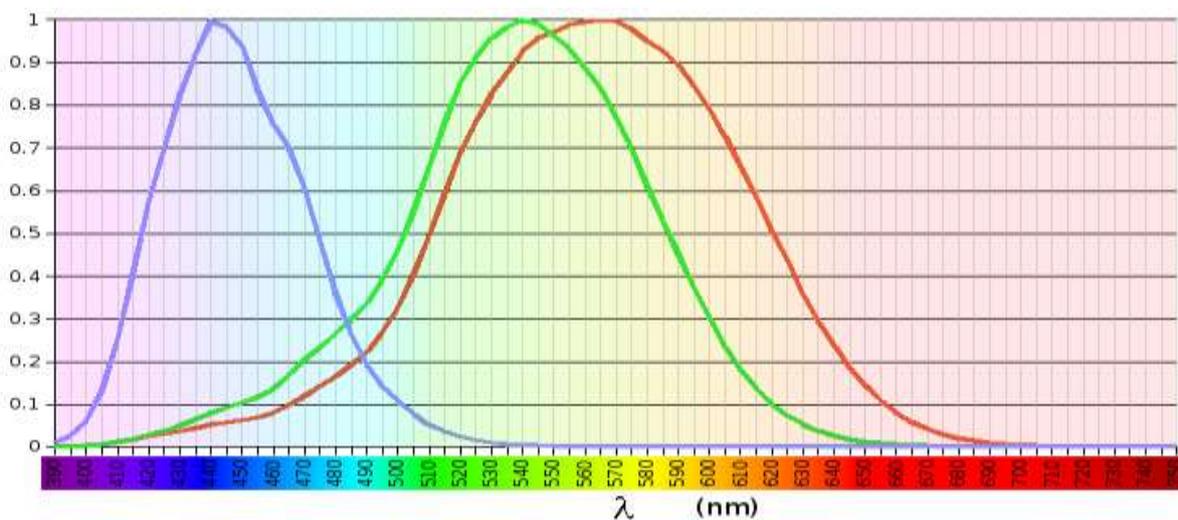


Рис.4.5. Усереднений спектр чутливості ока людини (червоний)

За одиницю *світлового потоку* прийнято люмен (лм). Експериментально встановлено, що однорідне випромінювання з довжиною хвилі 555 нм потужністю 1 Вт спричиняє максимальну видимість і має величину в 683 лм світлового потоку. Число 683 називають *світловим еквівалентом потужності* джерела видимого випромінювання.

Просторову щільність світлового потоку називають *силою світла* (I) (Вт/ср = 1 кд).

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (4.16)$$

За одиницю *сили світла* прийнята кандела (кд). Силу світла в 1 кд випромінює в перпендикулярному напрямі елемент поверхні абсолютно чорного тіла площею $1/600000 \text{ м}^2$ при температурі затвердіння платини (2045 К) і тиску 101325 Па.

Щільність падаючого світлового потоку на поверхні, що освітлюється, називають *освітленістю* (E). Вона являє собою відношення світлового потоку, що падає на поверхню, до величини її площі :

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (4.17)$$

За одиницю *освітленості* прийнято люкс (лк = лм/м²).

Система величин для визначення ефективності бактерицидної дії

Вихідною величиною в системі бактерицидних величин служить *бактерицидний потік*, який визначається як потік випромінювання, оцінений за його бактерицидну дію, тобто за ефективністю знищення бактерій.

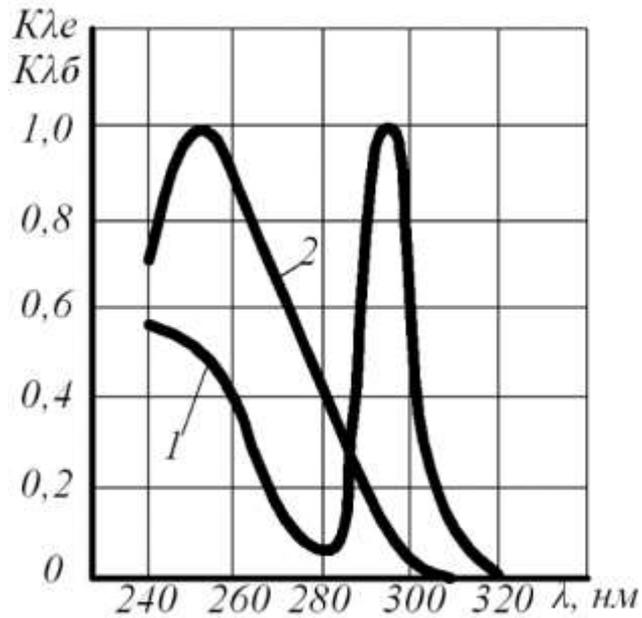


Рис. 4.6 – Спектри дії ультрафіолетового випромінювання: 1 – спектр еритемної дії УФ випромінювання на тварин і птицю; 2 – спектр бактерицидної дії УФ випромінювання

$$\Phi_B = \int_{\lambda=200\text{nm}}^{\lambda=300\text{nm}} \phi(\lambda)K(\lambda)_B d\lambda, \quad (4.18)$$

де $K(\lambda)$ – відносна бактерицидна ефективність випромінювання наведеного спектру дії.

Одиницею бактерицидного потоку прийнято вважати *бакт*, чисельно рівний випромінюванню потужністю в 1 Вт при $\lambda=254$ нм. У практиці часто користуються величиною *мікробакт*, яка дорівнює $1 \cdot 10^{-6}$.

Щільність бактерицидного потоку по поверхні опромінення тіла називається *бактерицидним опроміненням* ($\text{бк} \cdot \text{м}^{-2}$ або $\text{мкбк} \cdot \text{м}^{-2}$):

$$E_B = \frac{d\Phi_B}{dS}. \quad (4.19)$$

де S – площа опромінюваної поверхні, м².

Силою бактерицидного випромінювання ($\text{бк}\cdot\text{ср}^{-1}$) називається просторова щільність бактерицидного потоку, що дорівнює відношенню бактерицидного потоку до значення просторового тілесного кута, в середині якого рівномірно розподілено випромінювання :

$$I_B = \frac{d\Phi_B}{d\omega}. \quad (4.20)$$

де ω – телесний кут, в якому розповсюджується бактерицидний потік.

Головною розрахунковою величиною є доза (кількість) бактерицидного опромінення (експозиція бактерицидного опромінювання, ($\text{бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}$), що визначається кількістю енергії бактерицидного випромінювання, яка впала на одиницю поверхні опромінюючого тіла:

$$H_B = \int_{t_1}^{t_2} E_{\text{бі}} dt \quad (4.21)$$

де t – час опромінення, с .

Система еритемної (антирахітної, або терапевтичної) дії ультрафіолетового випромінювання на тварин та їх одиниці

Еталонним приймачем енергії випромінювання для побудови системи еритемних величин є шкіра людини, реакція якої виражається в почервонінні ділянки, що піддалася опроміненню..

Вихідною величиною в системі еритемних величин є *еритемний потік* (e_p), який визначається як потік випромінювання, оцінений за його еритемною дією:

$$\Phi_E = \int_{\lambda=280\text{нм}}^{\lambda=320\text{нм}} \phi(\lambda)K(\lambda)_E d\lambda, \quad (4.22)$$

де $K(\lambda)_e$ - відносна еритемна ефективність випромінювання.

Одиницею еритемного потоку служить e_p , чисельно рівний випромінюванню потужності 1 Вт при $\lambda = 297 \text{ нм}$.

Щільність еритемного потоку на поверхні опромінюючого тіла називається *еритемною опроміненістю* ($e_p\cdot\text{м}^{-2}$):

$$E_E = \frac{d\Phi_E}{dS}. \quad (4.23)$$

Силою еритемного опромінення ($e_p\cdot\text{ср}^{-1}$) називається просторова щільність потоку, що дорівнює відношенню еритемного потоку до значення тілесного кута, в якому рівномірно розподілено випромінювання

$$I_E = \frac{d\Phi_E}{d\omega}. \quad (4.24)$$

Кількістю еритемного опромінення (доза), ($\text{ер}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}$) називається кількість енергії еритемного випромінювання, яка постуила за одиницю часу на опромінену поверхню тварини:

$$H_E = \int_{t_1}^{t_2} E_{ei} dt. \quad (4.25)$$

Максимум еритемної кривої приходить на довжину хвилі 297 нм (рис.4.7).

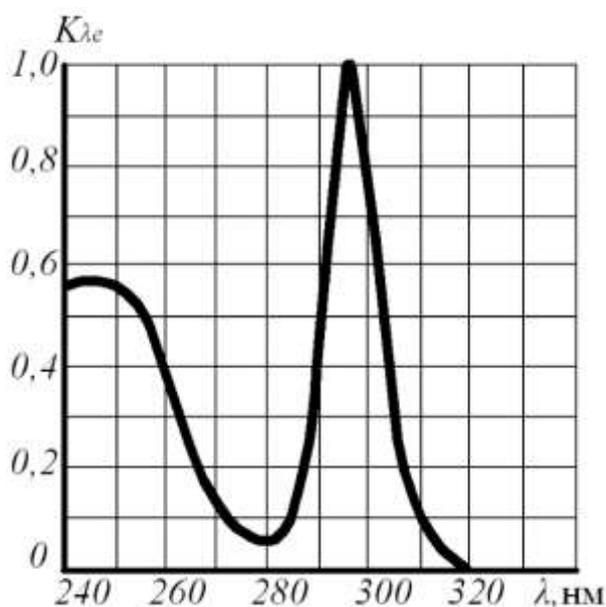


Рис.4.7 – Спектр еритемної дії ультрафіолетового випромінювання на тваринний організм

Основні системи ефективних величин і їх одиниці вимірювань узагальнені і представлені в табл.4.1.

Таблиця 4.1. Основні системи ефективних величин і їх одиниці вимірювань

		300 нм				750 нм				
		Фотосинтез								
		Основні величини і одиниці вимірювання								
		Φ_{ϕ} – фитопотік, $\phi_{\text{фит}}$ (фіти), E_{ϕ} – фитоопроміненість, $\phi_{\text{фит}}/\text{м}^2$ I_{ϕ} – сила фитоопромінення, $\phi_{\text{фит}}/\text{ср}$ (стерадіан) N_{ϕ} – кількість фитоопромінення, $\frac{\text{мфит}\cdot\text{год}}{\text{м}^2}$								
Вакуумний УФ	УФ-С	УФ-В	УФ-А	Видиме випромінювання				ІЧ		
Длм-200нм Викликає бак-терцидну дію	200нм-280нм Викликає бак-терцидну дію	280нм-315нм Викликає вітальну дію	315нм-380нм Викликає пігменташню шкіри	380нм - 760нм Викликає світлову дію	760нм - 1мм Викликає теплову дію					
<i>Основні величини і одиниці вимірювання</i>										
Φ_{ϕ} – бактерцидний потік, $\phi_{\text{бак}}$ (бакти).	Φ_{ϕ} – бактерцид-на опроміненість, $\phi_{\text{бак}}/\text{м}^2$.	Φ_{ϕ} – вітальний потік, $\phi_{\text{віт}}$ (віти), або $\phi_{\text{р}}$.	Φ_{ϕ} – вітальний потік, $\phi_{\text{віт}}$ (віти), або $\phi_{\text{р}}$.	Φ_{ϕ} – вітальний потік, $\phi_{\text{віт}}$ (віти), або $\phi_{\text{р}}$.	Φ_{ϕ} – вітальний потік, $\phi_{\text{віт}}$ (віти), або $\phi_{\text{р}}$.	Φ_{ϕ} – світловий потік, $L_{\text{м}}$ (люмен)	E – Освітленість, $L_{\text{к}}$ (люкс)	I – Сила світла, $K_{\text{д}}$ (кандела)	M – Світність, $\text{Вт}/\text{м}^2$	C – Яскравість, $\text{Кд}/\text{м}^2$
N_{ϕ} – кількість бактерцидної опроміненості	N_{ϕ} – кількість вітальної опроміненості	N_{ϕ} – кількість вітальної опроміненості	N_{ϕ} – кількість вітальної опроміненості	N_{ϕ} – кількість вітальної опроміненості	N_{ϕ} – кількість вітальної опроміненості	Φ – Світловий потік, $L_{\text{м}}$ (люмен)	E – Освітленість, $L_{\text{к}}$ (люкс)	I – Сила світла, $K_{\text{д}}$ (кандела)	M – Світність, $\text{Вт}/\text{м}^2$	C – Яскравість, $\text{Кд}/\text{м}^2$
$\frac{\text{мбакт}\cdot\text{с}}{\text{с}\cdot\text{м}^2}$	$\frac{\text{мвіт}\cdot\text{год}}{\text{м}^2}$	$\frac{\text{мвіт}\cdot\text{год}}{\text{м}^2}$	$\frac{\text{мвіт}\cdot\text{год}}{\text{м}^2}$	$\frac{\text{мвіт}\cdot\text{год}}{\text{м}^2}$	$\frac{\text{мвіт}\cdot\text{год}}{\text{м}^2}$	Φ – Світловий потік, $L_{\text{м}}$ (люмен)	E – Освітленість, $L_{\text{к}}$ (люкс)	I – Сила світла, $K_{\text{д}}$ (кандела)	M – Світність, $\text{Вт}/\text{м}^2$	C – Яскравість, $\text{Кд}/\text{м}^2$
						$\Phi_{\text{ч}}$ – інфрачервоний потік - Вт .	$E_{\text{ч}}$ – інфрачервона опроміненість, $\text{Вт}/\text{м}^2$.	$I_{\text{ч}}$ – сила інфрачервоної опроміненості - $\text{Вт}/\text{ср}$. (стерадіан).	$N_{\text{ч}}$ – кількість інфрачервоної опроміненості	$\frac{\text{Вт}\cdot\text{год}}{\text{м}^2}$

4.2. Основні закономірності поглинання і перетворення оптичного випромінювання

4.2.1. Загальні положення

Оптичні електротехнології (ОЕТ) – це технології основані на використанні енергії оптичного випромінювання. Вони вирізняються в окремий ряд специфікою утворення, передачі та поглинання енергії випромінювання в процесі забезпечення необхідного технологічного ефекту.

Це обумовлено двома обставинами.

По-перше, великим різноманіттям об'єктів опромінювання, що розрізняються своєю природою, видом (тварини, рослини, водорості, дріжджі, продукція рослинництва і тваринництва...), фізичним станом опромінюваного середовища (газоподібний, рідкий, твердий, м'який...), а також специфічними механізмами дії оптичного випромінювання, обумовленими різними спектральними діапазонами випромінювання (ультрафіолетова, видима та інфрачервона ділянки спектру оптичного випромінювання), енергією фотонів та інтенсивністю опромінювання .

По-друге, використанням специфічного потоку *променистої енергії* – електромагнітного випромінювання, котре характеризується своїми особливими законами генерації, передачі та сприймання опромінюваним об'єктом.

Енергетичну дію на опромінювані об'єкти, зокрема, біологічні структури живих організмів спричиняє тільки енергія поглинутого випромінювання. Якісний і кількісний прояви цієї дії залежать від :

- глибини проникнення енергії випромінювання в структури,
- місця перетворення цієї енергії в інші види енергії,
- специфіки первинних фотохімічних реакцій, що проходять у взаємодіючих з оптичним випромінюванням біологічних та інших структурах;
- рівня самоорганізації об'єкту відносно використання, зберігання та перерозподілу поглинутої енергії.

Структурна схема взаємодії оптичного випромінювання з тваринним організмом приведена на рис. 4.8.

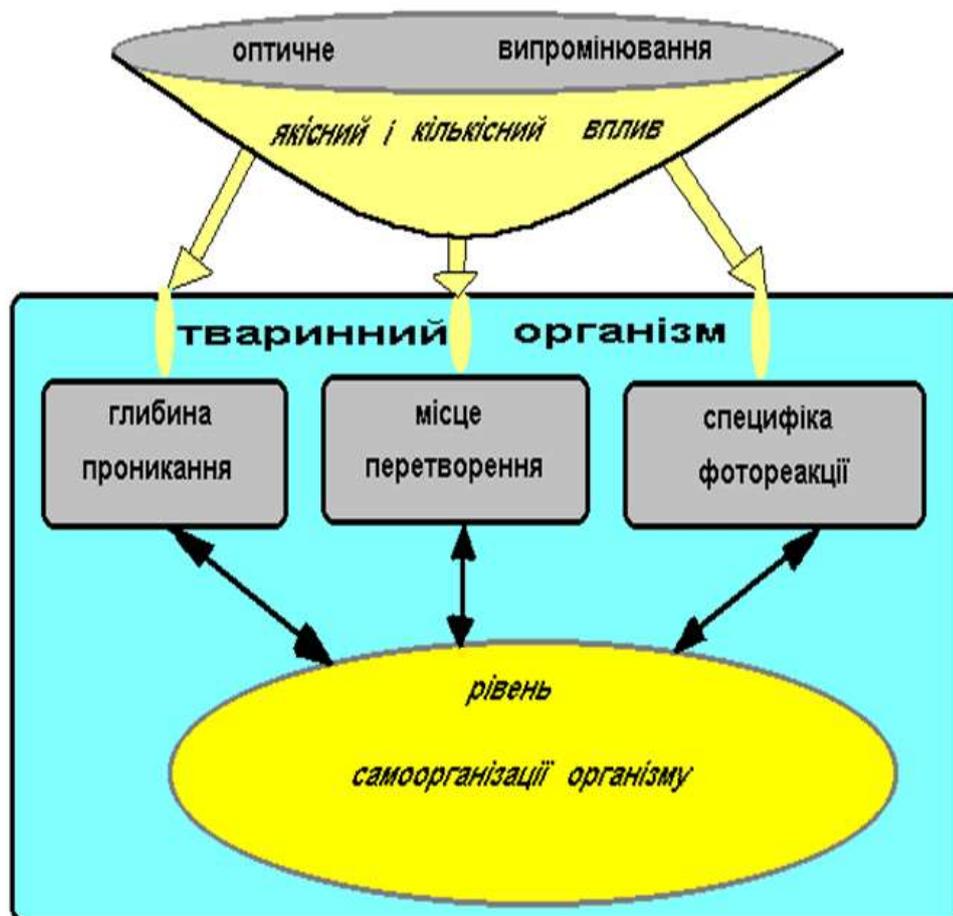


Рис.4.8. Структурна схема впливу оптичного випромінювання на тваринний організм

Енергія активації більшості хімічних реакцій лежить у межах від 0,86 до 4,34 еВ. Таку енергію несуть фотони від видимого до короткохвильового ультрафіолетового випромінювання. Кванти інфрачервоного випромінювання здатні викликати лише теплові коливання молекул, недостатні для фотохімічної реакції.

В даний час широко проводяться дослідження дії випромінювання на живі організми за допомогою оптичних квантових генераторів (лазерів), що дозволяють одержувати монохроматичне когерентне випромінювання конкретної довжини хвилі і тим самим, впливати на контрольовані ділянки молекул і одержувати в них відповідну селективну дію].

Значна частина сучасних досліджень приділяється вивченню дії ультрафіолетового випромінювання, оскільки це випромінювання викликає не тільки збудження, але іонізацію і дисоціацію біомолекул].

Найбільше різноманітний вплив робить ультрафіолетове випромінювання з довжиною хвилі 180 - 400 нм (енергією фотонів 6,5 - 3,1 еВ). Академік А. Н. Теренін вказує, що це випромінювання здатне викликати до дванадцяти видів різноманітних фізико-хімічних фотореакцій (флуоресценція, фосфоресценція,

інтерконверсія і т.п.) як між опроміненими молекулами, так і усередині молекул. До основних фотохімічних реакцій відносяться:

- фоторозподіл органічної молекули (фотоліз),
- фотоперегрупування,
- фотосенсibiliція,
- фотокаталіз,
- фотоіонізація,
- фотополімеризація.

Напрямок фотореакцій, що розвиваються при поглинанні видимого та ультрафіолетового випромінювання, залежить від величини дози (експозиції) опромінення.

Малі дози стимулюють процеси біосинтезу тканинних колоїдів, сприяють росту і розподілу клітин.

Великі дози - гнітять ріст і розподіл клітин, викликають фотоліз і денатурацію біоколоїдів, руйнують клітини і навіть убивають цілі організми. Першою ланкою кінцевого біологічного ефекту оптичного опромінювання є чисто фізичний процес поглинання випромінювання молекулами специфічних структур (фотопігментів :хлорофілу у рослин, родопсину, меланіну у тварин, різних порфіринів, каротиноїдів, тощо).

Поглинені кванти (фотони) оптичного спектру електромагнітного випромінювання викликають у молекулах елементарні явища, що спричиняють за собою процеси, результатом котрих є біофізичні і хімічні зміни в опромінюваних об'єктах. У більшості випадків мають місце подальші реакції, що можуть викликатись, наприклад, хімічними змінами середовища сусідніх клітин. Біологічно активні продукти цих реакцій, розповсюджуючись по організмі (шляхом дифузії або шляхами циркуляції крові), можуть викликати фізіологічну дію, котра спостерігається як фотосинтез у рослин, або утворення вітаміну Д, накопичення кальцію в кістках і посилення білкового обміну у тварин.

Не всі названі процеси достатньо вивчені , але загальні етапи їх протікання визначені і досліджені.

Одним із найбільш вивчених фотобіологічних процесів у тварин є процес зорової фоторецепції.

Системою, сприймаючою оптичний сигнал, є фоторецепторні клітини – палички та колбочки, яких ,наприклад, в оці людини нараховується більше 10^8 штук

Палички – комплекси світлочутливих клітин – реагують на світлові сигнали низької інтенсивності і забезпечують видимість у сутінках. Колбочки є менш чутливими до інтенсивності світла, але відрізняються спектральною чутливістю і відповідають за кольоровість зображення вдень . Відповідно до спеціалізації фоторецептори відрізняються своєю будовою. Морфологічно це відображено в формуванні субклітинних мембранних структур – дисків, які складають стійку в зовнішньому сегменті палички. Кожний диск складено із двох мембран,

розділених дуже вузьким проміжком. В одній паличці розміщено до тисячі щільно запакованих дисків.

Другою спеціалізованою структурою фоторецепторної клітини є синаптичне нервово закінчення. Воно утворює функціональний контакт з так званими біполярними нервовими клітинами сітківки ока. Біполярна клітина суммує сигнали від декількох паличок і по зоровим нервам передає їх до відповідних клітин мозку.

Мембрани фоторецепторних дисків побудовані із білку та ліпиду в відношенні 2:3. Основну кількість мембранного білку (до 80%) становить родопсин – високомолекулярний трансмембранний білок , котрий складається з білкової частини – опсину і власне фоторецептору - ретиналю (являє собою половину молекули β - каротину (альдегідної похідної вітаміну А). Як хімічна структура ретиналь являє собою полієновий ланцюг із шести послідовних одно- та дво- валентних з'єднань. Така будова дозволяє йому змінювати просторову орієнтацію в мембрані та взаємодіяти з фотонами світла. Ретиналь являє собою C20 - полієн. Спектр поглинання C20 - полієнів характеризується наявністю трьох смуг - основної при 365 - 380 нм , слабкої при 280 нм і інтенсивної- при 250 нм . На відміну від C40 - форм, C20 - полієни мають достатньо великий час життя в синглетном збудженому стані і здатні флуоресциувати .

Важливою властивістю зорового пігменту є його спроможність до ізомеризації при поглинанні фотону світла у будь-якій формі - від *11 - цис* - до усіх *транс* - конформацій. Флуоресциує родопсин у видимій області оптичного спектру із максимумом при 580 нм .

Для виникнення фоторецепторного сигналу достатньо, щоб одна молекула родопсину поглинула один квант оптичного випромінювання. Це призводить до складної внутрішньої молекулярної перебудови обох частин молекули родопсину (по схемі наведеній вище) і ,в кінцевому рахунку, до утворення продуктів реакції – білку опсину та повністю спрямленої молекули транс-ретиналю.

Енергія поглинутого кванту оптичного випромінювання витрачається на конформаційні перебудови білкової частини макромолекулярного комплексу ініціюючи виникнення нервового імпульсу. Кожен структурний стан комплексу характеризується своїм спектром поглинання, причому , максимум кривої спектру поглинання під час проходження ланцюга послідовних реакцій зміщується в короткохвильову частину оптичного спектру : від 500 нанометрів для родопсину - до 387 нанометрів для кінцевого продукту – транс-ретиналю. Структурна схема перетворень родопсину під дією фотонів має вигляд приведений на рис.4.9.

Пунктирними лініями показані реакції перетворення родопсину під дією фотонів оптичного випромінювання, суцільними – темнові реакції.

Найбільші структурні перебудови в білковій частині родопсину відбуваються на стадії переходу метародопсину₁ в метародопсин 11.

Саме цю реакцію, що проходить на протязі мілісекунди вважають відповідальною за нервово збудження.

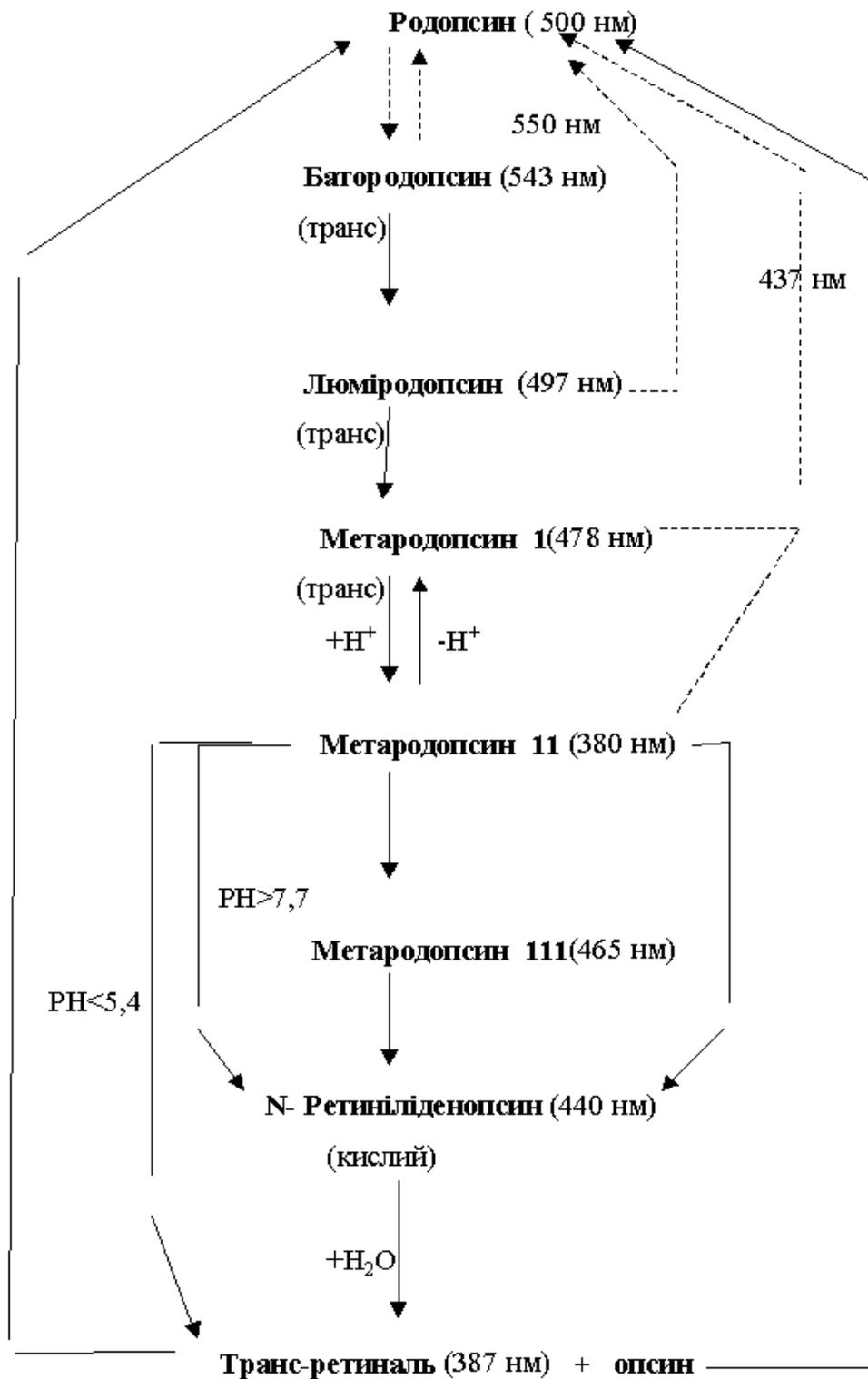


Рис. 4.9. Структурна схема перетворень пігменту сітчатки ока – родопсину при поглинанні і передачі енергії фотонів видимого випромінювання (по сучасним даним академіка А.Б.Рубіна)

Відновлення родопсину під дією фотонів оптичного випромінювання (*фотореактивація*) може проходити практично із кожного проміжного

продукту, включно до метародопсину 11. Ці процеси показано на схемі пунктирними лініями.

Але фізіологічне значення має темнова реізомеризація повністю вільного транс-ретиналю в 11 цис-конфігурацію і, як наслідок, біохімічна регенерація родопсину. Фізіологічна суть фотохімічних перетворень родопсину є в трансформації світлового сигналу в електричний при його багаторазовому підсиленні. В процесі задіяні не тільки внутрішньо мембранні структури-диски, а і зовнішня мембрана фоторецепторної клітини.

Для мембрани зовнішнього сегменту характерна висока проникність для іонів натрію і низька – для іонів калію. Тому, при відсутності опромінювання, всередину клітини через натрієві канали мембрани зовнішнього сегменту в напрямку електрохімічного градієнту поступають іони натрію. В секунду через мембранний матрикс зовнішнього сегменту проходить 10^9 іонів натрію.

Поглинання кванту оптичного випромінювання блокує натрієві канали і зменшує, відповідно, потік іонів натрію в клітину. Таким чином проходить накопичення електричного потенціалу на зовнішній мембрані.

Один поглинутий квант світла блокує близько 10^7 каналів натрію. Блокування натрієвого потоку в клітину призводить до гіперполяризації мембрани – зміщення її потенціалу в бік від'ємних значень. При цьому перехід тільки однієї молекули родопсину в збуджений стан змінює потенціал на 25 мкВ. Ця змінність передається на синаптичне закінчення і сумується біполярною нервовою клітиною.

Крім зорової дії через очі оптичне випромінювання спричиняє також біологічний ефект, діючи безпосередньо на поверхню тваринного організму.

При вивченні первинних механізмів дії оптичного випромінювання на живі організми велику увагу приділяють реакціям фотосенсибілізації – процесам, в яких енергія фотонів оптичного випромінювання поглинається специфічними молекулами (які мають пігменти-хромофори і називаються фотосенсибілізаторами) і передається іншим молекулам та їх сполукам, котрі самостійно не спроможні реагувати на опромінення.

Зараз відомо понад 400 фотосенсибілізаторів різної хімічної природи. Як правило вони мають дво-, три-, або поліциклічну структуру і відносяться до двох класів:

- порфіринів;
- псораленів.

Порфірини являють собою циклічні об'єднання із чотирьох пірольних кілець, зєднаних метиновими групами. Порфірини вважаються похідними порфіну після заміщення атомів водню ($H_1 - H_6$) метиловим ($-CH_3$) та вініловим ($-CH=CH_2$) радикалами, залишками оцетової і пропіонової кислот. В живих організмах порфірини, як правило, утворюють комплекси з іонами заліза (гемоглобін, міоглобін, каталаза, цитохроми), магнію (хлорофіл), кобальту (ціанокобаламін – вітамін B_{12}) та іншими.

Псоралени мають рослинну природу і являють собою групу органічних об'єднань із фуранового кільця з'єданого з ядром кумарину різним способом

(лінійно або під кутом). Псоралени, з'єднуючись із піримідинами, фотосенсибілізують пошкодження ДНК і спричиняють канцерогенну дію. Псоралени поглинають оптичне випромінювання в діапазоні 250- 400 нанометрів.

Первинним механізмом фотосенсибілізованої реакції є наступне: При поглинанні кванту оптичного випромінювання молекула сенсибілізатора переходить з основного енергетичного стану в збуджений. Розрізняють синглетний (S) і триплетний (T) стани збудження, які відрізняються часом існування молекули в збудженому стані. В синглетному збудженому стані молекула може знаходитись не довше $10^{-9} - 10^{-6}$ секунди, в триплетному - від 10^{-3} до 10 секунд. За рахунок відносно довгого життя молекули в збудженому триплетному стані, вона має можливість взаємодіяти з іншими молекулами. Розрізняють *два типи реакцій* фотосенсибілізації.

В *реакціях I типу* сенсибілізатор взаємодіє безпосередньо з другою молекулою так, що при цьому виділяється атом водню, або відбувається передача електрону. Утворюються радикали, котрі приймають участь в реакціях з киснем та іншими молекулами.

В *реакціях II типу* має місце перенос енергії від збудженої в триплетний стан молекули сенсибілізатора до молекули кисню, що переводить його в збуджений стан, в якому він має сильні окислювальні властивості. В більшості фотосенсибілізованих процесів обидві реакції проходять взаємо конкуруючи.

Послідовність первинної сенсибілізованої фотореакції окислення можна показати схемою, приведеною на рис.4.10.



Рис.4.10. Схема передачі енергії оптичного випромінювання молекулярними структурами в реакції фотосенсибілізації

Таким чином, результуюча дія випромінювання проявляється не в області, де відбувається поглинання енергії фотонів, а на шляху обміну речовин

Ще в 1900 році О.Рааб вперше дослідив фотосенсибілізаційну дію акридинових фарбників на життєдіяльність парамецій. Він встановив, що якщо в клітини парамецій ввести незначну кількість акридинового фарбника і опромінити їх світлом – вони гинуть. При розділеному обробітку парамецій – вони виживають.

В 1903 році було встановлено явище фотосенсибілізації загибелі клітин злоякісних пухлин. Встановлено, що ці клітини інтенсивніше ніж нормальні клітини поглинають фарбники і під дією видимого чи ультрафіолетового випромінювання реструктуруються від надлишку поглинутої оптичної енергії.

Зараз фотосенсибілізація використовується в медичній практиці для лікування різноманітних ракових захворювань - рецидиви раку молочної залози на грудній стінці, внутрішньошкіряні метастази, відновлення проходів стравоходу, трахей, великих бронхів при їх звуженні раковими пухлинами, гінекологічні та мочевипускні ракові захворювання та інше . Особливо ефективним є застосування методу для лікування злоякісних пухлин внутрішніх органів з використанням ендоскопічної техніки, наприклад, для лікування панкреатодуоденальної зони і загальних жовчних проток.

Фотосенсибілізований ефект негативної дії оптичного випромінювання (при передозуванні) на сільськогосподарських тварин помічено ще в давнину при випасанні тварин на деяких рослинних пасовиськах.

Встановлено, що такий ефект здатні викликати деякі *барвники* - еозин, метиленовий синій, еритрозін і інш.; *порфірини*, особливо похідні гемоглобіну (гематопорфірин) при великій концентрації яких в організмі тварин під впливом Сонячного випромінювання може виникнути навіть коматозний стан. Після введення під шкіру фотосенсибілізуючої речовини тварині з білою вовною у неї на світло розвивається дерматит, кон'юнктивіт, зуд; з'являються задишка, загальна слабкість, судоми і навіть настає смерть .Влітку в сонячні дні «смерть від світла» може наступити протягом декількох хвилин. Тварини ж з чорною вовною в аналогічному досліді залишаються абсолютно здоровими.

Вважається, що в певних умовах під дією оптичного випромінювання в організмі за участю кисню утворюються *пероксиди*, що викликають такий ефект.

Фотосенсибілізація використовується в медичній практиці для лікування різноманітних ракових захворювань: рецидивів раку молочної залози на грудній стінці, внутрішні шкіряні метастаз, при відновленні проходів стравоходу, трахей, великих бронхів (при їх звуженні раковими пухлинами), гінекологічних та мочевипускних ракових захворюваннях та інше). *Механізм дії.* Введений внутрішньо фотосенсибілізатор концентрується в злоякісній пухлині. Пухлина піддається опромінюванню.

В процесі опромінювання випромінювання поглинається фотосенсибілізатором. В результаті фотохімічної реакції утворюється

синглетний кисень та інші високоактивні вільні радикали, котрі являються токсичними для ракових клітин і рочиняють їх структурні клітини.

Пухлина “розсасується” і заміщується нормальною з’єднувальною тканиною. Наступає одужання тварини .

Важливим фотобіологічним процесом в тваринних організмах є фотореактивація. Явище фотореактивації було відкрито в 1949 році, коли вчені працювали над захистом від дії ядерного вибуху. Було встановлено , що видиме випромінювання, застосоване одночасно з ультрафіолетовим випромінюванням або після нього, зменшує його пошкоджуючу дію на живі клітини.

Це явище привернуло до себе увагу радіобіологів як перший доказ принципової можливості репарації (відновлення) радіаційних пошкоджень. Тому перших два десятиліття досліджувався переважно радіобіологічний аспект проблеми.

Вивчались закономірності та механізм фотореактивації летального та мутагенного ефектів, що створюються короткохвильовим ультрафіолетовим випромінюванням (коротше 280 нм), яке вибірково поглинається структурними складовими ДНК.

Другий бік проблеми - *фотобіологічний* - взаємодія різних видів оптичного випромінювання з довжиною хвилі більше 300 нанометрів (Сонячного діапазону) залишався не вивченим , хоча її значення для медицини та сільського господарства беззаперечне.

На початок 70-х років було встановлено:

- *фотореактивуються біологічні ефекти від короткохвильового та ультрафіолетового випромінювання повного спектру;*

- *фотореактивуючу дію має випромінювання в діапазоні 310...500 нм, а саме: видиме (синього і фіолетового кольору) та середньо- і довгохвильове ультрафіолетове випромінювання (310...400 нм). Спектри дії фотореактивації у різних об’єктів також відрізняються: у одних максимум фотореактивації - 365..380 нм , у других - 440...480 нм.*

- *фотореактивуються всі основні ефекти від дії ультрафіолетового випромінювання на клітинному рівні : летальний, антимітотичний, мутагенний, гальмування синтезу нуклеїнових кислот та інше. Встановлена можливість фотореактивації біологічних процесів не тільки на рівні молекул ДНК, а і в тканинних структурах організму*

- *здатність до фотореактивації виявлено у представників практично всіх видів тваринного та рослинного світу. Вважається, що ця здатність сформувалася одночасно з розвитком життя на Землі для захисту від надлишкового ультрафіолетового випромінювання Сонця і закріпилася як результат генетичного відбору нуклеопротейінових комплексів клітин.*

- *фотореактивація дії ультрафіолетового випромінювання на біологічний об’єкт можлива при наявності у його клітинах специфічного сприймаючого ферменту - фотоліази. Фотоліази, виділені із різних біологічних об’єктів не ідентичні. Наприклад, у дріжджів цей фермент складається із двох білкових субодиниць, а у бактерій – із поліпептиду і аденінутримуючого кофактору.*

Природа хромофорної (фотосприймаючої) групи в структурі фотоліаз ще не визначена. Вважається, що нею є похідне діазофлавіна.

-процес фотореактивації на молекулярно – клітинному рівні проходить наступним чином: ультрафіолетове випромінювання пошкоджує в клітині тимін ядерної ДНК (дезоксирибонуклеїнова кислота). Фермент фотореактивації приєднується до пошкодженого тиміну і під дією репаруючого опромінення комплекс фермент-тимін розпадається з мономеризацією тиміну. Встановлено, що фермент фотореактивації видонеспецифічний і виділений із одного об'єкту відновлює пошкодження ДНК із різних об'єктів.

З часу встановлення явища фотореактивації багато уваги вченими світу приділялося визначенню спектру дії реактивуєчого оптичного випромінювання, знаходженню тих довжин хвиль, які дають максимальну фотореактивацію.

Дослідження показали, що різні ефекти від ультрафіолетового опромінювання навіть у одного об'єкту реактуються випромінюванням різної довжини хвилі.

У одного і того ж об'єкту, опроміненого одним і тим же ультрафіолетовим випромінюванням, можна отримати різний спектр дії фотореактивації в залежності від фізіологічного стану об'єкту в момент опромінювання, а також залежно від вибраного критерію пошкодження та умов проведення досліду.

Встановлено також, що реактуючу дію має випромінювання не лише з довжиною хвилі до 500 нм, а і більш довгохвильове. Це свідчить про те, що в клітинах проходить репарація пошкоджень не тільки тиміну ДНК, а і інших продуктів фотореакції. На даний час встановлено, що для тварин фотореактуючим випромінюванням для дії від ультрафіолетового випромінювання є не лише випромінювання з довжиною хвилі до 440 нанометрів, а і випромінювання з довжиною хвилі до 760 нанометрів. Можливість ослаблення еритеми шкіри у людей видимим випромінюванням вперше виявив Van der Leun J.C.

Інтересні результати одержані академіком К.О. Самойловою в дослідженнях можливості фотореактивації дії ультрафіолетового випромінювання на шкіру людей.

Опромінюючи 110 людей видимим випромінюванням, після попереднього ультрафіолетового випромінювання, нею встановлено, що у 76% опромінених короткохвильовим (254 нм) ультрафіолетовим випромінюванням пацієнтів спостерігалось зниження еритеми на шкірі.

У опромінених довгохвильовим (300-380 нм) ультрафіолетовим випромінюванням пацієнтів еритема зменшувалась у 68% пацієнтів. Причому, фотореактивація еритеми спостерігалась незалежно від статі, віку, ступеня пігментації шкіри і рівня її чутливості.

Комплексні дослідження послаблюючої дії видимого випромінювання на тварин при їх ультрафіолетовому опромінювання вперше було проведено Юрковим В.М. У виробничих умовах на тваринницьких комплексах і фермах, де в якості джерела світла встановлені люмінесцентні лампи і норми освітленості приміщень дещо вищі, ніж для приміщень із лампами розжарювання, при

використанні джерел ультрафіолетового випромінювання відзначається зниження ефекту від опромінення. Іншими словами, при більш інтенсивному освітленні доза ультрафіолетового випромінювання викликає менший ефект в організмі тварини: - видиме випромінювання виступає своєрідним "послаблювачем" ультрафіолетового випромінювання і робить фотореактивуючу дію на фотохімічні процеси, що відбуваються в організмі тварини під дією ультрафіолетового випромінювання.

Встановлення залежності між збуджуючим і реактивуючим випромінюваннями для конкретних фотопроцесів в організмі тварини дозволило б більш точно із меншими енергетичними витратами впливати на організм тварини з метою досягнення зазначеної реакції на опромінювання.

Практичне здійснення керованого процесу фотореактивації можливе при пізнанні механізму змін, що відбуваються в біологічних структурах під дією оптичного випромінювання.

Розглядаючи первинний механізм взаємодії оптичного випромінювання з організмом виділяють три напрямки:

1). *Сприймання і перетворення енергії оптичного випромінювання в енергію збудження електронів пігментовміщуючими структурами біологічних утворень* (меланіни, гемоглобін, каротін та інші фотохроми).

2). *Резонансна дія випромінювання на молекулярні процеси в мембранах аксонів трофічних і судинних нервових клітин*, структури котрих здатні більш енергійно сприймати і перетворювати оптичну енергію в електричну фотохімічних процесів.

3). *Поглинання оптичної енергії безпосередньо в з'єднувальних тканинних структурах* (стромі і оболонках органів, стінках судин і др.) , що призводить до виникнення в них напівпровідникових властивостей, внаслідок чого вони можуть приймати участь в сприйманні і передачі енергії електронного рівня.

Напівпровідникові характеристики у ДНК, білків, клітинних мембран встановлено сучасними дослідженнями електричних властивостей біологічних структур.

Наявність екситонної передачі енергії в біологічних структурах підтверджує своїми дослідженнями і академік А.С. Давидов.

4.2.2. Особливості перетворення оптичної енергії в структурах живих організмів.

Дослідженнями останніх років встановлено, що біологічна дія оптичного випромінювання на тваринні організми в значній мірі залежить від наявності в ньому фоторецептору - меланіну .

Меланіни –це чорні (*феомеланіни*) і коричневі (*еумеланіни*) пігменти , котрі утворюються із амінокислот тірозіна і триптофана (в основному з структур шкіри) і можуть мігрувати в тканинах організму за допомогою клітин –носіїв, названих *меланофорами*. Як пігмент, що знаходиться в шкірі тварин, меланін виконує наступні функції:

- є фотопротектором- захищає організм від надлишкової дії ультрафіолетового випромінювання Сонця;
- зменшує ризик шкіряних канцерогенних захворювань (меланома шкіри і т.п.);
- зменшує сонячну дегенерацію (старіння) шкіри;
- сприяє зв'язуванню в шкірі вільних радикалів, захищаючи клітинні органиели епідермісу від їх генерації;
- є фізичним бар'єром для оптичного випромінювання та фільтром ультрафіолетового випромінювання;
- захищає життєво необхідні метаболіти клітин від фото деструкції;
- є терморегулятором поглиненої енергії;
- сприяє фотосинтезу вітаміну Д в шкірі.

Меланіни знайдено не лише в клітинах шерсті, шкіри і її верхнього прошарку – епідермісу, а й в сітчатці ока, нервових і судинних оболонках та інших структурах тіла тварини.

Шкіряний меланін утворюється в меланобластах і базальних клітинах шкіри. Меланін має темне забарвлення внаслідок окислення безбарвного тірозіна ферментом *допазою* (тірозіназою), що міститься в меланобластах, ензиматична активність яких стимулюється ультрафіолетовим випромінюванням.

У шкірі пігмент розподіляється нерівномірно, що виражається в нерівномірній пігментації різних ділянок шкіри під впливом однакових доз опромінення. Найбільш стійка пігментація шкіри утворюється при одночасній дії всіх випромінювань спектра Сонячного випромінювання досягаючого Землі і надає «м'яку» біологічну дію на організм тварин порівняно із штучним випромінюванням .

Під дією штучного ультрафіолетового випромінювання пігментація може бути більш рівномірною, але менш стійкою. Під впливом інфрачервоного випромінювання спостерігають стійку, але нерівномірну прояву меланіну в шкірі. Після сильної еритеми від впливу ультрафіолетового випромінювання пігментні зерна більш інтенсивно переміщуються в поверхневі шари шкіри, утворюючи тривало виражений ефект загару.

Пігментація шкіри не пов'язана з виникненням в ній еритеми, але при систематичному опроміненні довгохвильовим ультрафіолетовим випромінюванням, що не викликає видимої еритемної реакції з боку шкіри, пігментація її все ж посилюється. Така пігментація пов'язана не з утворенням нових зерен меланіна, а із посиленням інтенсивності забарвлення існуючих.

Посилення пігментації шкіри збільшує поглинаючу здатність шкіри і зменшує її відбиваючі властивості. Поглинаючи переважно короткохвильову частину спектра оптичного випромінювання, меланін впливає значний чином на кількість і спектральний склад променистої енергії, проникаючої в глибоко розміщені від поверхні шкіри тканини. Пігмент не оберігає шкіру від виникнення еритемної реакції. Чутливість шкіри до оптичного випромінювання знижується раніше і зникає швидше, ніж її пігментація, а стійкість шкіри до дії світла можна

підвищити опроміненнями її ділянками спектру ультрафіолетового випромінювання, що не спричиняють появу пігментації.

Біологічний вплив оптичного випромінювання проявляється, коли промениста енергія поглинається шкірою, внутрішніми тканинами, сприймається зоровою і нервовою системами організму.

Активність рефлекторної дії оптичного випромінювання залежить від функціонального стану центральної нервової системи. Наприклад, чутливість шкіри тварин до ультрафіолетового випромінювання під впливом наркозу підвищується, а інтенсивність еритеми, навпаки, знижується. В свою чергу, периферичний вплив на рецепторний апарат оптичним випромінюванням по даним сучасного американського дослідника D. Oren приводить до зміни функціонального стану центральної нервової системи.

Тактильна чутливість шкіри під впливом оптичного випромінювання може підвищуватися, а больова знижуватися, що в значній мірі залежить від дози опроміненості. У той час, як біле світло благотійно впливає на рушійну і реактивну функцію центральної нервової системи, червоний промінь збуджує, а синій і зелений - мають заспокійливу дію.

Рівень молекулярного збудження біологічних тканин під впливом променистої енергії залежить від інтенсивності потоку і довжини хвилі випромінювання :

Ультрафіолетове випромінювання викликає фотоелектричний і фотохімічний ефекти, пов'язані із збудженням електронних процесів у атомів і молекул. Такі атоми і молекули мають більш високу окислювально-відновну активність в хімічних реакціях.

Енергія оптичного випромінювання інтенсифікує метаболічні процеси.

У крові під впливом оптичного випромінювання змінюється спектр поглинання в ультрафіолетовій частині спектру, що свідчить про зміну її фізико-хімічних властивостей. Морфологічні зсуви в крові залежать від дози опромінення і загального стану тварини. Зазвичай, підвищується кількість лейкоцитів, особливо нейтрофілів, лімфоцитів і еозинофілів. Подальше опромінення приводить до зниження числа нейтрофілів, а іноді до збільшення кількості лімфоцитів і еозинофілів. Згодом морфологічний склад білої крові відновлюється, спостерігається лише деяка еозинофілія.

Вміст еритроцитів і гемоглобіну в крові у здорових тварин практично не змінюється, а при анемії ультрафіолетове випромінювання малими дозами навіть стимулює регенерацію крові; великі дози, навпаки, можуть спричинити посилення анемії.

Під впливом оптичного випромінювання (особливо ультрафіолетового) в оптимальних дозах з появою еритеми збільшується хвилинний об'єм серця, посилюється легенева вентиляція при одночасному зменшенні частоти дихальних рухів. Світло благотворно впливає на функцію органів травлення, що, безумовно, пов'язано із змінами в загальному нейрогуморальному статусі організму.

Стимулюється білковий, вуглеводний і вітамінно-мінеральний обмін, особливо у молоді. З підвищенням температури ділянки, що опромінюється, в тканинах посилюються фізико-хімічні процеси, відбувається подразнення рецепторів тканин і інтерорецепторів судинної мережі, збуджуються фізіологічні реакції загального і місцевого характеру, підвищується електропровідність і еластичні властивості тканин.

При достатній дозі оптичного випромінювання виникаюча на місці опромінення активна гіперемія зберігається протягом 1/2-1 год, прискорюються ферментативні процеси, посилюється обмін речовин, регенерація і репарація тканин, знімаються підвищений міотонус, спазми. Помірне опромінення впливає беззаспокійливий чином, а короткочасні інтенсивні дози посилюють больову реакцію організму.

Впливом оптичного випромінювання на рефлексогенні зони можна викликати метамерні реакції. Так, внаслідок опромінення в області поясничних хребців відбувається розширення судинної мережі і посилення діуреза; при опроміненні в області лівої "голодної ямки" у жуйних тварин посилюється моторика рубця.

Тепловий вплив штучних джерел інфрачервоного і видимого світла і рефлекторний вплив цих випромінювань обумовили їх широке використання при різних хворобах тваринних. На шкірі, що піддається інфрачервоному опроміненню, вже через 1 - 2 хв. настає так звана тепла еритема, яка з припиненням опромінення швидко зникає, в 10-15 раз посилюється інтенсивність кровотоку, виділення і випаровування поту. Тому найбільш сприятливий ефект від застосування інфрачервоних і видимих випромінювань отримують при підгостро- і хронічно протікаючих запальних процесах, коли в уражених тканинах недостатній кровообіг, знижений обмін речовин, уповільнені репаративні і регенеративні процеси.

Значний лікувальний ефект оптичного випромінювання відмічений при хворобах додаткових порожнин черепа (гайморит, фронтити), дихальної системи (ларингіт, бронхіти, пневмонії, плеврити), органів травлення (гіпотонія і атонія передшлунків жуйних тварин, зниження моторної і секреторної функції шлунка і кишечника, спастичні коліки, катаральний гастроентерит, токсична дистрофія печінки, обтурація жовчних ходів), системи видалення мочі, міоглобинурії коней, ексудації і трансудації в серозні порожнини і тканини; при гематомах, лімфоекстравазатах, підгостро- і хронічно протікаючих запаленнях органів (крім очей), ревматичних і травматичних міозитах і інших хворобах.

Важливе значення в вивченні впливу та механізму дії оптичного випромінювання на тваринний організм мають дослідження американських вчених, які проводяться з початку 2006 року. Так Dr. D. Oren із Yale University School of Medicine опублікував, на основі багаторічних досліджень впливу оптичного випромінювання на людей, гіпотезу про те, що кров є «хронобіологічним фоторецептором» за допомогою якого людський організм споживає сонячну енергію.

Поглинута сонячна енергія призводить до посилення різних біологічних процесів в організмі і дає « явно виражену нейро-гуморальну ритмічну реакцію». Аналізуючи життя рослин і тварин під дією сонячного випромінювання Dr. D. Oren говорить “ після ночі, на світанку під дією сонячних випромінювання просинається все живе на Землі; енергія фотонів світла є для нього спусковим механізмом, який запускає в роботу, пробуджує від сну і рослини, і тварини, і усяких мурах. Якщо можна сказати, що тварини і люди реагують на сонячне випромінювання за допомогою очей, то рослини очей не мають. Встановлено, що вони реагують на світло клітинним пігментом -хлорофілом.

Поскільки люди і тварини просинаються від світла з закритими очима, то у них також повинні бути інші пігменти, крім родопсину сітківки ока”.

Dr. D. Oren також говорить, що недостатня кількість сонячної енергії взимку призводить до депресії організму, заторможення біологічних процесів та ритму життя, зниження рівня захисту імунної системи. «Консервативність побудови життя на Землі призводить до того, що в основі біосинтезних процесів , які проходять в рослинах і в тваринах під дією світла повинні мати одну природу і принцип дії.

Основним пігментом у тварин, крім меланіну є гемоглобін крові, його фізіологічна функція подібна хлорофілу рослин. Сонячна енергія попадає до молекул гемоглобіну крізь шкіру в кровеносні капіляри, міліярдами яких пронизані усі прошарки шкіри і потім кровеносними судинами розноситься по всьому організмові виконуючи фізіологічну і нервовологічну функції».

Ще в 1998, D. Oren встановив, що пігментом, поглинаючим світло в крові є гемоглобін.

В 2007 році J.Haldane і J. Smith досліджуючи вплив оптичного випромінювання на гемоглобін крові (освітлюючи спину, живіт людей) встановили, що під дією оптичного випромінювання в ньому змінюється кількість окису вуглецю та закису азоту .

В медичній практиці світу ще з 60-х років використовується метод ультрафіолетового опромінювання крові з метою її знезаражування. В основу методу покладено бактерицидну дію ультрафіолетового випромінювання на гнійну інфекцію організму. Ще в 1937 році в СРСР було проведено експеримент по лікуванню анемії переливанням крові, опроміненої ультрафіолетовим випромінюванням; було встановлено, що підвищується загальний опір організму хворобам, підсилюються бактерицидні властивості крові, збільшується її здатність поглинати кисень. Лікування гіпоксемії, що виникає при багатьох захворюваннях в післяопераційний період, за допомогою реінфузії опроміненої ультрафіолетом крові набуло широкого застосування в медичній практиці за кордоном.(Frick G. «UV-Strahlen in Biologie und Medizin».Abstr. VI UV-Kolloquium. Kuhlungsborn, 1977, 12.) Причому, кров опромінювалась по наступній методиці: - виконувався переріз вени або артерії і потік крові виводився зовні в кварцеву (прозору для ультрафіолетового випромінювання) скляну трубку, на бічну поверхні якої направлявся потік ультрафіолетового

випромінювання певної дози. Під дією енергії фотонів в крові проходили вищезгадані позитивні зміни.

В 1997 році S.Campbell та P. Murphy з лабораторії людської хронобіології Cornell University Medical College, N.Y. провели дослідження по вивченню впливу оптичного випромінювання на стан людського організму при опромінюванні підколінної поверхні шкіри. Пацієнти розміщувались на кріслі в розслабленому положенні, під коліна за допомогою світловодного оптичного кабелю підводилось оптичне випромінювання з довжиною хвилі 455...540 нанометрів, інтенсивністю не менше 20 люкс. Підколінна поверхня для дослідження використовувалась тому, що там найтонша шкіра і багато кровеносних судин та капілярів.

В результаті трьох місяців проведення експерименту автори констатували підвищення температури тіла після опромінювання на збільшення мелатонінового рівня. Також відмічено підвищення рівня тріптофану та серотоніну в крові (серотонін - депресант, захищає організм від стресів). На основі отриманих результатів автори роблять висновок, що освітлення поверхні тіла людей необхідно особливо в Північній зоні проживання, де недостатня природна освітленість від Сонця та дають рекомендації щодо розробки і користування штучними опромінювальними установками для людей.

В своїх дослідженнях S.Campbell та P. Murphy також підкреслюють, що організм реагує на освітлення шкіри поіншому ніж на освітлення сітківки очей.

Наведені наукові результати мають велике теоретичне і практичне значення.

По перше - встановлення факту біологічної дії оптичного випромінювання на організм людини або тварини не лише за допомогою очей, а просто крізь шкіру привносить новий підхід до розуміння природи взаємодії організму з навколишнім середовищем та механізму цієї взаємодії;

по друге - визнання наукового підходу, що оптичне випромінювання діє на всі живі організми на Землі за єдиним принципом: поглинання фотонів світла відповідним пігментом (у рослин, фотони оптичного випромінювання поглинаються хлорофілом, а у тварин та людей - пігментом крові-гемоглобіном) надає новий поштовх для наукових досліджень по вивченню принципів, механізму та шляхів взаємодії оптичного випромінювання з тваринним організмом з метою подальшого його вдосконалення.

4.2.3. При опроміненні тварин розрізняють пряму і непряму дію оптичного випромінювання на тваринний організм.

Пряма дія є результатом безпосередньої взаємодії фотонів випромінювання із сприймаючими структурами тваринного організму. *Непряма* дія полягає насамперед в іонізації молекул кисню, що при подиху тварини потрапляють усередину організму і беруть участь у деяких фізико-хімічних реакціях. Непрямою дією ультрафіолетового випромінювання є також утворення різноманітних речовин у кормі, що впливають на тварин при годуванні цим кормом.

Сучасна теорія впливу оптичного випромінювання на живі організми визначає *два основних шляхи*: гуморальний і нервово-рефлекторний. Ці шляхи нерозривно пов'язані і залежні один від одного.

Загальна схема дії ультрафіолетового випромінювання приведена на рис.4.11.

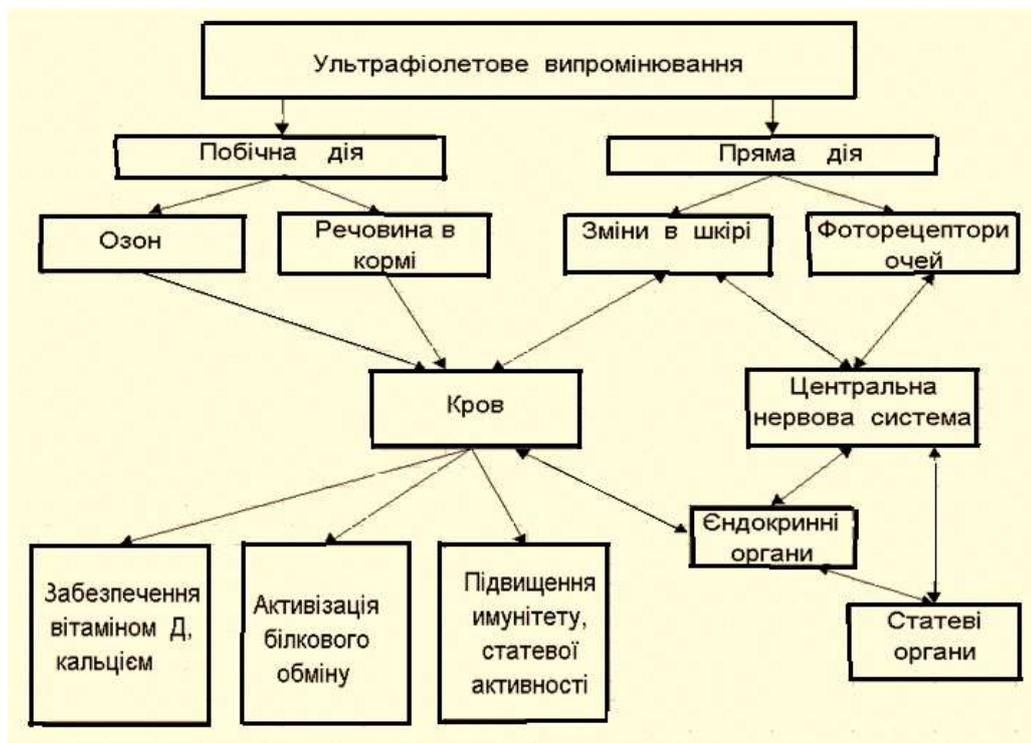


Рис.4.11. Структурна схема дії ультрафіолетового випромінювання на тваринний організм.

Із схеми видно, що ультрафіолетове випромінювання, як складова частина спектру оптичного випромінювання, спричиняє різнобічний вплив на тваринний організм як через кров, так і через центральну нервову систему.

Гуморальна дія спостерігається при утворенні в шкірі вітаміну Д₃, гістаміну і гістаміноподібних речовин (ацетилхолін і ін.)- під дією ультрафіолетового випромінювання та гемоглобіну крові- під дією видимого випромінювання. Дані речовини по кровоносних каналах розносяться у всі органи і системи організму, викликаючи відповідні реакції.

Нервово-рефлекторна дія здійснюється при подразненні випромінюванням нервових рецепторів розташованих у верхніх прошарках шкіри. Вплив випромінювання зумовлений рефлекторним впливом його на центральну нервову систему через рецепторні структури. В результаті в тканинах, органах і системах організму посилюються фізико-хімічні (особливо метаболічні) процеси. Рефлекторно оптична енергія стимулює функцію ендокринної системи (щитовидних, статевих залоз, надниркових, гіпофізу) і центральної нервової системи.

БЛОК-СХЕМА ФОТОБІОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

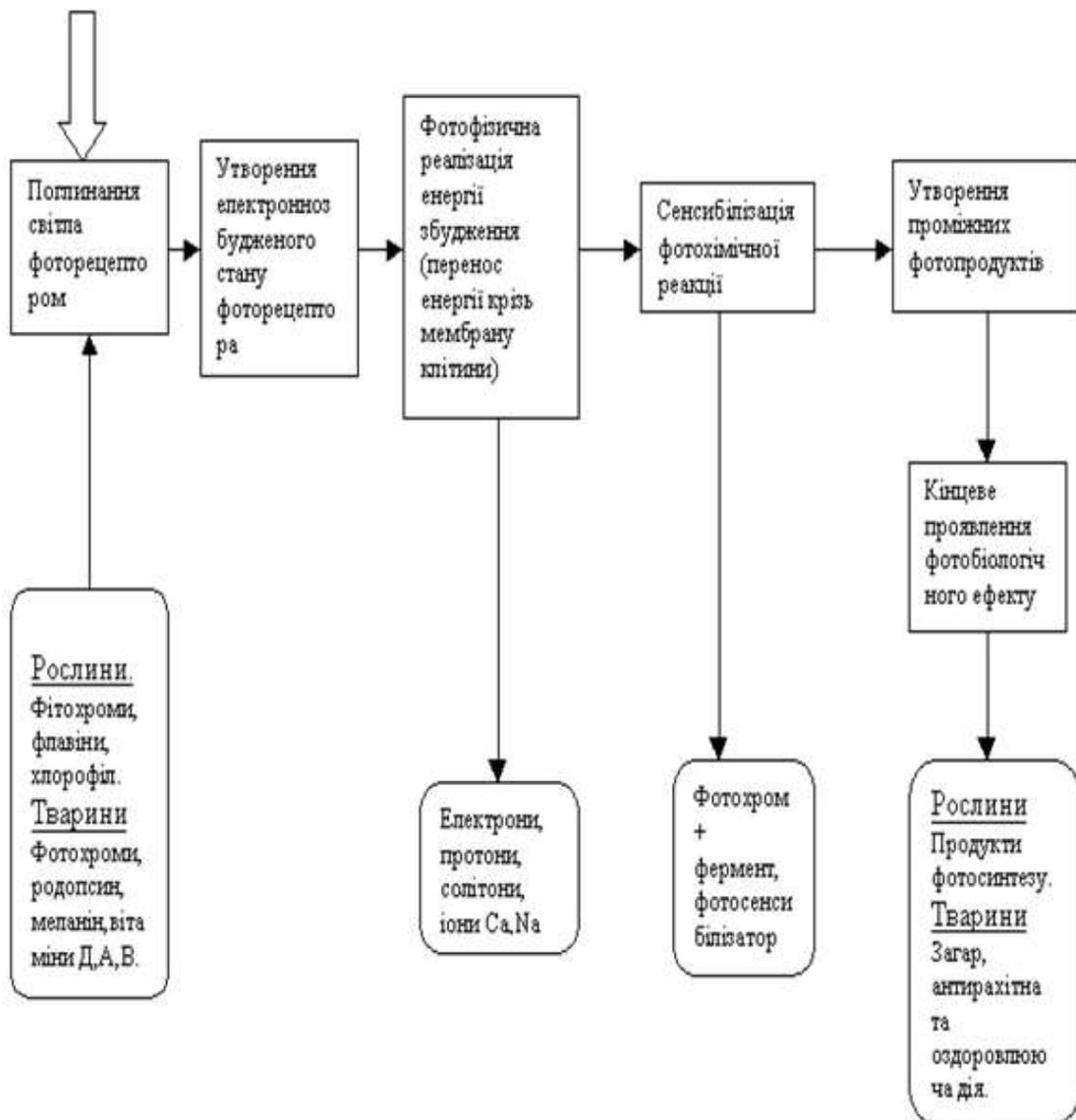


Рис.4.12. Структурна схема механізму дії енергії оптичного випромінювання на біологічні об'єкти

Згідно з наведеною схемою первинним актом взаємодії фотонів оптичного випромінювання з структурами опромінюваних біологічних об'єктів є їх поглинання чутливими до них біомолекулами – *фоторецепторами*. У рослин це хлорофіли, фітохроми...; у тварин і птиці – родопсин, меланін, фотохроми і т.п.

Особливістю їх є наявність чередування одинарних і подвійних зав'язків між сполуками молекули та чутливість до фотонів випромінювання визначеної довжини хвилі.

Поглинута фоторецептором енергія оптичного випромінювання, в залежності від енергії поглинутих фотонів призводить до фотофізичної реакції

переносу енергії збудження крізь клітинні мембрани електронним, іонним, солітонним шляхами. Таким чином ініціюється відповідна фотохімічна реакція безпосередньо в опромінюваних біологічних структурах, або проходить фотосенсибілізована реакція в навколишніх.

Первинні продукти фотохімічних реакцій (наприклад: гістамін, вітамін Д,) розносяться з кров'ю в необхідні структури, де і проходить кінцевий прояв ефекту оптичного опромінювання.

Наведена структурна схема механізму фотобіологічного процесу показує етапи перетворення оптичної енергії та їх послідовність в біологічних об'єктах.

4.3. Теоретичне обґрунтування принципів керування енергетичною дією оптичного випромінювання на організм тварини

Теоретичне обґрунтування принципів керування енергетичною дією оптичного випромінювання на організм можливе при:

- Відомих шляхах проникання оптичного випромінювання в тваринний організм до фотобіологічно активних структур;
- Уясненні механізму взаємодії фотонів оптичного випромінювання із сприймаючими структурами організму;
- Уясненні механізму трансформації поглиненою енергією оптичного випромінювання в тваринному організмі.

Результати досліджень останніх років явища фотореактивації і їх аналіз, надають можливість реалізувати пояснення механізму з позицій квантово-механічної теорії,] суть якого полягає в наступному: при дії кванту (фотону) оптичного випромінювання на молекулу відбувається зміна її енергетичного внутрішнього стану:

1. *Збільшується її електронна енергія, тобто електрони збуджуються на більш високі (дозволені) енергетичні рівні і зростає реакційна спроможність молекули.*

2. *Збільшується коливальна енергія молекули, обумовлена коливаннями атомів усередині молекули від перерозподілу поглинутої енергії і зростає температура молекулярного комплексу.*

3. *Змінюється ротаційна енергія, що відповідає за обертання всієї молекули або її частин і децю змінюється просторова структура молекули*

У спрощеному виді викладене вище можна записати

$$h\nu = (E_e + E_k + E_p)_{\text{кін}} - (E_e + E_k + E_p)_{\text{нач}}, \quad (4.26)$$

де $h\nu$ - енергія фотону випромінювання, що поглинається; E_e - енергія збудження електрону на більш високий енергетичний рівень; E_k - енергія, що витрачається на коливання атомів у молекулі; E_p - енергія, що витрачається на зміну ротаційного положення молекули або її частин.

Якщо відповідними ν позначити частоти, що відповідають електронним, коливальним і ротаційним переходам молекули, то можна записати квантовані значення розподілу енергії поглинутого фотону оптичного випромінювання:

$$h\nu = h\nu_e + h\nu_k + h\nu_p \quad (4.27)$$

Теоретичними та експериментальними дослідженнями встановлено, що (в залежності від складності структурної будови молекули і місця дії на неї фотону) частота фотонів ν_e відповідає ультрафіолетовому і, частково, видимому випромінюванню, ν_k - інфрачервоному випромінюванню і ν_p -мікрохвильовому випромінюванню. Тобто, у спрощеному викладенні, при опроміненні молекули ультрафіолетовим випромінюванням проходить активація її електронів, при опроміненні інфрачервоним випромінювання - проходить збільшення її теплової енергії, а при мікрохвильовому опроміненні – змінюється її просторове положення відносно сусідніх молекул .

Вираз (4.27) показує, що при аналізі взаємодії фотонів оптичного випромінювання із молекулами опромінюємого об'єкту, в залежності від будови енергетичної структури молекули, енергія фотону може поглинатися і перерозподілятися зразу по трьом напрямкам. Але пояснення процесу фотореакції з урахуванням трьох енергетичних складових молекули матиме надто громіздкий вигляд, тому спробуємо подати пояснення первинного механізму дії оптичного випромінювання на тваринний організм по взаємодії фотонів випромінювання лише з електронними енергетичними рівнями молекули.

Тобто, для спрощення пояснення механізму фотореакції приймаємо допущення:

енергія фотонів оптичного випромінювання при опромінювання біологічних об'єктів поглинається лише електронами «дозволенних» енергетичних рівнів молекул і перерозподіляється між ними .

Виходячи із даного допущення, розгляне первинний механізм процесу фотореактивації біологічного впливу оптичного випромінювання:

При опроміненні біоструктури, поглинена енергія фотонів збуджує електрони атомів чи молекул у пігментах фоторецепторів на відповідні вищі "дозволені" енергетичні рівні, із яких відбувається деякий перерозподіл цієї енергії (за період $\tau \sim 10^{-10}$ с) і електрони (відповідно їх атоми, молекули, або весь комплекс – клітина) переходять у більш стійкий збуджений стан, але з меншим рівнем енергії. В цьому стані вони вступають в хімічну реакцію і утворюють (при відсутності подальшого доопромінення) продукт фотореакції:

Якщо на цей об'єкт знову впливати випромінюванням, але більш довгохвильовим (із меншою енергією фотонів), то є допустимим повторне збудження електронів на вищій енергетичний рівень, із якого вони мають більшу ймовірність повернення на свій початковий енергетичний рівень з віддачею поглинутої (за два етапи збудження) енергії ближнім структурам, або випромінюючи її фотонами відповідної енергії. Тобто опромінена двома різно

енергетичними потоками випромінювання молекула, де-факто, не приймає участі в утворенні фото продукту. Таким чином, реально спостерігається фотореактивація (відновлення первинного стану) збудження біомолекули.

Деяко складніше описується процес реактивації, якщо молекула має тісніші енергетичні зв'язки з сусідніми молекулярними структурами і встигає, за час між імпульсами первинного і вторинного опромінення, вступити у фотохімічну реакцію (що спостерігається у високо організованих тваринних організмів при інтервалі часу між первинним і реактивуєчим актами опромінювання більше 10^{-3} с).

У цьому випадку частина енергії реактивуєчого (вторинного) фотону випромінювання витрачається на розривання міжмолекулярних електронних зв'язків, що утворилися в первинній фотохімічній реакції, полегшуючи відновлення збуджених молекул у початковий енергетичний стан.

Чим складніший по структурній будові об'єкт опромінювання, тим більша ймовірність одержати фотореактивуєчу дію від вторинного опромінення і тим складнішим є ступеневий процес відновлення збуджених молекул у початковий енергетичний стан.

Розглянемо даний механізм *двохфотонного ступінчастого збудження молекули* при фотореактивації по узагальнюючій схемі передачі енергії збудження по електронних рівнях біоорганічної молекули, приведений на рис. 4.13.

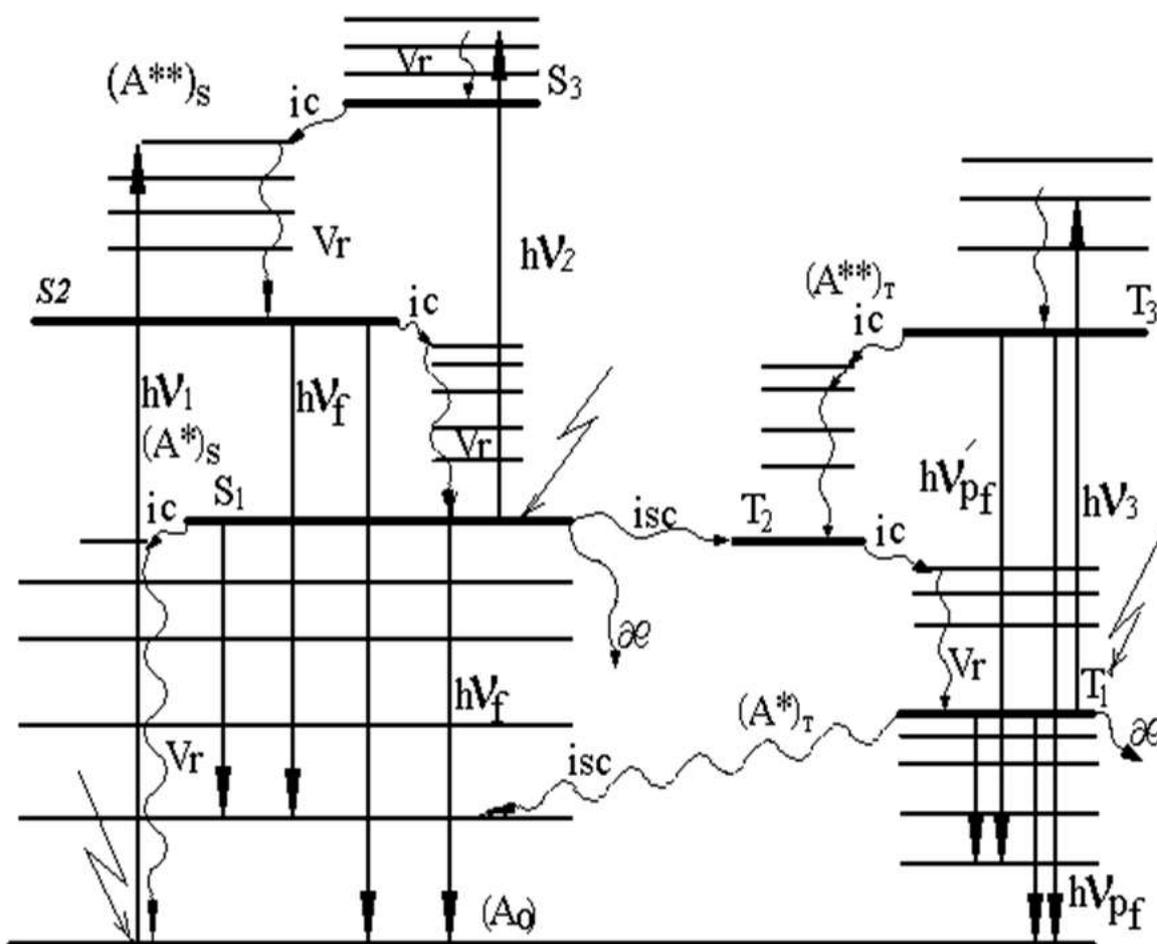


Рис.4.13. Схема допустимих енергетичних рівнів для транспорту енергії збудження в біологічній молекулі

На схемі застосовані такі позначення позначені:

$h\nu_1$ - енергія поглинання первинного (збуджуючого) фотону випромінювання;

$h\nu_2, h\nu_3$ - енергія поглинання вторинного (реактивуємого) фотону випромінювання;

$h\nu_f$ - енергія випромінювання флуоресценції із синглетного енергетичного рівня після первинного збудження ;

$h\nu'_f$ - випромінювання флуоресценції із синглетного енергетичного рівня при фотореактивації двофотонного ступінчастого збудження ;

$h\nu_{ph}$ - енергія випромінювання первинної флуоресценції із триплетного метастабільного енергетичного рівня;

$h\nu'_{ph}$ - енергія випромінювання флуоресценції із триплетного метастабільного енергетичного рівня при кооперативному процесі фотореактивації;

S_1, S_2, S_3, S_0 - основні синглетні “дозволені” енергетичні рівні біомолекули;

T_1, T_2, T_3 - метастабільні триплетні “дозволені” енергетичні рівні біомолекули;

Перерозподіл поглинутої енергії збудження безвипромінювальним шляхом позначений:

ν_r - між “дозволеними” однойменними подрівнями енергетичного рівня біомолекули;

i_s - між однойменними енергетичними рівнями молекули;

i_{sc} - між різнойменними енергетичними рівнями (синглет - триплетний або триплет-синглетний) молекули;

χ - витрати енергії на фотохімічну реакцію з іншою молекулою або її реструктуризацію(при неповній реактивації).

На схемі позначені всі ймовірні зміни енергетичного стану біоорганічної молекули з трьома “дозволеними” основними енергетичними рівнями збудження електронів.

Розглянемо процес ступінчастої двофотонної фотореактивації.

При поглинанні фотону первинного випромінювання $h\nu_1$ молекула переходить із вихідного (нейтрального) стану з енергією A_0 в збуджений (досить тривалий) стан A^* відповідного “дозволеного” енергетичного рівня



У цьому збудженому стані молекула поглинає квант вторинного (реактивуємого) випромінювання $h\nu_2$ і переходить у стан із ще більшою енергією A^{**} .



Ймовірний час життя τ^{**} молекули в цьому стані значно менший і вона переходить у початковий енергетичний стан (при неможливості віддати енергію збудження сусіднім молекулам), при цьому :

- випромінюючи короткохвильовий квант hv'_f (причому $hv'_f \geq hv_1 > hv_2$, але $hv'_f < hv_1 + hv_2$), цей процес описується виразом:



- безвипромінювально - віддаючи енергію збудження сусіднім молекулам резонансним, індукційним або екситонним шляхами:



Велику ймовірність у фотобіологічних процесах фотореактивації, що проходять у високоорганізованих біологічних системах має і процес кооперативного двохфотонного поглинання.

У цьому випадку первинний фотон випромінювання поглинається однією молекулою, а фотон реактивууючого випромінювання - іншою молекулою. Поглинена двома молекулами енергія мігрує до однієї із них, переводячи її в більш високий збуджений енергетичний стан, із якого ця молекула легко повертається в початковий незбуджений стан A_0 із випромінюванням сумарно поглиненої енергії.

Цей процес записується слідуючим чином :

- перша молекула поглинає фотон збуджуючого випромінювання, а друга молекула поглинає фотон реактивууючого випромінювання:



-друга молекула передає енергію збудження першій молекулі, переходячи при цьому в незбуджений стан:



-перша молекула віддає енергію кооперативного збудження в вигляді фотону флуоресценції подвійного збудження :



Згідно із *законом квантової еквівалентності Ейнштейна* число реагуючих молекул M пропорційно квантовому виходу фотореакції η

$$M = \eta \cdot N_{\phi}, \quad (4.35)$$

де

N_{ϕ} - кількість поглинутих фотонів (фотонів) випромінювання,
 η - квантовий вихід фотореакції.

На основі виразу 4.35 і теоретичних викладок приведених вище, залежність кількості молекул, що приймають участь в фотопроцесі, від інтенсивності збуджуючого випромінювання з достатньою точністю описуються такими виразами:

1. При ступінчастому збудженні молекули

$$\frac{dn^{**}}{dt} = n^* B_{23} \phi_{23} - n^{**} \frac{1}{\tau^{**}} \quad (4.36)$$

$$\frac{dn^*}{dt} = n_0 B_{12} \phi_{12} - n^* (B_{23} \phi_{23} + \frac{1}{\tau^*}) \quad (4.37)$$

де

n^* , n^{**} - число молекул у збудженому стані, відповідно на первинному і реактивуєчому енергетичних рівнях (A^* , A^{**});

B_{12} і B_{23} – ймовірності збудження електронів молекул, відповідно, на енергетичні рівні $S_1(T_1)$ і $S_3(T_3)$;

S_i, T_i – дозволени синглетний та триплетний енергетичні рівні збудження;

ϕ_{12} і ϕ_{23} - щільності потоку фотонів збуджуючого випромінювання, відповідно з першого на другий та з другого на третій енергетичні рівні;

τ^* і τ^{**} - період часу знаходження молекули в першому і другому збуджених станах (рис.4.13).

Розв'язок цих рівнянь дає можливість визначити *кількість реактивованих молекул повторним реактивуєчим опроміненням*

$$n^{**} = n_0 \frac{B_{12} B_{23} \phi_{23} \tau^* \tau^{**} \phi_{12}}{1 + B_{23} \phi_{23} \tau^*} \quad (4.38)$$

Аналіз рівняння (4.38) показує, що у випадку $B_{23} \phi_{23} \geq \frac{1}{\tau^*}$, число молекул в положенні реактиваційного збудження визначатиметься спрощеним виразом

$$n^{**} = n_0 B_{12} \phi_{12} B_{23} \phi_{23} \tau^* \tau^{**} \quad (4.39)$$

тобто

число молекул у вищому фотореактивованому збудженому стані пропорційно добутку щільності потоків випромінювання обох ступенів збудження (добутку інтенсивностей потоків фотонів збуджуючого і реактивууючого випромінювань).

Навпаки, якщо

$$B_{23}\phi_{23} \ll \frac{1}{\tau^*}, \text{ то}$$

$$n^{**} = n_0 B_{12} \tau^{**} \phi_{12} \quad (4.40)$$

тобто

число фотореактивованих молекул лінійно залежить від інтенсивності потоку випромінювання первинного збудження.

2. У випадку кооперативного механізму збудження фотореактивації рівняння (4.39) і (4.40) записуються так :

$$\frac{dn^{**}}{dt} = \alpha(n^*) - n^{**} \frac{1}{\tau^{**}} \quad (4.41)$$

$$\frac{dn^*}{dt} = n_0 B_{12} \phi_{12} - n^* \frac{1}{\tau^*} - 2\alpha(n^*)^2 \quad (4.42)$$

де $\alpha(n^*)$ - кількість збуджених до першого енергетичного рівня молекул, котрі віддають енергію збудження сусіднім молекулам для переведення їх на другий збуджений рівень (коефіцієнт кооперативної взаємодії), n^{**} - кількість молекул, в котрих фотореактивується первинне збудження.

Аналогічно ступінчастому двухфотонному збудженню, можна стверджувати, що у випадку якщо $\frac{n^*}{\tau^*} \gg 2\alpha(n^*)^2$ - кількість збуджених молекул до відповідного енергетичного рівня визначається з виразів:

збуджених до першого енергетичного рівня

$$n^* = n_0 B_{12} \phi_{12} \tau^* \quad (4.43)$$

збуджених на другий (реактивууючий) енергетичний рівень

$$n^{**} = \alpha n_0^2 B_{12}^2 \phi_{12}^2 (\tau^*)^2 \tau^{**} \quad (4.44)$$

тобто

при послідовному (кооперативному) механізмі фотореактивації кількість збуджених до фотореактивованого стану молекул в квадратичній степені залежить від інтенсивності збуджуючого випромінювання.

Якщо ж виникає співвідношення $\frac{n^*}{\tau^*} \ll (2\alpha(n^*))^2$ то кількість молекул збуджених на обидва енергетичні рівні визначається лінійною залежністю від інтенсивності потоку фотонів лише первинного збуджуючого випромінювання на відповідні енергетичні рівні:

$$n^* = \frac{1}{2\alpha} n_0 B_{12} \phi_{12} \quad (4.45)$$

$$n^{**} = \frac{1}{2} n_0 B_{12} \phi_{12} \tau^{**} \quad (4.46)$$

При аналізі наведеного процесу управління фотореакцію слід враховувати і те, що двохступеневе збудження електронів може проходити як по синглетним так і триплетним енергетичним рівням в залежності від “заселеності” їх підрівнів.

Заселеність синглетного енергетичного рівня під час опромінення визначається виразом

$$G_{S_1} = N_{S_1} \cdot \frac{\tau_1^*}{\tau_2} = \frac{I \cdot \tau_2 \sigma_1}{h\nu} \cdot \frac{\tau_1^*}{\tau_2} \quad (4.47)$$

де I – інтенсивність випромінювання;

τ_1^* – тривалість знаходження електрону на синглетному збудженому рівні S_1 ;

τ_2 – тривалість імпульсу випромінювання;

σ_1 – величина енергетичного переходу з основного рівня на збуджений ($S_0 \rightarrow S_1$);

N_{S_1} – кількість молекул, що перейшла в збуджений стан за час τ_2 .

Збуджені до рівня S_1 молекули із виходом ψ_{isc} переходять на рівень T_1 , де проходить їх “накопичення” до кінця часу імпульсу випромінювання їх число визначатиметься виразом

$$N_{T_1} = N_{S_1} \cdot \psi_{isc} \quad (4.48)$$

Середня заселеність триплетного енергетичного рівня на кінець часу опромінення становитиме

$$G_{T_1} = \frac{N_{T_1}}{2} = \frac{I \cdot \tau_2 \sigma_1}{2h\nu} \cdot \psi_{isc} \quad (4.49)$$

$$\overline{G_{T_1}} = \frac{N_{T_1}}{2} = \frac{I \cdot \tau_2 \sigma_1}{2h\nu} \cdot \psi_{isc} \quad (4.50)$$

Визначимо відношення заселеності збудженими електронами приведених енергетичних рівнів:

$$\Delta = \frac{G_{S1}}{G_{T1}} = \frac{I \cdot \tau_2 \sigma_1 \cdot \tau_1^*}{h\nu \cdot \tau_2} = \frac{2\tau_1^*}{\tau_2 \psi_{isc}} \quad (4.51)$$

Аналіз виразу (4.51) показує, що із збільшенням тривалості імпульсу випромінювання збільшується заселеність триплетного збудженого рівня, тобто збільшується кількість електронів збуджених на триплетні енергетичні рівня – таким чином, *реалізується триплетний канал двохступінчастого збудження*.

Виконаємо теоретичне дослідження можливості проходження одноступінчастої фотохімічної реакції.

Поскільки, квантовий вихід фотохімічної реакції визначається через відношення швидкості проходження хімічної реакції з вибраного енергетичного рівня до суми швидкостей всіхможливих дезактивацій даного рівня то квантовий вихід фотохімічної реакції із першого збудженого *синглетного* енергетичного рівня можна визначити із виразу:

$$\chi^S_{chem} = \frac{1/\tau^S_{chem}}{1/\tau^S_{chem} + 1/\tau^*_S + 1/\tau^S_{isc} + 1/\tau^S_{fl} + \sigma^S_2 \phi} \quad (4.52)$$

а квантовий вихід фотохімічної реакції з першого *триплетного* енергетичного рівня можна визначити за формулою

$$\chi^T_{chem} = \frac{1/\tau^T_{chem}}{1/\tau^T_{chem} + 1/\tau^*_T + 1/\tau^T_{isc} + 1/\tau^T_{fl} + \sigma^T_2 \phi} \cdot \psi_{isc} \quad (4.53)$$

де χ^S_{chem} , χ^T_{chem} – відповідно квантові виходи фотореакцій із синглетного і триплетного енергетичних рівнів збудження молекули (рис.4.13);

$1/\tau^T_{chem}$, $1/\tau^*_T$, $1/\tau^T_{isc}$, $1/\tau^T_{fl}$ – константи швидкостей дезактивації енергії збудження із синглетного і триплетного рівнів, відповідно, через - хімічну реакцію, темнову релаксацію, інтеркомбінаційну конверсію, флюоресценцію ;

$\sigma_2 \phi$ - енергетична характеристика кількості молекул і тривалості їх збудження на вищий (другий) енергетичний рівень .

Аналіз даних виразів показує, що чим більша тривалість і інтенсивність другого (реактивуєчого) імпульсу ($\sigma_2 \phi$) тим менша ймовірність у опромінюємих молекул вступити у фотохімічну реакцію після первинного (збуджуючого) імпульсу випромінювання і більша ймовірність перейти на вищий енергетичний рівень, що є достатнім поясненням явища фотореактивації.

Оскільки в процесі фотореактивації молекул високоорганізованих біологічних структур, які характеризуються складною будовою, значна ймовірність відновлення початкового стану збуджених молекул через випромінювання поглинутої енергії у вигляді фотонів люмінесценції, енергія

яких дорівнює повній енергії, затраченій на фотореактивацію, то *кількість фотореактивованих молекул біооб'єкта можна визначити* по інтенсивності потоку цих фотонів (по інтенсивності флуоресценції, або фосфоресценції) або в загальному випадку – *по інтенсивності, спектру і тривалості люмінесценції*

Так для випадку, коли випромінювальна дезактивація високоенергетичного збудженого стану (A^{**}) здійснюється за час значно менший, ніж періоди життя проміжних станів (протилежний випадок - поки що не інформативний) вирази для кількісного визначення випромінювання люмінесценції при ступінчатому або кооперативному механізмі збудження мають наступний вигляд:

- при ступінчатому збудженні молекул, процес зміни інтенсивності люмінесценції, після припинення дії реактивууючого збудження, буде відповідати експоненціальному закону:

$$n^{**}(t) = n_0^{**} \cdot e^{-t/\tau^{**}} \quad (4.54)$$

- залежність для визначення інтенсивності люмінесценції у випадку кооперативного механізму фотореактивації має вигляд:

$$n^{**}(t) = n^{**} \frac{e^{-2t/\tau^*}}{[1 - 2\alpha\tau^*n^*(1 - e^{-t/\tau^*})]^2} \quad (4.55)$$

З виразу (4.55) видно, що при кооперативному механізмі процес реактивації молекул з другого збудженого стану є складною функцією від тривалості знаходження молекул у першому збудженому стані τ^* та кількості (концентрації) молекул у цьому стані, n^* .

Наведені теоретичні викладки дозволяють стверджувати, що можна підсилювати або зменшувати первинну дію поглинутого короткохвильового випромінювання післядеюю більш довгохвильовим випромінюванням. Таким чином, створюються передумови оптичного керування конкретним фотобіологічним процесом (наприклад, регулювання процесом листяутворення або цвітоутворення у рослин, строком їх дозрівання та інше).

Керування енергетичними фотобіологічними процесами у організмі тварин і птиці.

Для тваринних організмів найбільше активно впливаючою ділянкою спектру оптичного випромінювання є ультрафіолетове випромінювання. Найбільш вразливою до ультрафіолетового випромінювання структурою тваринної клітини є ДНК (дезоксирибонуклеїнова кислота), що у своїй елементній і просторовій формі несе програмну інформацію розвитку і життєдіяльності даної клітини, органу, або всього організму .

Зміни у структурі ДНК, що виникають під впливом ультрафіолетового випромінювання, можуть призвести до мутації не тільки клітини конкретного органу, а навіть до зміни усього тваринного організму. Тому встановлення механізму впливу ультрафіолетового випромінювання на ДНК, розробка засобу

регулювання цього впливу має дуже важливе значення для продуктивності і розвитку тваринництва.

Встановлено, що під дією ультрафіолетового випромінювання (254нм) у молекулі ДНК утворюються *піримідинові дімери*. При наявності ферменту-фотокаталізатора (названого фотореактивуючим) під дією менше енергетичних фотонів випромінювання видимої області (400нм) ці дімери руйнуються і ДНК відновлюється. Іншими словами, відбувається фотореактивація ураження нанесеного ультрафіолетовим випромінюванням молекулі ДНК.

Пояснення цього процесу фотореактивації можливо з позиції приведенного вище двухфотонного кооперативного збудження молекули.

- *Первинне (пошкоджуюче ультрафіолетове) випромінювання поглинається структурними молекулами ДНК – піримідинами і переводить їх у збуджений енергетичний стан. У цьому стані молекули вступають у хімічну реакцію і утворюють димер.*
- *При наявності фотореактивуючого ферменту-каталізатора, повторне (видиме) випромінювання поглинається ним і кооперативно передається димеру.*
- *Молекули димера збуджуються до рівня, із якого можлива їхня руйнація на первинні мономери, тим самим, відбувається відновлення (реактивація) ДНК до початкового стану.*

Не менш важливою дією ультрафіолетового випромінювання на організм тварини є **утворення вітаміну Д** в його шкіряному покриві.

Відповідно до викладеного механізму фотореактивації експозицію (дозу) ультрафіолетового випромінювання необхідного для утворення визначеної зоотехнічними нормами кількості вітаміну Д у тварини можна зменшити, якщо зменшити фотореактивуючу дію видимого випромінювання (на виробництві ультрафіолетове опромінення проводиться вдень, одночасно із освітленням тваринницьких приміщень). Тобто - це якщо застосовувати ультрафіолетове опромінювання тварин при мінімальному освітленні (у нічний час - без джерел освітлення). В даному випадку ефективність ультрафіолетового випромінювання буде більшою (не буде реактивуючої дії енергії видимого випромінювання). Таке опромінення економічно вигідно, оскільки зменшує енергетичні витрати.

4.4. Закономірності дозування енергетичного впливу оптичного випромінювання на біологічні об'єкти

4.4.1. Вивчення дії променистої енергії на основі визначення кількості поглинутої енергії та механізму її перетворення

На основі сучасних уявлень про будову і організацію тваринного організму при дослідженні дії променистої енергії доцільно використовувати *принцип ієрархічності* побудови організму: в залежності від конкретності поставленої задачі та повноти її вирішення послідовно розглядається дія променистої енергії на рівні *клітини - органу - організму*.

При вивченні дії променистої енергії одним із основних параметрів є кількість поглинутої енергії та механізм її перетворення. Реалізація поглинутої енергії залежить як від властивостей навколишнього середовища і опромінюваного об'єкту, так і характеристик самого випромінювання.

Для опису складних процесів та явищ, де важко визначити в аналітичній формі математичне відношення між фізичними величинами, для спрощення можуть бути використані складені величини

$$\begin{aligned} A^* &= A + a - \text{в адитивній формі, або} \\ A^* &= A \otimes a - \text{в мультиплікативній формі і т.п.} \end{aligned} \quad (4.56)$$

де A – фізична величина, a – регламентована величина.

Регламентованою величиною може бути, наприклад, константа, яка вибрана на основі експертної оцінки та із практичних міркувань.

Така фізична величина, як кількість поглинутої енергії або її похідні, в тій чи іншій формі входить в кожен математичну модель, яка описує дію електромагнітного випромінювання будь якого спектрального діапазону (від γ – випромінювання до радіохвильового діапазону) на біологічні об'єкти.

В фотобіології поглинена енергія (доза) D_n визначається як відношення кількості поглинутої енергії Q_i до маси m_i речовини, в якій поглинута ця енергія:

$$D_n = \left(\frac{\Delta Q_i}{\Delta m_i} \right) = \frac{dQ_i}{dm_i} \quad (4.57)$$

Якщо розглядати дозу як кількість енергії, поглинуту структурою Δm_i , що іде на розвиток заданого ефекту в організмі, то середньозважене значення поглинутої дози для всіх структур організму (тобто самого організму) визначатиметься із виразу:

$$\bar{D}_n = \frac{\sum_i \frac{dQ_i}{dm_i} \times \Delta m_i}{\sum_i \Delta m_i} = \frac{\sum_i \frac{dQ_i}{dm_i} \times \Delta m_i}{M} = \sum_i D_{ni} \cdot p_i \quad (4.58)$$

де $M = \sum_i \Delta m_i$ сумарна маса елементарних структур (маса опромінюваного організму); $p_i = \Delta m_i / M$ – відносна маса елементарної структури.

Порівняння 4.47 і 4.58 показує, що визначити D_{ni} через D_n в практичних умовах застосування оптичної енергії для опромінення тваринних організмів не можливо, тому що елемент Δm_i (наприклад, клітина шкіри) лежить на нижчому ієрархічному рівні будови організму відносно M (всього тіла).

Для математичного моделювання процесу реалізації поглинутої енергії ввести поняття відносної енергоємності, через співвідношення:

$$D_{ni} = \frac{n_i}{p_i} \cdot \bar{D}_n \quad (4.59)$$

де $n_i = \frac{\Delta Q_i}{\sum \Delta Q_i}$ - відносна енергоємність опромінюваної структури.

Враховуючи об'єктивні характеристики організму: α – коефіцієнт поглинання променистої енергії тілом та ρ - щільність реагуючих одиниць в структурі організму вираз (4.59) можна записати :

$$D_{ni} = \frac{n_i}{p_i} \cdot \overline{D}_n = \frac{n_i}{p_i} \cdot \alpha \cdot \frac{1}{\rho} \cdot D_0 \quad (4.60)$$

де $\overline{D}_n = \alpha \cdot \frac{1}{\rho} \cdot D_0$;

D_0 - кількість енергії, яка поступила в структури організму (нормована по ефекту біологічної дії);

$V = \frac{M}{\rho}$ об'єм опромінюваного організму.

Із виразу (4.60) видно, що коефіцієнт поглинання можна визначити лише експериментальним шляхом через відношення енергії, що входить в опромінюваний об'єм і виходить з нього.

В практиці використання променистої енергії для опромінювання тваринного організму часто поглинута енергія визначається через енергію, що падає на одиницю поверхні опромінюваного об'єму:

$$H_e = \frac{dQ_e}{ds} = \alpha \cdot \frac{dQ_e^i}{ds} \quad (4.61)$$

де H_e -щільність потоку енергії, що поступає в організм крізь поверхню S,

Q_e^i - енергія, що падає на опромінювану поверхню,

α -коефіцієнт поглинання,

$Q_e = Q_e^i \cdot \alpha$ - ефективно поглинута енергія.

Із виразів (4.60) і (4.61) можна визначити дозу поглиненої променистої енергії через щільність потоку падаючої енергії і оптичні характеристики опромінюваного об'єму організму:

$$\overline{D}_n = \frac{dH_e}{\rho \cdot dL} \quad (4.62)$$

де $dL = dV/dS$ - характеристика глибини проникання і перетворення енергії в об'ємі організму.

4.4.2. Обґрунтування та визначення критерію ефективності дії оптичного випромінювання на тваринний організм

При опромінюванні біологічних об'єктів і дослідженні різних фотобіологічних реакцій для визначення енергетичного критерію ефективності дії оптичного випромінювання користуються поняттям дози або експозиції оптичного опромінювання.

Доза опромінювання визначає кількість енергії оптичного випромінювання, що поглинається в об'ємі опромінюваного біологічного об'єкту і спричиняє утворення тих чи інших продуктів.

В більшості фотобіологічних досліджень реальним визначаючим критерієм є лише доза (експозиція) променистої енергії, що падає на поверхню опромінюваного тіла:

$$H = \int_{\lambda} \int_t E(\lambda, t) d\lambda dt \quad (4.63)$$

де H – кількість енергії оптичного випромінювання із довжиною хвилі λ , що падає на поверхню тіла опромінюваної тварини за час t ; $E(\lambda, t)$ – спектральна опроміненість поверхні тварини в момент часу t ; t – період опромінювання тварини.

Такий підхід обумовлений відсутністю даних по кількісних і якісних характеристиках поглинаючих структур опромінюваних об'єктів.

На практиці розрізняють *порогову, критичну (летальну) і оптимальну* дози випромінювання, що поступає на опромінювану поверхню.

Порогова доза опромінювання – це мінімальна кількість енергії випромінювання, що падає на опромінювану поверхню тіла, поглинається в ньому і є достатньою для реєстрації початку фотобіологічної реакції.

Оптимальна доза опромінювання – це кількість енергії випромінювання, що поступає на опромінювану поверхню тіла і є достатньою для отримання максимально можливої кількості продукту фотобіологічної реакції.

Критична доза опромінювання – це максимальна кількість енергії випромінювання, що поступає на опромінювану поверхню і призводить до початку насичення продуктом фотобіологічної реакції (стабілізується вихід продукту фотореакції при збільшенні дози або починається реструктуризація реагуючих біомолекул).

Порогова доза опромінення важлива при визначенні чутливості біологічного об'єкту до даного випромінювання або реєстрації початку фото процесу з метою його подальшого стимулювання та керуванням.

В практиці застосування оптичного випромінювання приведені дози опромінювання визначаються експериментальним шляхом, методом накопичення і аналізу результатів експериментальних досліджень.

Таким чином встановлено галузеві норми оптимального освітлення сільськогосподарських та суспільно - побутових приміщень, норми ультрафіолетового опромінення тварин та птиці, режими інфрачервоного обігріву молоді сільськогосподарських тварин і птиці та норми бактерицидного знезаражування сільськогосподарської продукції і інше.

Цей загально прийнятий підхід до визначення критерію ефективності оптичного опромінювання є дещо некоректним тому, що визначені (так звані - *нормативні*) дози опромінювання є (див. вираз 4.63) опосередкованими, узагальнюючими, не враховуються ні породні особливості тварин, ні їх вагових

відмінностей, ні стану здоров'я, ні оптичних властивостей їх зовнішнього покриву, ні особливостей умов їх утримання .

При встановленні нормативів використання енергії оптичного випромінювання в галузях сільського господарства недостатня увага приділена і визначенню та використанню *спектрів біологічної дії оптичного випромінювання*, узгодженню із ними спектрів випромінювання джерел, що використовуються в даних технологіях одержання продукції.

Приклад часткової реалізації спостерігається лише в тепличних технологіях вирощування рослинної продукції.

В тваринництві метод не використовувався через відсутність конкретних кількісних результатів по взаємодії оптичного випромінювання з тваринним організмом та прийнятної математичної моделі кількісної оцінки енергетичної дії спектру оптичного випромінювання на тваринний організм.

4.4.3. Розробка математичної моделі кількісної оцінки енергетичної дії спектру оптичного випромінювання на тваринний організм

Визначення кількісної оцінки та розробку математичної моделі енергетичної дії спектру оптичного випромінювання на тваринний організм проведено в даному розділі на основі використання законів фото біофізики та попередніх науково практичних розробок проф. Червінського Л.С. Згідно із законом квантової еквівалентності Ейнштейна в основу фотобіологічної реакції покладено взаємодію фотонів оптичного випромінювання із молекулами опромінюваної структури. При цьому ефективність фото реакції визначається відношенням

$$\eta = \frac{M}{N_{\phi}} \quad (4.64)$$

де η - квантовий вихід фотореакції; M - число молекул, що вступили в реакцію; N_{ϕ} - число фотонів оптичного випромінювання, що проникли в товщу тіла опромінюваного об'єкту і взаємодіють з даними молекулами.

Оскільки будь-яка фотореакція має свою тривалість, число поглинених фотонів N_{ϕ} за час t визначається як :

$$N_{\phi} = n \times t \quad (4.65)$$

де n - кількість поглинених фотонів випромінювання за одиницю часу ;

t - час опромінювання (тривалість фото реакції).

Число молекул (M), що вступили у реакцію, згідно із законами фізичної хімії, можна визначити як:

$$M = \frac{g \cdot N_A}{G} \quad (4.66)$$

де N_A - число Авогадро ($6,03 \cdot 10^{23}$)- характеризує кількість молекул у грам-молі даної речовини, масою G ; g - маса речовини, що приймає участь у фото реакції.

При відомій кількості продукту фотореакції із (4.56) можна визначити кількість поглинених фотонів

$$N_{\phi} = \frac{M}{\eta} \quad (4.67)$$

Підставляючи значення (4.64) і (4.65) у (4.66) одержуємо

$$n \cdot t = \frac{g \cdot N_A}{G \cdot \eta} \quad (4.68)$$

Якщо примножити ліву і праву частини виразу (4.68) на енергію кванта оптичного випромінювання (ϵ_{λ}) одержуємо рівняння Вант-Гоффа –Лазарєва для визначення балансу фотохімічної реакції : - з лівого боку стоїть вираз, що визначає кількість енергії оптичного випромінювання поглинутого опромінюваним тілом; а з правого боку – вираз, що визначає енергію спожиту в процесі фото реакції на утворення продукту :

$$n \cdot t \cdot \epsilon_{\lambda} = \frac{g \cdot N_A}{G \cdot \eta} \epsilon_{\lambda} \quad (4.69)$$

де індекс λ відзначає, що поглинаються фотони конкретного монохроматичного випромінювання з довжиною хвилі, рівною λ нм.

Аналіз формули (4.69) показує, що ліва частина виразу визначає кількість поглиненої енергії монохроматичного випромінювання Q за час опромінення t .

$$Q = n \cdot t \cdot \epsilon_{\lambda} = N_{\phi} \cdot \epsilon_{\lambda} \quad (4.70)$$

Використовуючи закон Бугера- Ламберта – Бера, визначимо поглинуту об'єктом енергію через падаючу на його поверхню від джерела оптичного випромінювання :

$$Q = Q_i \cdot (1 - e^{-kl}) \quad (4.71)$$

де Q_i - кількість енергії, що поступає на опромінювану поверхню;
 l - товщина опромінюємого прошарку речовини;

k - показник поглинання випромінювання молекулами по товщині опромінюємого прошарку.

Виразимо падаючу на речовину енергію через потік випромінювання Φ_n , що поступає на його поверхню

$$Q_i = \Phi_n \cdot t \quad (4.72)$$

тоді поглинена молекулами енергія випромінювання визначиться як

$$Q = \Phi_n \cdot t(1 - e^{-kl}) \quad (4.73)$$

Розділимо ліву і праву частини виразу (4.73) на площу опромінюваної поверхні S і, тим самим, визначимо енергію, падаючу від джерела випромінювання на одиничну площу поверхні об'єкту

$$\frac{Q}{S} = \frac{\Phi_n}{S} t(1 - e^{-kl}) \quad (4.74)$$

Замінюючи відношення $\frac{\Phi_n}{S}$ через параметр E – опроміненість поверхні об'єкту одержуємо :

$$\frac{Q}{S} = E \cdot t(1 - e^{-kl}) \quad (4.75)$$

добуток $E \times t$ (згідно з виразом 4.63) визначає кількість енергії , що падає на поверхню опромінюваного тіла за час t , тобто дозу опромінення H .

Отже з виразу (4.75) доза опромінення визначиться як

$$H = \frac{Q}{S(1 - e^{-kl})} \quad (4.76)$$

Замінюючи $(1 - e^{-kl})$ через α - коефіцієнт поглинання випромінювання і представивши поглинену енергію Q через праву частину виразу (4.74), одержимо вираз для визначення дози опромінення H поверхні біологічного об'єкту випромінюванням із довжиною хвилі λ нм, необхідної для одержання кількості g маси продукту фото реакції

$$H_\lambda = \frac{g \cdot N_A \cdot \epsilon_\lambda}{G \cdot \eta_\lambda \cdot S \cdot \alpha_\lambda} \quad (4.77)$$

Позначимо відношення $\frac{\epsilon_\lambda}{\eta_\lambda}$ через μ_λ – енергетичний коефіцієнт ефективності фотону випромінювання з довжиною хвилі λ .

Тоді дозу опромінення, необхідну для утворення заданої кількості продукту фото реакції (в діапазоні спектру ефективної дії - від λ_1 , до λ_2) за період опромінення t , відповідно до виразу 4.63, можна записати так :

$$H_{(\lambda,t)} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{g \cdot N_A}{G \cdot S \cdot \alpha(\lambda)} \mu(\lambda) d\lambda dt \quad (4.78)$$

або

$$H_{(\lambda,t)} = \frac{g \cdot N_A}{G \cdot S} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\mu(\lambda)}{\alpha(\lambda)} d\lambda dt \quad (4.79)$$

або, в кінцевому вигляді

$$H_{(\lambda,t)} = \frac{M}{S} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\mu(\lambda)}{\alpha(\lambda)} d\lambda dt \quad (4.80)$$

де

$g \cdot N_A / G = M$ – кількість продукту фотореакції, що утворюється під дією випромінювання (в діапазоні спектру випромінювання від λ_1 , до λ_2);

$\mu(\lambda)$ - спектральний енергетичний коефіцієнт фотореакційності випромінювання з довжиною хвилі λ ;

$\alpha(\lambda)$ спектральний коефіцієнт поглинання випромінювання з довжиною хвилі λ в товщі опромінюваного об'єкту;

S - площа опромінюваної поверхні об'єкту .

Аналіз (4.80) показує, що по даній залежності визначається фактична доза опромінення, тобто кількість енергії оптичного випромінювання заданого спектру біологічної дії, яку необхідно подати на поверхню опромінюваного об'єкту для утворення в ньому *конкретної (прогнозованої) кількості продукту фотореакції*.

Узагальнюючи викладене вище можна записати *математичну модель взаємодії* енергії оптичного випромінювання із структурами тваринного організму у вигляді енергетичного балансу :

$$\frac{M}{S} \int_{\lambda_1}^{\lambda_i} \frac{\mu(\lambda)}{\alpha(\lambda)} d\lambda dt = \frac{1}{S} \int_{\lambda_1}^{\lambda_i} \Phi_n(\lambda) d\lambda dt \quad (4.81)$$

де:

- ліва частина виразу визначає кількість енергії оптичного випромінювання, з довжиною хвилі від λ_1 до λ_i нанометрів, використану на утворення заданої (M) кількості продукту фотореакції в товщі тіла опромінюваної тварини (об'єкту),

- права частина виразу показує енергію потоку випромінювання (Φ_n) від джерела оптичного випромінювання, що падає на поверхню тіла тварини (S) і протягом заданого часу опромінення (t) спричиняє утворення в товщі тіла заданої кількості продукту (M) фотореакції.

В ліву частину виразу також входить коефіцієнт ефективного поглинання енергії випромінювання об'єктом $\alpha(\lambda)$, котрий характеризує оптичні властивості об'єкту (характеристики опромінюємої поверхні, глибину проникнення

випромінювання в товщу об'єкту і місце взаємодії поглинутих фотонів випромінювання з молекулами у фотореакції).

Вираз (4.81) є загальною математичною моделлю, яка дозволяє показати і дослідити *енергетичний зв'язок джерела оптичного випромінювання із об'єктом опромінювання* і надає можливість вирішувати такі важливі практичні задачі :

-для конкретного виду тварин при відомих оптичних характеристиках їх покриву і спектрах фотобіологічної дії енергії оптичного випромінювання отримана практична можливість підібрати найефективніше джерело оптичного випромінювання для забезпечення оптимального проходження даної фото реакції в організмі тварини ;

-отримана можливість прогнозувати кількісні і якісні результати процесу опромінювання по заданому спектру біологічної дії;

-отримана можливість забезпечити автоматичне керування технологічним процесом опромінювання та регулювання режимів опромінювання по відомій залежності продукту фото реакції від інтенсивності (часу) опромінення.

4.5. Термодинамічні аспекти та закономірності оптичних електротехнологій

При передачі оптичної енергії тварині або рослині в технологічних схемах опромінювання ефективно використовується від 30% до 90% падаючої енергії оптичного випромінювання. Безпосередньо при первинній взаємодії фотонів оптичного випромінювання з організмом тварини, внаслідок спектральних особливостей та фотофізичного механізму поглинання ефективно перетворюється від 35% до 85% падаючого на поверхню випромінювання. В середньому корисне використання спожитої електроенергії в різних оптичних електротехнологічних установках становить від 20% до 70%.

Особливістю оптичних електротехнологій (ОЕТ) є те, що втрати енергії можуть виникати в процесі генерації випромінювання джерелом, під час передачі випромінювання від джерела об'єкту опромінювання і в самому об'єкті опромінювання в процесі її перетворення.

Оскільки живий організм взаємодіє з навколишнім середовищем як відкрита саморегульована термодинамічна система, для опису процесів, що протікають у ній доцільно застосовувати закони феноменологічної нерівноважної термодинаміки безповоротних процесів. Основним із них є другий закон термодинаміки у формулюванні Пригожина:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_i}{dt} + \frac{dS_e}{dt} \geq 0 \quad (4.82)$$

де $\frac{dS}{dt}$ - визначає швидкість (динаміку) потоку ентропії всієї системи, $\frac{dS_i}{dt}$ - швидкість потоку ентропії із системи, $\frac{dS_e}{dt}$ - швидкість потоку ентропії у систему.

По даним В.Н. Карпова, І.З. Щура, які ґрунтовно розглядають ОЕТ як термодинамічні системи типу “джерело оптичної енергії - середовище передачі випромінювання – об’єкт опромінювання”, для аналізу системи ОЕТ достатньо стабілізувати лише приріст ентропії всередині системи, тобто швидкість її зміни в часі:

$$\sigma_S = \frac{dS_i}{dt} = \sum_k \bar{J}_k \bar{X}_k \geq 0 \quad (4.83)$$

де J_k - термодинамічні потоки в системі, \bar{X}_k - термодинамічні рушійні сили в системі.

Систему доцільно розглядати в умовах локальної рівноваги, коли виконується принцип лінійності Онзагера про те, що енергетичний потік може спричинятись різними термодинамічними силами, для яких справедлива залежність

$$\bar{J}_k = \sum L_{kj} \bar{X}_j \quad (4.84)$$

де L_{kj} - і-тий кінетичний коефіцієнт відповідної термодинамічної сили.

У якості J_k визначаються потоки вільної енергії або ексергії на виконання потенційної роботи у системі показаній на рис.1.

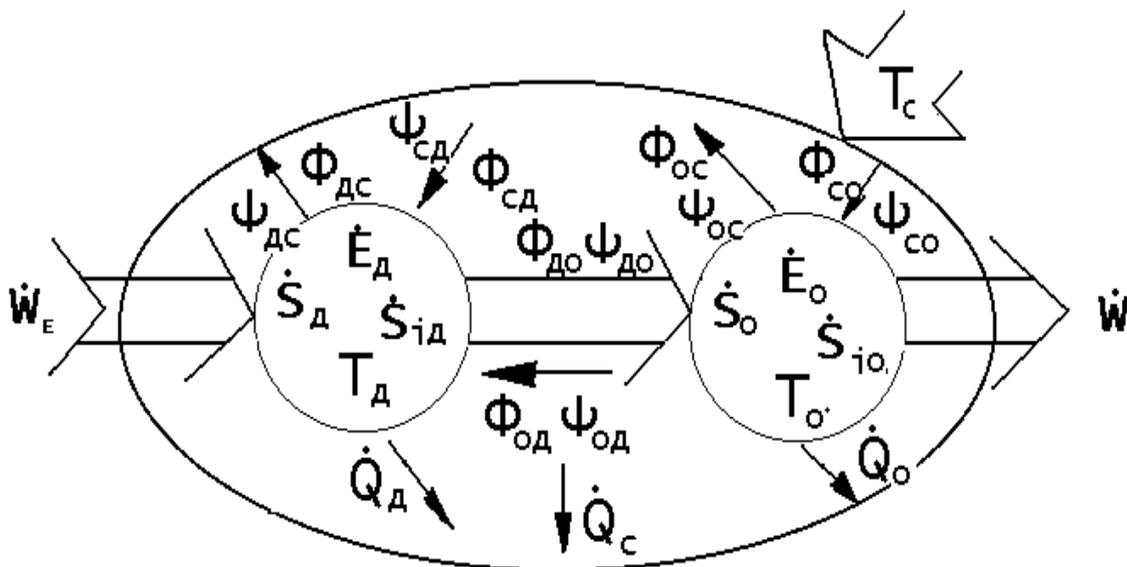


Рис.4.14. Структурна схема енергетичних і ентропійних потоків в системі ОЕТ (по Карпову В.А)

Система складається із джерела випромінювання (Д) і об'єкта опромінювання (О) сполучених між собою середовищем (С). Стрілками показані відповідні потоки енергії (Φ) і ентропії (ψ).

На вхід системи поступає безентропійний потік енергії W_E , а на виході системи (в об'єкті) одержується безентропійний потік корисної роботи (вільної енергії) W . Головний напрям поширення енергії в системі показано широкою стрілкою. Індокси ($OD, DO OC \dots$) показують напрямок передачі потоку енергії або ентропії (DO - від джерела до об'єкта). Q – визначає потоки теплової енергії, T – температуру протікання процесів передачі енергії.

Відповідно до (4.84) зміни величини потоків енергії і ентропії в джерелі випромінювання визначаються залежностями:

$$\begin{aligned} \frac{dE_\delta}{dt} &= \frac{W_\delta}{dt} - \frac{d\Phi_{\delta c}}{dt} + \frac{d\Phi_{c\delta}}{dt} - \frac{d\Phi_{\delta o}}{dt} + \frac{d\Phi_{o\delta}}{dt} - \frac{dQ_\delta}{dt}, \\ \frac{dS_\delta}{dt} &= -\frac{d\Psi_{\delta c}}{dt} + \frac{d\Psi_{c\delta}}{dt} - \frac{d\Psi_{\delta o}}{dt} + \frac{d\Psi_{o\delta}}{dt} - dQ_\delta/dT_\delta + \frac{dS_{i\delta}}{dt}. \end{aligned} \quad (4.85)$$

де $S_{i\delta}$ - визначає продукування ентропії в джерелі випромінювання. Її доцільно визначати по структурних складових: виробництву ентропії в процесах перетворення електричної енергії у енергію оптичного випромінювання $S_{i\delta t} = \frac{W_E - Q_\delta}{T_f}$ і виробництву ентропії теплової енергії $S_{i\delta v} = Q_\delta/T_\delta$.

T_f - температура потоку випромінювання.

Для теплових джерел випромінювання ця температура дорівнює температурі випромінюючій спіралі $T_f = T_\delta$, для газорозрядних джерел випромінювання із лінійчатим спектром випромінювання температура лінії визначається з виразу:

$$T_f = \frac{h\nu}{k} \left[\ln\left(\frac{2h\nu^3 A\Omega}{c^2\Phi_{\delta v}} + 1\right) \right], \quad (4.86)$$

де $h\nu$ - енергія фотону з частотою ν , A - площа перерізу пучка променів, Ω – тілесний кут розподілу випромінювання від джерела, k – постійна Больцмана, c – швидкість світла.

Потоки енергії і ентропії в об'єкті опромінювання визначаються за аналогічними виразами:

$$\begin{aligned} \frac{dE_o}{dt} &= -\frac{W_o}{dt} + \frac{d\Phi_{\delta c}}{dt} - \frac{d\Phi_{c\delta}}{dt} + \frac{d\Phi_{co}}{dt} - \frac{d\Phi_{oc}}{dt} - \frac{dQ_o}{dt}, \\ \frac{dS_o}{dt} &= \frac{d\Psi_{\delta c}}{dt} - \frac{d\Psi_{c\delta}}{dt} + \frac{d\Psi_{co}}{dt} - \frac{d\Psi_{oc}}{dt} - dQ_o/dT_o + \frac{dS_{io}}{dt}. \end{aligned} \quad (4.87)$$

Із виразів (4.86) і (4.87) визначається енергія, що витрачається на корисну роботу в об'єкті опромінювання для створення заданого фотопродукту.

Для стаціонарного режиму опромінення (випадок, коли $E_d=E_o=S_d=S_o=0$) корисно використана енергія визначатиметься виразом:

$$W = [1 - (1 - \eta_f)(1 - T_c/T_o)] \times (\Phi_{do} - \Phi_{od} + \Phi_{oc} - \Phi_{co}) - T_c(\Psi_{do} - \Psi_{od} + \Psi_{oc} - \Psi_{co}) - T_o S_{io}. \quad (4.88)$$

де T_c – температура середовища, T_o – температура об'єкта, η_f – термодинамічний к.к.д. процесу опромінювання об'єкту, ($\eta_f = 1 - Q_o/\sum \Phi_o$), $\sum \Phi_o = \Phi_{do} - \Phi_{od} + \Phi_{dc} - \Phi_{cd}$.

На основі виразу (4.88) можна визначити ефективність перетворення спожитої джерелом електричної енергії в корисну роботу оптичного опромінення через відношення:

$$\eta_w = \frac{W}{W_E} = \frac{\{[1 - (1 - \eta_f)(1 - T_c/T_o)](\Phi_{do} - \Phi_{od} + \Phi_{oc} - \Phi_{co}) - T_c(\Psi_{do} - \Psi_{od} + \Psi_{oc} - \Psi_{co} + S_{io})\}}{\Phi_{do} - \Phi_{od} + \Phi_{oc} - \Phi_{co}}. \quad (4.89)$$

Аналіз рівняння (4.89) показує, що ефективність використання електроенергії на оптичне опромінення залежить від к.к.д. процесу опромінювання (оптичних характеристик джерела та об'єкту опромінювання), температур середовища і об'єкту та балансу потоків енергії і ентропії відносно навколишнього середовища.

Потоки енергії і ентропії визначаються за виразами

$$\begin{aligned} \Phi &= \iiint_{A\Omega\nu} K(\nu) \cos \vartheta \, d\nu d\Omega dA, \\ \Psi &= \iiint_{A\Omega\nu} L(\nu) \cos \vartheta \, d\nu d\Omega dA, \end{aligned} \quad (4.90)$$

де $K(\nu)$ – спектральна щільність потоку випромінювання, $L(\nu)$ – спектральна щільність потоку ентропії, $d\Omega = \sin \vartheta \, d\varphi d\vartheta$ – напрям поширення потоку в полярній системі координат, ϑ – кут між нормаллю до поверхні тіла і напрямком потоку випромінювання.

Спектральну щільність потоку енергії випромінювання нескладно визначити експериментально, а спектральну щільність потоку випромінювання ентропії можна знайти за законами випромінювання абсолютно чорного тіла із виразу:

$$L_\nu = \frac{h\nu^3}{c^2 T} \left(\exp \frac{h\nu}{kT} - 1 \right)^{-1} - \frac{k\nu^2}{c^2} \ln \left[1 - \exp \left(- \frac{h\nu}{kT} \right) \right], \quad (4.91)$$

Для визначення щільностей потоків випромінювання енергії і ентропії на опромінюваній поверхні Ландсберг і Барух запропонували використовувати залежності:

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi}{dA} &= Bl \int_{\nu} \frac{h\nu^3}{c^2} n_{\nu} d\nu = \frac{15\sigma}{2\pi^5} BlT^4 I(n), \\ \frac{dS}{dA} &= \frac{15\sigma}{2\pi^5} BlT^3 J(n) \quad , \end{aligned} \quad (4.96)$$

де $B = \cos \vartheta d\Omega$ - характеризує напрям розповсюдження потоку оптичної енергії в просторі, l - поляризованість потоку (поляризоване випромінювання $l=1$, неполяризоване $l=2$),

$I(n) = \int x^3 n dx$, n - функція розподілення потоку в заданому напрямку, $J(n) = \int x^2 [\ln(1+n) + n \ln(1+n)^{-1}] dx$, $x = \frac{h\nu}{kT}$ - відносна спектральна координата.

На практиці важливо визначити розподіл енергії і ентропії випромінювання в процесі поглинання і перетворення опромінюваним об'єктом.

Після незначних перетворень енергетичну дію поглинутого об'єктом випромінювання характеризують виразом:

$$\Phi_e(\lambda) = \alpha(\lambda)\beta(\lambda)\gamma(\lambda)\Phi_{над}(\lambda), \quad (4.97)$$

де $\alpha(\lambda)$ - спектральний коефіцієнт поглинання опромінюваного середовища, $\gamma(\lambda)$ - спектральний коефіцієнт корисного перетворення поглинутої енергії, $\beta(\lambda)$ - спектральний коефіцієнт ефективності поглинутої енергії на виконання головної роботи.

На основі розглянутого вище балансу (4.81) запропоновано характеризувати поглинуту енергію випромінювання в об'єкті, яка може прийняти участь у виконанні корисної роботи, коефіцієнтом максимальної роботоzдатності фотонів заданого спектру η_m :

$$\eta_m = \int \exp(-\zeta)(1 - 0,0202\lambda\zeta)/\eta_{над} d\zeta, \quad (4.98)$$

де ζ -оптична щільність поглинаючого середовища об'єкта, $\zeta = \alpha(\lambda)z$, z - глибина проникання; $\eta_{над} = 1 - T_c \frac{\Psi_o}{\Phi_o}$ - термодинамічний к.к.д. енергії випромінювання на опромінюваній поверхні.

Із врахуванням (4.97) і (4.98) термодинамічний ККД роботоzдатності (ексергії) потоку енергії поглинутого випромінювання від ламп розжарювання визначається із відношення:

$$\eta_e^1 = \frac{\int_0^{\lambda_i} \Phi_e(\lambda) \eta_{дж}(\lambda) \eta_m(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\lambda_i} \Phi_{пад}(\lambda) d\lambda}, \quad (4.99)$$

де $\eta_m = 1 - \frac{T_c}{T_0}$.

Термодинамічний ККД роботоздатності від газорозрядних джерел випромінювання із лінійчатим спектром потоку випромінювання визначається через суму потоків випромінювання ліній за виразом:

$$\eta_e^1 = \frac{\sum_i \Phi_{ei}(\lambda_i) \eta_{дж}(\lambda_i) \eta_{im}(\lambda_i)}{\sum_i \Phi_{паді}} \quad (4.100)$$

де $\eta_{im} = \alpha(\lambda) \beta(\lambda) \gamma(\lambda) \frac{\lambda_i}{\lambda_k} \eta_{паді} \eta_f$ - термодинамічний к.к.д. монохроматичного випромінювання лінії, λ_k - гранична довжина хвилі ефективного поглинання випромінювання.

Термодинамічний ККД сучасних світлодіодних (LED) джерел оптичного випромінювання визначається аналогічно.

$$\eta_{it} = \alpha(\lambda) \beta(\lambda) \gamma(\lambda) \frac{\lambda_i}{\lambda_k} \eta_{паді} \eta_f \quad (4.101)$$

Узагальнюючи результати приведених досліджень термодинамічних процесів в ОЕТ, констатуємо, що для підвищення енергетичної ефективності (к.к.д.) процесу використання енергії оптичного випромінювання в технологічних процесах при відомих параметрах джерела випромінювання необхідно також знати оптичні і енергетичні характеристики середовища, в якому розповсюджується випромінювання від джерела і самого об'єкта опромінювання: $\alpha_i(\lambda)$ - спектральні коефіцієнти поглинання середовища і опромінюваного об'єкту, $\gamma_i(\lambda)$ - спектральний коефіцієнт корисного перетворення поглинутої енергії та $\beta_i(\lambda)$ - спектральний коефіцієнт ефективності перетворення поглинутого випромінювання на виконання головної корисної дії в об'єкті опромінювання.

4.6. Фотоелектрокаталітичні процеси перетворення оптичної енергії

Фотоелектрокаталітичними процесами перетворення енергії оптичного випромінювання називають процеси оптичного опромінювання, в яких кванти оптичної енергії взаємодіють із молекулами сприймаючих проміжних структур. Ці молекули передають енергію поглинутих квантів, переходячи у збуджений стан, що дозволяє їм передавати енергію до основних хімічних реагентів. Основні механізми включають енергетичний перенос, електронний перенос та перенесення збудженого стану.

Найбільш вивченими є **фотосенсибілізація і фотокаталіз**.

Фотосенсибілізація стосується результуючого біологічного впливу світла на організм, а фотокаталіз – первинного хімічного процесу, що каталізується світлом.

Фотосенсибілізація - це процес, при якому фотосенсибілізатор поглинає світло і передає енергію для ініціювання хімічних реакцій. Фотосенсибілізатори поглинають світло і переходять у збуджений стан, що дозволяє їм передавати енергію до реагентів. Основні механізми включають енергетичний перенос, електронний перенос та перенесення збудженого стану. Фотосенсибілізація використовується у фотодинамічній терапії для лікування раку та інфекції. В якості фотосенсибілізаторів використовуються органічні барвники, (такі як хлорофіл та порфірин), металоорганічні комплекси та наноматеріали. Світло активує фотосенсибілізатор, який ініціює хімічні реакції. Наноматеріали мають велику поверхневу площу, що забезпечує їх каталізаторні властивості. Фотосенсибілізатор активує молекули кисню для окислення органічних сполук. Активні форми кисню, такі як синглетний кисень, є основними агентами, що викликають хімічні реакції, активуючи хімічні сполуки до реакції.

Фотокаталіз - це процес, при якому каталізатор прискорює хімічну реакцію під впливом світла. Основні етапи включають поглинання світла, генерацію електронів та дірок, а також реакції з реагентами. В якості фотокаталізаторів, зазвичай використовують напівпровідники, такі як TiO_2 , ZnO та інші оксиди металів. Світло забезпечує енергію, необхідну для активації каталізатора та ініціювання хімічної реакції. Зокрема, окислення, відновлення та синтез органічних сполук. Швидкість процесу залежить від інтенсивності світла, концентрації каталізатора та температури.

Прикладом застосування фотокаталізу в системи для очищення води, є перетворення CO_2 та синтезу води. Фотокаталіз має наступні переваги - зниження енергетичних витрат, вибірковість реакцій та екологічність. В даний час використовується фотокаталіз *ефективно видаляти токсичні речовини та патогени з води та повітря*, виробляти водень шляхом розщеплення води, виробляти органічні сполуки з фармацевтичною цінністю, лікувати ракові клітини і виробляти самоочищувані покриття .

4.6.1. Фотокаталітичні методи очищення

На сучасному етапі розвитку науки фотокаталіз визначають як *«зміна швидкості або збудження хімічних реакцій під дією світла в присутності речовин (фотокаталізаторів), які поглинають кванти світла та беруть участь в хімічних перетвореннях учасників реакції, багаторазово вступаючи з ними в проміжні взаємодії і регенеруючи свій хімічний склад після кожного циклу таких взаємодій»*.

Розроблено велике різноманіття речовин-фотокаталізаторів, які прискорюють реакції синтезу та розпаду речовин, які проходять лише при додатковому опроміненні світлом визначеного спектру. В основному при фотокаталізі фотокаталізатор та реагуюча речовина знаходяться в різних фазах

та мають границю розділу, тому даний процес відносять до гетерогенного каталізу.

Характерною ознакою фотокаталітичної реакції є те, що фотокаталізатор, який змінює швидкість реакції, є не пасивним, а активним учасником хімічної реакції. Фотокаталізатор бере участь в проміжних стадіях і по закінченню реакції він повністю регенерується. Крім того, основною перевагою фотокаталітичних технологій є їх універсальність: на одному і тому ж каталізаторі, в одних і тих же умовах та реакторах, з використанням одних і тих же джерел світла можна проводити деструкцію різноманітних органічних та неорганічних речовин.

Розрізняють два види фотокаталітичних реакцій

Гомогенний фотокаталіз. В гомогенному фотокаталізі реагуючі речовини та фотокаталізатор знаходяться в одній фазі.

Найбільш часто вживані гомогенні фотокаталізатори включають в себе озон та фото-системи Фентона (Fe^{+2} та $\text{Fe}^{+3}/\text{H}_2\text{O}_2$). На ефективність процесів типу Фентона впливають декілька робочих параметрів, таких як концентрація перекису водню, рН, та інтенсивність ультрафіолетового (УФ) випромінювання.

Перевагою такого методу є можливість використання сонячного видимого світла до 450 нм, що зменшує витрати на дорогі УФ лампи та електричну енергію.

Але також існують і недоліки, одним з яких є те, що для перебігу цього процесу необхідно дотримуватись низьких значень кислотності рН, оскільки залізо осідає при більш високих значень і тому воно має бути видалене після обробки.

Також відомо, що фото-Фентон не може використовуватись для очищення стічних вод, якщо концентрація органічних речовин в них висока через те, що каламутність таких вод заважає проникненню УФ-випромінювання.

Гетерогенний фотокаталіз Гетерогенною системою називається неоднорідна система, яка складається з частин або фаз, які відрізняються своїми фізичними або хімічними властивостями. Прикладами гетерогенної системи можуть бути: пар та рідина тієї ж речовини, тверді тіла, які мають різну кристалічну структуру та рідини, що не змішуються.

Основною ознакою гетерогенної системи є чітка границя фізична границя між фазами. Фотокаталізаторами, як правило, виступають тверді тіла. Хімічні взаємодії перебігають на поверхні фотокаталізатора, а випромінювання поглинається твердим тілом тобто фотокаталізатором.

Вимоги до твердого фотокаталізатора:

1. Фотоактивність при опроміненні світлом УФ- або видимого діапазону;
2. Фотокорозійна стабільність;
3. Біологічна інертність;
4. Низька вартість

До найпоширеніших фотокаталізаторів відноситься TiO_2 . Він вважається найперспективнішим напівпровідниковим фотокаталізатором завдяки таким властивостям, як корозійна стійкість, хімічна стабільність, не токсичність,

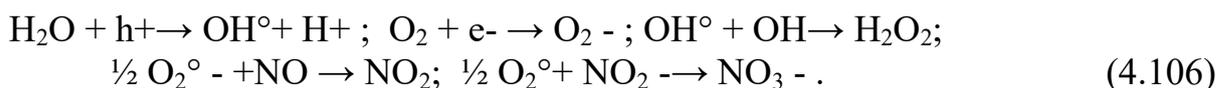
висока фотокаталітична активність, низька вартість і розвинутими оптичними властивостями.

Дослідженню фотокаталітичних властивостей TiO_2 присвячено багато робіт, в яких детально вивчалися механізми та кінетика деструкції органічних та неорганічних речовин на TiO_2 , продукти реакцій, але не було проведено систематичних досліджень впливу кристалічної будови, питомої поверхні, сорбційних властивостей TiO_2 на його фотокаталітичну активність.

В даний час TiO_2 широко використовується в області фотокаталізу, зокрема, при фотолізі води, як економічно вигідного способу отримання водню. Можливість отримання водню за допомогою фотолізу води значно знижує витрати на його отримання і дозволяє використовувати водень як екологічно чиста сировина для виробництва електроенергії.

Фотокаталітичні процеси також можна використовувати і для очищення повітря. Нанесений на оксидну матрицю TiO_2 під дією енергії світла, кисню з повітря і води, утворює вільні радикали, які здатні зруйнувати органічні і неорганічні забруднювачі атмосфери.

Основними забруднювачами довкілля є SO_2 , NO_x , CO , бензол, поліциклічні ароматичні вуглеводні.



Проте використання фотокаталізатору TiO_2 в такій сфері, як очищення стічних вод, обмежено через його високу дисперсність, а отже, складність відділення останнього після завершення сорбційно-фотокаталітичного процесу.

Проаналізувавши переваги та недоліки всіх вищезазначених методів, рекомендується використовувати гетерогенний фотокаталіз, так як він є найбільш перспективним, легким у проведенні та не вимагає використання великої кількості обладнання.

На сучасному етапі розвитку науки фотокаталіз визначають як «зміна швидкості або порушення хімічних реакцій під дією світла в присутності речовин (фотокаталізаторів), які поглинають кванти світла і беруть участь в хімічних перетвореннях реагентів реакції, багаторазово вступаючи з ними в проміжні взаємодії та регенерують свій хімічний склад після кожного циклу таких взаємодій».

Розглянемо це визначення на прикладі реакції дегідрування етилового спирту у водних розчинах:



При кімнатній температурі ця реакція не можлива. Вона може відбуватись під дією світла з довжиною хвилі менше 205 нм, яка відповідає межі спектру поглинання етанолу. Але це енергія короткохвильового ультрафіолету, який практично відсутній в сонячному спектрі, який досягає поверхні Землі.

У присутності фотокаталізаторів, наприклад гетерополікислот 12-го ряду типу $\text{H}_3[\text{PW}_{12}\text{O}_{40}]$ або дрібнодисперсного TiO_2 , ця реакція йде з високим квантовим виходом під дією світла, відповідного спектру поглинання гетерополікислоти ($\lambda < 400$ нм). А світла з такими довжинами хвиль багато в сонячному спектрі.

Таким чином, в даному випадку фотокаталізатори збуджують хімічну реакцію або, як кажуть, розширюють область довжин хвиль світла, при опроміненні яким проходить дана хімічна реакція. *Фотокаталіз грає найважливішу роль в живій природі.*

Процес фотосинтезу, що забезпечує життя на Землі, теж можна назвати фотокаталітичним.

4.6.2. Ефективність дії фотокаталізатора

Ефективність дії фотокаталізатора визначається *квантовим виходом реакції і спектром дії* фотокаталізатора. Квантовий вихід фотореакції є відношення числа молекул продукту до числа поглинутих квантів світла. Для напівпровідникових частинок як фотокаталізаторів зазвичай розглядають кілька стадій процесу: а) поглинання світла - утворення електрондіркових пар, б) дифузія електронів і дірок до поверхні напівпровідника, в) об'ємна рекомбінація електронів і дірок, г) поверхнева рекомбінація електронів і дірок, д) корисні реакції електронів і дірок з адсорбованими молекулами.

Квантовий вихід реакції Φ можна представити таким чином:

$$\Phi = \eta_i / \eta_r \quad (4.108)$$

де η_r - частка носіїв струму, які досягли поверхні, η_i - частка носіїв струму, які досягли поверхні і вступили в корисну реакцію (уникли поверхневої рекомбінації).

Для обчислення η_i необхідно використовувати рівняння, що описують рух хаотичних частинок. У найзагальнішому випадку згадані рівняння досить складні і не мають рішення в квадратурі. Однак в простих випадках, коли частинки можна вважати сферичними, в їх обсязі відсутні електричні поля і швидкості процесів рекомбінації і корисної реакції лінійні за концентраціями електронів і дірок, рішення отримані.

Незважаючи на спрощення, ці рішення дають ясне якісне розуміння основних закономірностей обговорюваних процесів. У тому числі, якщо розмір частки стає рівним або менше довжини вільного пробігу носія струму, то значення η_i наближається до одиниці.

З експерименту відомо, що для частинок TiO_2 з радіусом $r_0 \sim 25$ Å всі носії струму виходять на поверхню. Однак на практиці не завжди самими активними є порошки TiO_2 з дрібними частинками. Це можна пояснити аналізуючи фактор η_r :

$$\eta_i = \frac{V_r}{V_{sr} + V_r} \quad (4.109)$$

де V_{sr} - швидкість поверхневої рекомбінації електронів, V_r - швидкість корисної фотореакції. Фактор η_r може вносити визначальний внесок в результат фотокаталітичної реакції Φ .

Обидві швидкості V_{sr} і V_r можуть помітно змінюватися в залежності від структури поверхні, тобто від будови і енергетичних центрів адсорбції та захоплення носіїв струму. У свою чергу, згадані властивості поверхні залежать від кристалічної структури зразка (для TiO_2 найбільш поширені дві кристалічні модифікації - *рутил* і *анатаз*), методу синтезу, подальшої процедури обробки і т.п. На жаль, на цей момент в результатах досліджень ще немає надійних кореляцій, що пов'язують активність фотореакції з будь якою властивістю поверхні. З практики відомо, що найбільше фотокаталітичною активністю володіють зразки TiO_2 з кристалічною модифікацією *анатаза* і не містять великої кількості домішок. Також виготовлення якісного активного TiO_2 - ще є предмет наукового досвіду.

Тому практично всі, хто займається прикладним фотокаталізом, мають оригіналі методики синтезу високоактивного TiO_2 . Зокрема, зразки серії Degussa P-25 і Hombikat UV-100 є продуктами крупно тоннажного виробництва, високоактивні як фотокаталізатори і недорогі. Це дає можливість використовувати фотокаталіз на TiO_2 в практиці.

З наукової точки зору дослідження природи фотокаталітичного ефекту, механізму дії фотокаталізаторів надзвичайно цікаві. На початку 2000 років щомісячно виходило близько 150 публікацій, присвячених фотокаталізу.

Крім чисто прикладних робіт зростає число публікацій, в яких повідомляється про дослідження фотокаталітичних процесів різними фізичними методами *in situ*.

Найбільш плідні тут методи ЕПР (електронного парамагнітного резонансу)- і ІЧ (інфрачервоної) -спектроскопії, які дозволяють реєструвати проміжні продукти перетворення органічних сполук на поверхні TiO_2 і в деяких випадках точно ідентифікувати захоплення електрону і дірки. Однак до цього часу неможливо відповісти на питання: Чому близькі за властивостями (близький розмір часток, однакова кристалічна модифікація) зразки TiO_2 можуть сильно відрізнятися за фотокаталітичною активністю?.

4.6.3. Приклади практичного застосування TiO_2 як фотокаталізатора

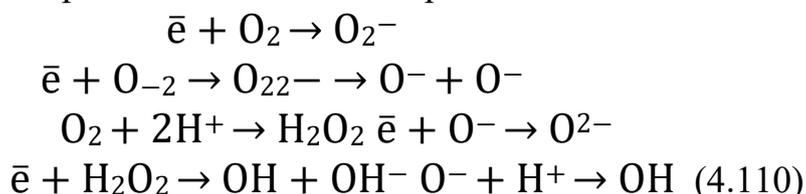
Очистка повітря від органічних сумішей. У технологічних процесах очищення води і повітря від органічних домішок в якості фотокаталізатора використовують напівпровідниковий TiO_2 .

Діоксид титану TiO_2 - напівпровідникова сполука . Згідно сучасних уявлень, в таких сполуках електрони можуть знаходитися в двох станах: вільному і зв'язаному . У першому стані електрони рухаються по кристалічній решітці, утвореної катіонами Ti_4+ і аніонами O_2- .

У другому стані - електрони пов'язані з якимось іоном кристалічної решітки і беруть участь в утворенні хімічного зв'язку.

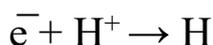
Для переходу електрона з зв'язаного стану у вільний необхідно затратити енергію не менше 3,2 еВ. Ця енергія може бути доставлена квантами світла з довжиною хвилі $\lambda < 390$ нм. Таким чином, при поглинанні світла в об'ємі частинок TiO_2 появляється вільний електрон і електронна вакансія (у фізиці напівпровідників така електронна вакансія називається діркою).

Захоплені поверхнею частинки TiO_2 фотони світла спричиняють утворенню окремих електрона і дірки (+) цілком конкретними хімічними частинками. Наприклад, електрон - це, ймовірно, Ti^{3+} на поверхні, а дірка (електронна вакансія) локалізується на поверхневому кисні, утворюючи O^- . Вони надзвичайно реакційно здатні. У термінах окисно-відновних потенціалів реакційна здатність електрона і дірки на поверхні TiO_2 характеризується наступними величинами: потенціал електрона $\sim -0,1$ В, потенціал дірки $\sim +3$ відносно нормального водневого електрода. Іншими словами, електрон здатний реагувати з киснем, утворюючи послідовність реакцій:



При цьому можуть утворюватись такі сильні окисники, як O^- та OH^- радикал.

Другим можливим проходженням реакції електрона є реакції відновлення:



або

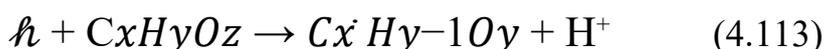


На другому етапі реалізується тільки у водних розчинах і при низьких концентраціях кисню. Основним каналом зникнення електрону є реакція з киснем.

Дірка реагує або з водою



або з будь якою абсорбованою органічною сполукою



O^- та OH^- радикал також здатні окислювати будь-які органічні сполуки. І таким чином, поверхня наночастинки TiO_2 під світлом становиться сильним окислювачем.

На даний час науковцями вже показано, що на поверхні TiO_2 можуть бути окислені (мінералізовані) до CO_2 і H_2O практично будь-які органічні сполуки.

Якщо до складу сполук входять азот або атоми галогену X, то в продуктах реакції будуть спостерігатися HNO_3 і HX . Єдиним відомим прикладом сполуки, яка не піддається на поверхні TiO_2 окисненню під дією світла, є тетрахлорметан, але вже трихлоретилен руйнується на поверхні TiO_2 під дією світла з квантовим виходом, що перевищує одиницю. Це пов'язано з тим, що на поверхні TiO_2 може утворитись атомарний Cl, який, десорбується з поверхні та стимулює ланцюговий процес розкладання вихідного трихлоретилену.

В практичному застосуванні очищення повітря будь-який фотокаталітичний очищувач повітря включає в себе пористий носій з нанесеним на його поверхню нанопрошарку TiO_2 , який опромінюється світлом і через який продувається повітря. Так, на рис.4.15 показано будову пристрою побутового фотокаталітичного очищувача повітря.

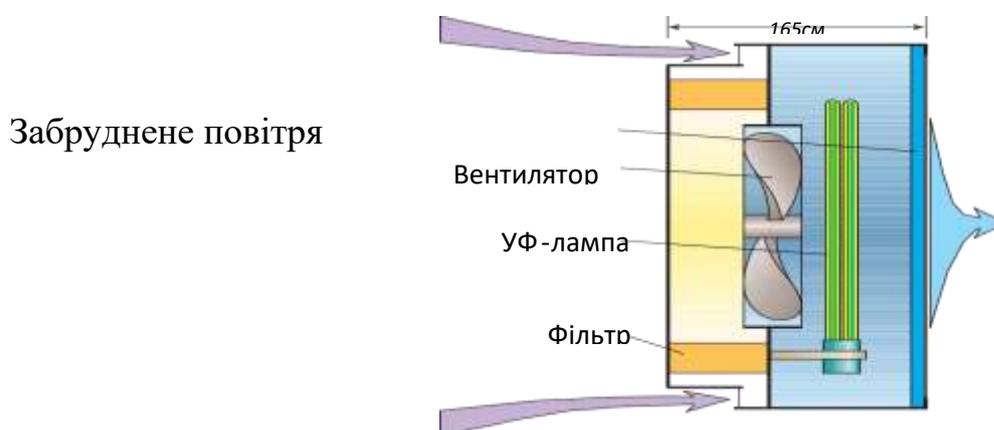


Рис.4.15. Фотокаталітичний очищувач повітря

Органічні молекули з потоку адсорбуються на поверхні фотокаталізатора, нанесеного на пористе скло (фотокаталітичний фільтр), і окиснюються до вуглекислого газу і води під дією світла від УФ-лампи.

Ефективність дії такого приладу визначали наступним дослідом. Очищувач розміщували в замкнутий об'єм (близько 190 л), туди ж добавляли ацетон, що легко випаровувався. Спостереження проводились за витратами ацетону і накопиченню CO_2 . Кінетичні криві цього дослідження представлені на рис. 4.16.

Концентрація ацетону, ppm Концентрація CO_2 , ppm

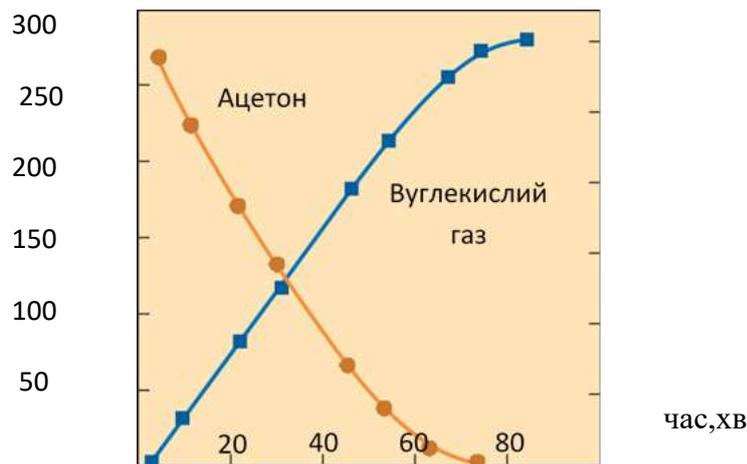


Рис.4.16. Кінетичні криві осадження ацетону і накопичення CO_2 в закритому об'ємі 190 л з фотокаталітичним реактором

Фактично фотокаталіз дає унікальну можливість глибоко окиснювати органічні сполуки в м'яких умовах, а простота самих пристроїв дозволяє сподіватися на прекрасні перспективи використання фотокаталізу на практиці. В даний час до широкого випуску фотокаталітичних очищувачів повітря приступили такі відомі фірми, як "Toshiba", "Sharp", "TOTO" .

4.6.4. Перспективи використання фотокаталізу в життєдіяльності людей

Крім описаних пристроїв можна використовувати активний TiO_2 і для покриття стін приміщень. У цьому випадку вся поверхня приміщення працює як очищувач повітря. На поверхні TiO_2 під дією світла не тільки руйнуються органічні молекули, а й гинуть шкідливі мікроорганізми, навіть володіють високим опором до ультрафіолету.

TiO_2 - сполука, прозора для видимого світла, тому тонкі плівки з TiO_2 , нанесені на скло, не помітні для ока. А саме скло, покрите такою плівкою, здатне самоочищатися під дією світла від органічних забруднень за рахунок фотокаталітичного процесу окиснення. Під дією природного світла або світла від ламп денного світла за 1 год на поверхні може руйнуватися шар товщиною 60 Å таких органічних сполук, як, наприклад, жирні кислоти, що виділяються при смаженні продуктів. Випуск такого скла буде впроваджений найближчим часом.

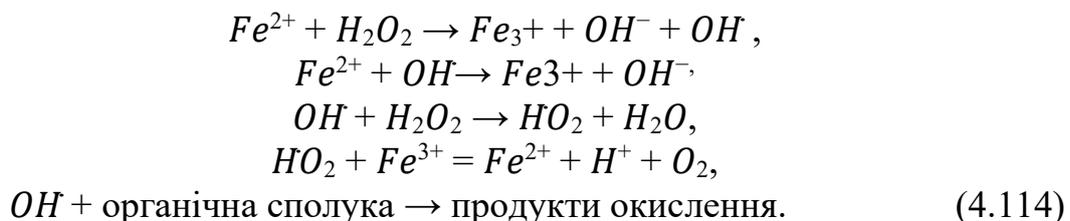
Запотівання скла пов'язане з поганою змочуваністю поверхні, тобто утворенням на поверхні шару дрібних крапельок води, які розсіюють світло. Поверхня скла або дзеркала найчастіше погано змочується через забруднення органічними речовинами, які попадають на них з повітря або при торканні, наприклад, руками. Тонка прозора плівка фотоактивного TiO_2 під дією світла руйнує органічні забруднювачі, поверхня добре змочується, і вода, що потрапляє на таку поверхню, не збирається в крапельки, а розтікається по поверхні, а потім випаровується. Було приготовлено дзеркало, рівно половина якого була покрита плівкою TiO_2 . Оком наявність такої плівки виявити неможливо. Було цікаво спостерігати, як з однієї половини дзеркала запотівання зникає протягом секунди, а на другій половині довго зберігається, якщо подихати на це

охлажденное зеркало. Ймовірно, випуск таких дзеркал і скла також буде освоєний в найближчому майбутньому.

Так само, як і в повітрі, у воді органічні домішки, потрапивши на поверхню частинки TiO_2 , можуть бути окиснені до CO_2 і H_2O . До теперішнього часу показано, що в опромінюваних суспензіях TiO_2 цього процесу підпадають практично будь-які органічні сполуки. Однак, як правило, характерний час повного окиснення складають кілька годин, це частково пов'язано з істотно більш повільної дифузії органічних молекул у воді, ніж в повітрі. Типовий коефіцієнт дифузії в воді становить близько $10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$, що принаймні на чотири порядки менше, ніж в повітрі при нормальних умовах. З цієї причини проточні реактори з нанесеним TiO_2 малоефективні. Використання суспензії TiO_2 технологічно вважається не зовсім зручним, так як вимагає наступне видалення TiO_2 з потоку. В принципі ці проблеми вирішуються, проте до тепер невідомі приклади практичного використання проточних фотокаталітичних реакторів з гетерогенним катализатором з TiO_2 .

Найбільш перспективне використання TiO_2 для очищення стічних вод в накопичуваних резервуарах і відстійниках. Показано, що пестициди, які використовуються в сільському господарстві, в водоймах руйнуються протягом кількох місяців. Додавання невеликих кількостей нешкідливого TiO_2 дозволяє скоротити цей час до декількох днів без використання штучних джерел світла, так як процес йде під дією сонячного світла.

Існуючі проточні реактори для очищення води від органічних домішок використовують гомогенні фотокаталізатори типу солей заліза, при цьому в воду додається і окислювач – гідроген пероксида. У загальних рисах механізм дії такої системи можна описати таким чином:



Розчин гідроген пероксиду і солі заліза називають реагентом Фентона. Як видно, в ході процесу розкладу гідроген пероксиду утворюється OH^- -радикал, який є найсильнішим окиснювачем. Ця частинка і відповідальна за окиснення органічних сполук в розчині. Під дією світла швидкість процесу окиснення може збільшитися в десятки і навіть сотні разів; система носить назву "Фото-Фентон".

І хоча механізм дії світла ще остаточно не зрозумілий, система вже знайшла практичне застосування через простоту, високу ефективність і економічність. Зокрема, технологічне обладнання для очистки стічних вод за методом "ФотоФентон" поставляється фірмою "Calgon Carbon Oxidation Technologies", USA.

Прикладом сучасного застосування фотокаталізу є технологія розроблена вченими з Університету штату Орего , США.

Вчені розробили новий матеріал, який перетворює сонячне світло та воду на чисту енергію.

Фотокаталізатор, створений дослідниками з Університету штату Орегон, дозволяє високошвидкісне та високоефективне виробництво водню. Співпраця під керівництвом Кіріакоса Стіліану з Наукового коледжу Орегонського державного університету представляє собою потенційний новий інструмент для боротьби з викидами парникових газів та зміною клімату (рис.4.17).

Дослідження Стіліану зосереджені на кристалічних, пористих матеріалах, відомих як металоорганічні каркаси, зазвичай скорочено MOF.

Дослідники протестували кілька RTTA з різною кількістю оксидів.

У цьому дослідженні дослідники використали MOF для отримання гетеропереходу оксидів металу – комбінації двох матеріалів з додатковими властивостями – щоб створити каталізатор, який під впливом сонячного світла швидко та ефективно розщеплює воду на водень .

Гетероперехід, який вони називають RTTA, містить оксид рутенію та оксид титану, отримані з MOF, леговані сіркою та азотом. Вони протестували кілька RTTA з різною кількістю оксидів і виявили явного переможця, «Серед різних матеріалів RTTA, RTTA-1, з найнижчим вмістом оксиду рутенію, продемонстрував найшвидшу швидкість виробництва водню та високий квантовий вихід», – сказав Стіліану.

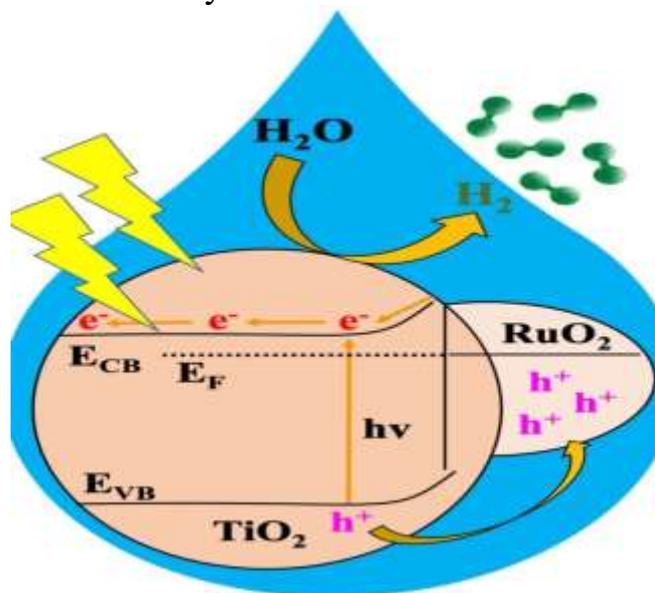


Рис.4.17. Структурна схема процесу фотокаталізації водню гетеропереходом RTTA (оксид рутенію та оксид титану)

Він зазначив, що лише за одну годину грам RTTA-1 зміг виробити понад 10 700 мікромолів водню. Цей процес використовував фотони — світлові частинки — з вражаючою швидкістю 10%, а це означає, що на кожні 100 фотонів,

які вразили RTTA-1, 10 сприяли виробленню водню, згідно з дослідженням. «Виняткова активність RTTA-1 зумовлена синергетичним ефектом властивостей оксидів металів та поверхневих властивостей батьківського MOF, які посилюють перенос електронів», — сказав Стіліану.

«Це дослідження підкреслює потенціал гетеропереходів оксидів металів, отриманих з MOF, як фотокаталізаторів для практичного виробництва водню, що сприяє розробці стійких та ефективних енергетичних рішень».

Вважається, що виробництво водню шляхом розщеплення води за допомогою каталітичного процесу є чистішим, ніж традиційний метод отримання водню з природного газу за допомогою процесу виробництва вуглекислого газу, відомого як паровий риформінг метану.

Наразі виробництво водню з води включає електрокаталіз – пропускання електрики через каталізатор.

«Вода є багатим джерелом водню, а фотокаталіз пропонує метод використання великої кількості сонячної енергії Землі для виробництва водню», — сказав Стіліану. «Оксид рутенію недешевий, але кількість, яка використовується в нашому фотокаталізаторі, мінімальна. Для промислового застосування, якщо каталізатор демонструє хорошу стабільність і відтворюваність, вартість цієї невеликої кількості оксиду рутенію стає менш важливою». Наразі паровий риформінг метану виробляє водень за ціною близько 1,50 долара за кілограм, порівняно з приблизно 5 доларами за кілограм зеленого водню.

Фотокаталітичне виробництво водню пропонує альтернативний шлях для створення сталої енергетичної економіки. Хоча численні фотоактивні матеріали демонструють потенціал для отримання водню з води, синергія, досягнута шляхом поєднання двох різних матеріалів з додатковими властивостями у вигляді гетеропереходів, може значно підвищити їхню фотокаталітичну активність.

ВИСНОВОК

Оптичне випромінювання – це особливий вид матерії, який взаємодіє з електронами атомних чи молекулярних структур поверхні сприймаючого тіла, на яке оптичне випромінювання падає, як потік частинок (**квантів -фотонів**), енергія яких прямо пропорційна частоті коливання хвилі при розповсюдженні їх в просторі від джерела. Ефективність дії прямо пропорційна інтенсивності опромінення та тривалості обробки.

Для підвищення ефективності обробки енергією оптичного випромінювання слід враховувати спектри поглинання опромінюваних структур. При визначенні біологічної ефективності оптичного випромінювання користуються спектрами біологічної дії (спектр фотосинтезу, спектр видимої дії, спектр бактеріцидної дії, тощо).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Червінський Л.С. Оптичне випромінювання і живий організм – математична модель взаємодії // "СВІТЛО люкс", наук.-практ журнал.- Електроінформцентр України. №2, 2003. –С.16-17.
2. Червінський Л.С. Методика розрахунку доз ультрафіолетового опромінювання. // "СВІТЛО люкс", наук.-практ журнал.- Електроінформцентр України. №2, 2003. –С.52-55.
3. Червінський Л.С. Оптичні технології у рослинництві / Червінський Л.С., Щур І.З / "СВІТЛО люкс", наук.-практ журнал.- Електроінформцентр України. №3, 2003. –С.40-42..
4. Червінський Л.С. Щодо питання ультрафіолетового доопромінення росли в спорудах захищеного ґрунту //Електрифікація та автоматизація с.г. №2(21) - К.:НАУ,2007.с. 98-102
5. Червінський Л.С. Методи активації води і поливних розчинів та їх застосування в спорудах захищеного ґрунту/ Червінський Л.С. , Книжка Т.С. / Електрифікація та автоматизація сільського господарстваю №1 (22) , – К. НАУ, 2008, С. 30-35
6. Червінський Л.С. Вплив фотоактивованої соняшникової олії на бактерії KLEBSIELLA PNEUMONIAE /Червінський Л.С., Бондаренко Т.В./Вісник ХНТУСГ, вип.. 88, Харків ,2009, С-257- 261.
7. Червінський Л.С. Дослідження дії оптичного випромінювання на тваринний організм/ Червінський Л.С., Терновик В.Я.// Науковий вісник НУБіП. Вип. 161, 2011. С 16-23.
8. Червінський Л.С. Використання енергетичних параметрів молекул для підвищення ефективності окислювально-відновлювальних реакцій/ Червінський Л.С., Ковалишин Б.М./ /Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК ,збірник праць ХНТУСГ вип. 129 , 2012,стр 99-103
9. Червінський Л.С. Способи активації молекул-реагентів реакції горіння для підвищення ефективності паливних установок/ Червінський Л.С., Ковалишин Б.М./ Праці Таврійського державного агротехнологічного ун-ту. Вип. 13. – Том 5. – м. Мелітополь, - 2013. – С. 97-106.
10. Червінський Л.С. Дослідження процесу обробки рідких середовищ оптичним випромінюванням./ Книжка Т.С., Червінський Л.С./ Науковий вісник НУБіП України, № 194 , частина 3.С 229-233., 2014, Київ.
11. Червінський Л.С. Стимуляція росту проростків насіння огірка за дії комбінованого оптичного випромінювання. /, Л.С. Червінський , О.І. Романенко/ Науковий вісник НУБіП України, № 194 , частина 1. С96-101, 2014, Київ
12. Червінський Л.С. Дослідження фотосинтезної ефективності різних джерел оптичного випромінювання / Червінський Л.С. Луцак Я.М/.. Енергетика і автоматика №44(26), Київ НУБіП, .2015 – 156-160.
13. Червінський Л.С. Дослідження відносної опроміненості плоских прошарків рідкого середовища в установках двостороннього опромінення / Червінський Л.С. Книжка Т.С./.. Енергетика і автоматика №44(26), Київ НУБіП, .2015 – 175-180.

14. Л.С. Червінський. Теоретичне обґрунтування механізму керування впливом оптичного випромінювання на біологічні системи на основі фотореактивації/ Книжка Т.С., Романенко О.І., Я.М. Луцак.// Науковий вісник НУБіП України, № 242 ,Київ, 2016. - С 106- 116,
15. Л.С. Червінський. Математичне моделювання просторової фотосинтезної опроміненості в спорудах захищеного ґрунту/ Червінський Л.С., Луцак Я.М. / Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти, Вип. №4. Мелітополь, - 2016. С.53-61.
16. Л.С. Червінський. Використання енергетичних параметрів молекул для підвищення ефективності окислювально-відновних реакцій./ Червінський Л.С., Ковалишин Б.М./ Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти, Вип. №4. Мелітополь, - 2016. С.69-78.
17. Червінський Л.С. Метод визначення просторової фотосинтезної опроміненості / Червінський Л.С., Усенко С.М., Книжка Т.С., Луцак Я.М.// Технічна електродинаміка/ Інст. Електродинаміки НАН України, №5 – 2016-м.Київ, С. 88-90.
18. Червінський Л.С. Дослідження впливу інфрачервоного опромінення на посівні якості та ростові показники рослин озимої пшениці/ Н.І.Пашковська, М.В. Савчук, Л.С. Червінський/ Вісник ХНТУСГ, технічні науки, Випуск 171,2018, с.10-103
19. Червінський Л.С. До питання визначення величини поглиненої енергії оптичного випромінювання біологічним об'єктом / Л.С. Червінський, Т.С. Книжка, О.І. Романенко // Енергетика та автоматика. – 2019. – № 4. – С. 128-139
20. Червінський Л.С. Моделювання розподілу електромагнітного поля оптичного спектру на рівні листа рослини/ Л.С. Червінський, Т.С. Книжка, О.І. Романенко / Техніка, енергетика, транспорт АПК - Vol. 111, No 4 / 2020 -С. 129-134// DOI: 10.37128/2520-6168-2020-4-15
21. Chervinsky LS. Primary mechanism of action of optical radiation on living organisms. International Journal of Biosensors & Bioelectronics. 2018;4(4):204. DOI: 10.15406/ijbsbe.2018.04.00126
22. L.S. Chervinsky Rationale and Definition of The Criteria of The Efficiency of Uv radiation/ Korean Journal of Food & Health Convergence 2018.vol4.no3., pp.1-5.2018. <https://doi.org/10.13106/kjfhc.2018.vol4.no3.1>
23. L. Chervinsky Influence of Infrared Radiation on Sowing Quality and Growth Indicators of Winter Wheat Plants / ²L. Storozhuk, ³N. Pashkovska/ Korean Journal of Food & Health Convergence 6(1), pp.15-18. . <http://www.kjfhc.or.kr/> <http://dx.doi.org/10.13106/kjfhc.2020.vol6.no1.15>
24. L. Chervinsky. Penetration dataset ultraviolet radiation of various spectra under the skin and hair in the animal body --Manuscript Draft--/ HELIYON-D-19-01730/Article Type: Original Research Article.
25. L. S. Chervinsky, "The ways and effects of ultraviolet radiation on the human and animal body," Proc. SPIE 11363, Tissue Optics and Photonics, 113630I (2 April 2020); doi: 10.1117/12.2552719

26. Stephen, B. Germicidal ultraviolet irradiation. Modern and effective methods to combat pathogenic microorganisms [Text] / B. Stephen, Jr. Martin, D. Chuck, James D. Freihaut, William P. Bahnfleth, Josephine Lau, Ana Nedeljkovic-Davidovic // ASHRAE JOURNAL. – 2008 – Vol. 50 (8). – С. 18–20.
27. Gray, N. F. [Ultraviolet Disinfection](#) / N. F. Gray // Microbiology of Waterborne Diseases (Second Edition). - 2014. – P. 617-630.
28. Kowalski W.J. Ultraviolet germicidal Irradiation Handbook. UVGI for air and Surface Disinfection. Springer-Verlag Heidelberg, 2009.
29. Saud Khashan, Sawsan Dagher, Nacir Tit, Anas Alazzam, Ihab Obaidat, Novel method for synthesis of Fe₃O₄@TiO₂ core/shell nanoparticles, Surface and Coatings Technology, 2017, p. 92-98.
30. Донцова, Т.А.; Бредихін, І.В. Механізм Фотокаталізу На TiO₂. Наукові вісті КПІ 2013, 114–118.
31. Кутузова, А. С. Фотокаталітична активність нанокompозитів на основі TiO₂ до антибіотиків у водних об'єктах : дис. ... д-ра філософії : 161 хімічні технології та інженерія / Кутузова Анастасія Сергіївна. – Київ, 2022. – 172 с.
32. Nam Y., Lim H., Ko C., Lee J.Y. Photocatalytic activity of TiO₂ nanoparticles: a theoretical aspect // J. Mater. Chem. A.- 2019. - 7, - P. 13833-13859. <https://doi.org/10.1039/c9ta03385h>.
33. Mcneill A., Mills A. CdS-coated thin plastic films for visible-light photocatalysis // J. Phys. Energy. - 2020. - 2, - P. 044003. <https://doi.org/10.1088/2515-7655/abb927>.
34. Wang X., Blechert S., Antonietti M. Polymeric Graphitic Carbon Nitride for Heterogeneous Photocatalysis // ACS Catal.- 2012. - 2, - P. 1596-1606. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.022>.
35. Wang B., Pan J., Jiang Z., Dong Z., Zhao C., Wang J., Song C., Zheng Y., Li C. The bimetallic iron-nickel sulfide modified g-C₃N₄ nano-heterojunction and its photocatalytic hydrogen production enhancement // J. Alloys Compd. - 2018. - 766, - P. 421-428. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.377>.
36. Carabineiro A.C., Lv K., Zhang L., Li Y., Li Q., Fan J. Recent advances on Bismuth based Photocatalysts: Strategies and mechanisms / <https://www.researchgate.net/publication/349137822>.

ПИТАННЯ ДЛЯ ОБГОВОРЕННЯ І САМОПЕРЕВІРКИ

1. Чим відрізняється енергія оптичного випромінювання від інших видів?
2. Проаналізуйте види фотобіологічної дії, основні величини і одиниці вимірювання.
3. Назвіть основні енергетичні величини і одиниці вимірювання інфрачервоного опромінювання.
4. Що лежить в основі фотобіологічної дії оптичного випромінювання?
5. Що таке фотокаталіз?
6. Назвіть особливості фотосенсибілізації і фотохімічної реакції.

7. *Спектри біологічної дії та їх відмінності.*
8. *Поясніть закон квантової еквівалентності Ейштейна при дії фотонів світла на речовину.*
9. *На чому засновано вираз для визначення ефективної дози поглинутого випромінювання?*
10. *Що таке термодинамічний коефіцієнт корисної дії оптичного випромінювання?*
11. *Як визначається термодинамічний ККД для різних штучних джерел оптичного випромінювання,?*
12. *Наведіть приклади сучасного застосування фотокаталізу в діяльності людей.*

РОЗДІЛ 5. ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ КОНВЕРСІЇ БІОМАСИ, ПІДГОТОВКИ ТА СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВНИХ СУМІШЕЙ

5.1. Забезпечення вуглецевої нейтральності при застосуванні електротехнологій конверсії біомаси та спалювання вуглеводневих сумішей

Досягнення цілей вуглецевої нейтральності (CN) – це глобальна проблема сучасного світу, яка пов'язана з довгостроковими зрушеннями у глобальних температурах та погодних умовах і дефіцитом енергії. Енергоефективні та відновлювальні енерготехнології є основою енергетичної системи на шляху декарбонізації.

Регіональні енергетичні системи можуть бути взяті за основу самоциркулюючих екосистем, в яких відходи, що з'являються при виробництві сільськогосподарської продукції, повертаються у виробничий цикл гідротермічної обробки та ферментації для отримання газоподібного палива, такого як метан CH_4 і аміак (NH_3). Економічно доцільна та екологічно безпечна переробка побічних продуктів (посліду і кератиновмісного пір'я) є однією з головних проблем для областей розташування виробництв птахівничої галузі. Біовугілля, яке утворюється шляхом піролізу біомаси, при додаванні до ґрунту здійснює ґрунтову секвестрацію вуглецю.

При вирішенні означених проблем за методологічну основу досліджень прийнято системний підхід, в якому принципи згруповані за такими ознаками:

➤ за ознакою функціонування обрані принципи, які полягають в необхідності всебічного охоплення всієї керованої системи, обліку усіх властивостей, усіх напрямків перетворення енергії з врахуванням біологічної підсистеми, застосуванням структурної, функціональної та теплової інтеграції;

➤ за ознакою системоутворювання застосовані **принципи єдиної основи, неповної детермінованості та доцільності**;

➤ **принцип єдності основи** полягає у застосуванні сукупності понять та визначень фізичних полів, які діють в технічній, біологічній підсистемах і навколишньому середовищі як підсистемі;

➤ за інструментальною ознакою обираються принципи дослідження і створення складних систем, а саме: **принципи безперервності, комплементарності та актуалізації технічних, економічних і екологічних аспектів**. Для пояснення можна взяти приклади використання електротехнологій в комплексах переробки побічних продуктів і відходів, де характер виробництв є дискретним, а технологічний процес розгалужений. Для реалізації принципу безперервності необхідна мінімізація перерв у структурі окремих технологічних циклів, синхронізація операцій, застосування технічних і організаційних методів оперативного управління виробництвом. Принцип комплементарності відтворюється на різних рівнях шляхом використання ресурсного потенціалу кожної з окреслених підсистем і їхній взаємодії.

На сьогодні відсутні методики достовірного визначення показників і синергетичного ефекту використання електротехнологій в комплексах переробки біомаси за умови забезпечення вуглецевої нейтральності, тому актуальною задачею є розроблення та удосконалення методик кількісної оцінки ефективності впровадження електротехнологій в комплексах переробки побічних продуктів і техногенних відходів.

5.1.1. Технологічні структури з використанням електротехнологій для переробки біомаси

Концепція гібридної системи енергозабезпечення електротехнологічного комплексу, як інноваційної схеми, що забезпечує створення інтегрованої системи технологічних процесів для замкненої або частково замкненої безвідходної енергозберігаючої переробки побічних продуктів птахівництва та відходів рослинництва у добриво, корм та паливо, представлена на рис.5.1.

В основу створення цієї системи покладена ідея встановлення балансу між енергопотенціалом біомаси побічних продуктів птахівництва для генерації електричної і теплової енергії з енергопотенціалом сировини у поточних режимах її переробки у білковий концентрат, добрива і паливо, відповідна оптимізація за умови консолідації з основними мережами енергопостачання птахофабрики при пікових сезонних навантаженнях.

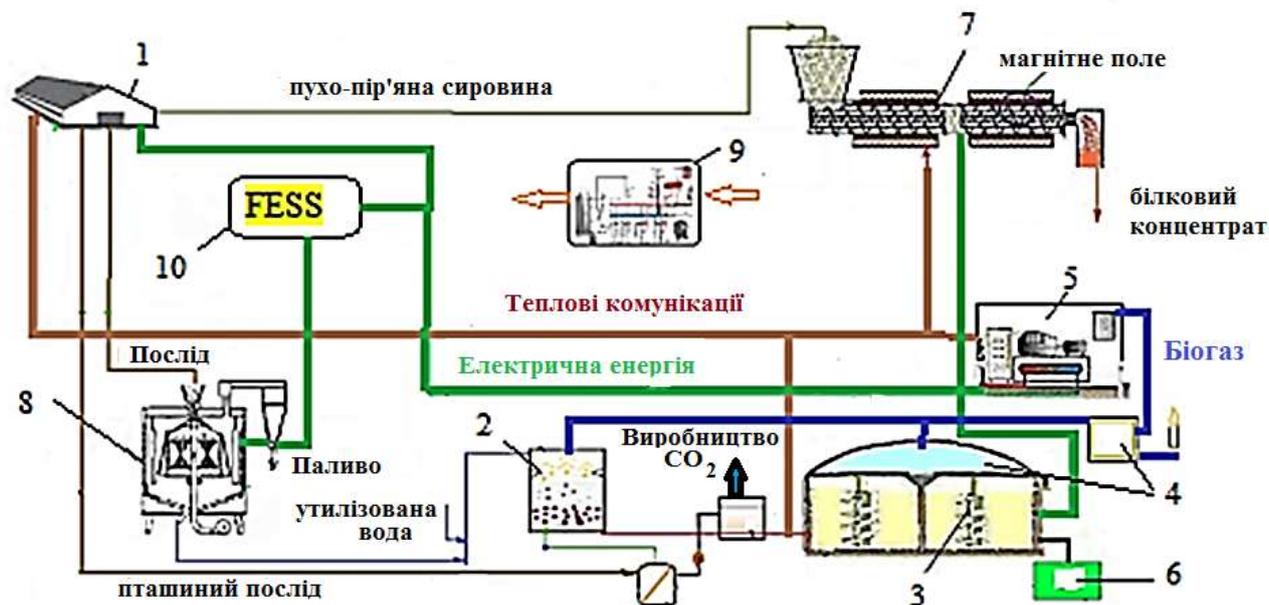


Рис.5.1. Інноваційна схема енергозабезпечення в системі переробки побічних продуктів птахівництва у добриво, корм та паливо: 1- птахоферма та убойний цех; 2 - двомодульний біореактор гідролізу та метаногенеза; 3- електромеханічні перетворювачі; 4- газольдер і система очищення біогазу; 5 – блочна когенераційна установка; 6-сепаратор; 7 – технологічна лінія гідротермічної переробки пуху-пір'яного сировини; 8 – технологічна лінія високошвидкісної відцентрової переробки посліду в порошокподібне і гранульоване паливо; 9– пост інтелектуального керування, суміщений з

контролером рекуперації енергії; 10 – система накопичення енергії маховика (FESS)

Біореактор разом з когенераційним блоком і комунікаційним обладнанням формують автономну систему енергозабезпечення, що подає електроенергію і теплоносії від до всіх трьох технологічних ліній, які містять шнекові або заглибні поліфункціональні електромеханічні перетворювачі.

З екологічної точки зору запропонована технологія є безвідходна, при використанні якої всі види вуглецевмісних відходів сільськогосподарської діяльності можна розглядати, як незатребуваний ресурс для декарбонізації.

Другий приклад технологічної структури представлено на рис.5.2, де зображено схему енерготехнологічного комплексу для термохімічної конверсії рослинної біомаси з високою ступінню рекуперації теплової енергії відпрацьованого теплоносія. Газовий теплоносій формують в технологічній топці 1 і подають для зовнішнього нагріву камери сухої перегонки 2 і камери прокалювання 3. Теплоносій може бути сформований теплогенератором, що працює на відходах виробництв або з підключенням до біогазової установки.

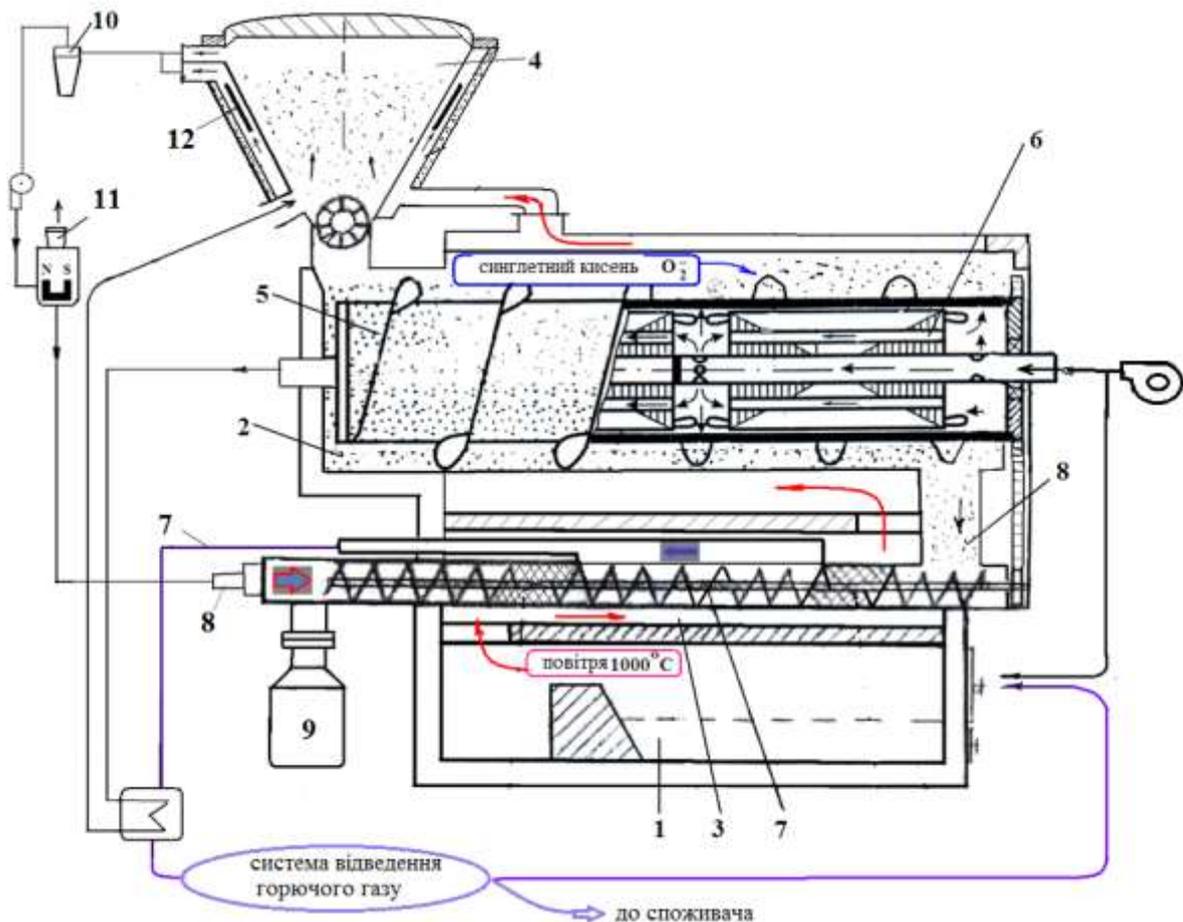


Рис.5.2. Структурна схема енерготехнологічного комплексу для термохімічної конверсії рослинної біомаси

Подрібнена біомаса подається в бункер завантажувального пристрою 4 і далі за допомогою живильника – в шнекову герметичну камеру сухої перегонки 2, в якій здійснюється двобічне нагрівання шару біомаси шляхом кондуктивної

передачі тепла і випромінювання через стінки камери і від поверхні зовнішнього ротора поліфункціонального електромеханічного перетворювача 5. Більша частина відновлювальних реакцій є ендотермічною, коли фізична теплота біовуглецю поглинається з утворенням горючих газів CO та H₂, які суттєво підвищують теплоту згоряння вихідного горючого газу 7. Через патрубков подачі додаткового дуття 8 назустріч руху біовуглецю, який вивантажується у ємність 9, подають за допомогою системи відведення повітря 10 (циклон-вентилятор) очищену пароповітряну суміш. При цьому використовується пристрій для очищення від кисню і оксидів азоту 11, заснований на методі магнітної конвекції. Під дією низькочастотного (8-55 Гц) магнітного поля змінюються властивості води, що випаровується з біомаси. Термографічні вимірювання в режимі енергограм показали, що теплота випаровування омагніченої води на 11 % нижча, ніж теплота випаровування звичайної дистильованої води без магнітної обробки. Для підвищення ККД установки збільшена ступень використання енергії біомаси шляхом подавання частки виробленого горючого газу до топки та використання залишкового тепла відпрацьованих газів для конверсії в електрику в пристрої 12.

Важливою проблемою підвищення енергетичної безпеки держави є раціональне використання дефіцитних вуглеводневих енергоресурсів і зниження викидів шкідливих речовин при спалюванні. Запропонована електротехнологія оброблення компонентів, формування та спалювання трикомпонентної водно-вуглеводнево-повітряної пальної суміші зі зниженим вмістом чадного газу CO і окислів азоту NO_x.

На рис.5.3 наведена технологічна структура багатостримерного імпульсно-розрядового супроводження горіння стехіометрично збідненої пальної повітряно-водно-вуглеводневогазової суміші.

Від генератора 1 імпульсів струму високої напруги подають імпульси вздовж провідника-електрода 2 до простору запалювання та супроводження горіння 3, що спричиняє виникнення множини багатостримерних імпульсних розрядів 4 та полів електромагнітної природи 5 навколо них.

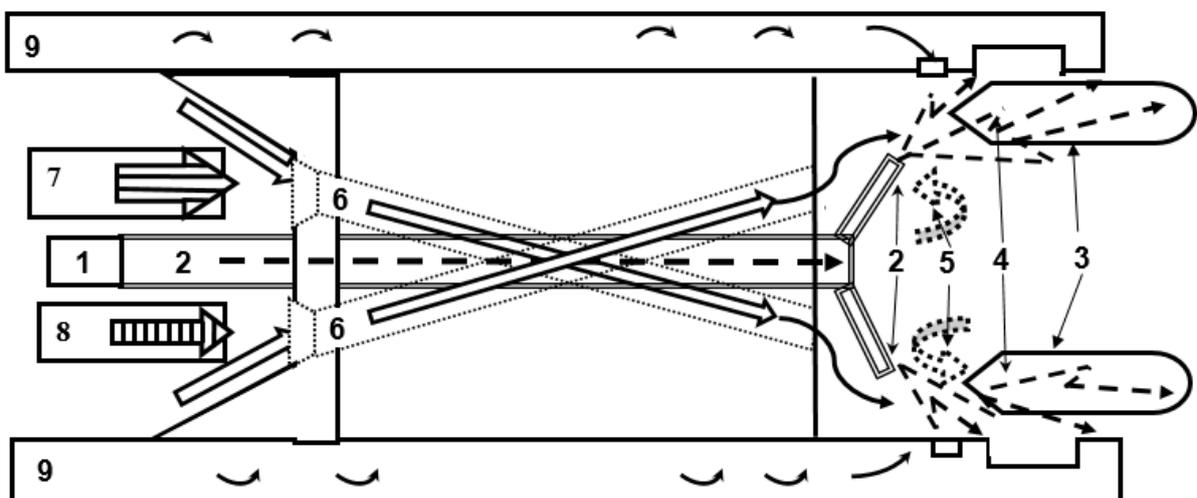


Рис. 5.3. Схема технологічної структури багатостримерного імпульсно-розрядового супроводження горіння

Одночасно вздовж гвинтової магістралі 6 подають вуглеводневий газ (показано суцільними стрілками) та насичують його ежекційно або інжекційно від генератора водяної пари 7 сухою водяною парою (умовно показано великою стрілкою з горизонтальними лініями) або генератора водяного туману 8 водяним туманом (умовно показано великою стрілкою з вертикальними лініями) при впливі імпульсів електромагнітних полів. Одночасно подають вздовж та закручують у електропровідній магістралі-електроді 9 повітря у напрямку до простору запалювання та супроводження горіння 3 в умовах впливу на повітря імпульсів полів 5 електромагнітної природи. При цьому формується стехіометрично збіднена вуглеводневим газом гомогенна повітряно-пароводно-вуглеводневогазова або повітряно-тумановодно-вуглеводневогазова суміш. Необхідна для роботи генератора імпульсів струму високої напруги електрична енергія забезпечується конверсією частини теплової енергії процесів спалювання.

Приклад реалізації методу. При проведенні експериментальних досліджень параметрів викидів в процесах спалювання традиційного палива і палива з додаванням активованої води в камері згоряння двигунів внутрішнього згоряння використовувалась холодна активна паливно-водно-повітряна суміш, яка відрізняється тим, що залежно від режимів функціонування двигуна внутрішнього згорання компоненти суміші перебувають у наступних співвідношеннях, мас. %: активний газ 7,7-8,7; розпилена активна дистильована вода 1,3-0,3; активне повітря 91. Стехіометричне співвідношення активного газу до повітря перебуває у межах від 1:11,8 до 1:10,5. Для вимірювання співвідношення повітря/паливо використовувався портативний цифровий широкосмуговий вимірювач INNOVATE 39210 та реєстратор даних LM-2 Dual O₂. Датчик температури вихлопних газів 2м EGT, К-Тип термопари застосовуються для вимірювання температури вихлопу двигуна. Для вимірювання швидкості потоків газу і повітря використовувалися витратоміри EE741, а вмісту вихлопних газів – газоаналізатор Chemist 600.

На рис.5.4 представлено композицію викидів для традиційного палива і палива з додаванням активованої води в камері згоряння двигунів внутрішнього згоряння. На відміну від традиційного двокомпонентного складу горючих сумішей, виготовлених з енергетичної компоненти – газоподібного вуглеводневого палива C_nH_{2n+2} та окислювача – кисню O_2 у складі атмосферного повітря з коефіцієнтом надлишку повітря 1,45, пропонується використовувати трикомпонентну горючу суміш. Це суміш енергетично активної води $(H_2O)^-$, газоподібного вуглеводневого палива $(C_nH_{2n+2})^+$ та окислювачів – кисню $(O_2)^-$ і озона $(O_3)^-$ з складу атмосферного повітря. В табл.5.1 представлені порівняльні результати параметрів викидів при експериментальних дослідженнях процесів спалювання традиційного палива і палива з додаванням активованої води в камері згоряння двигунів внутрішнього згоряння.

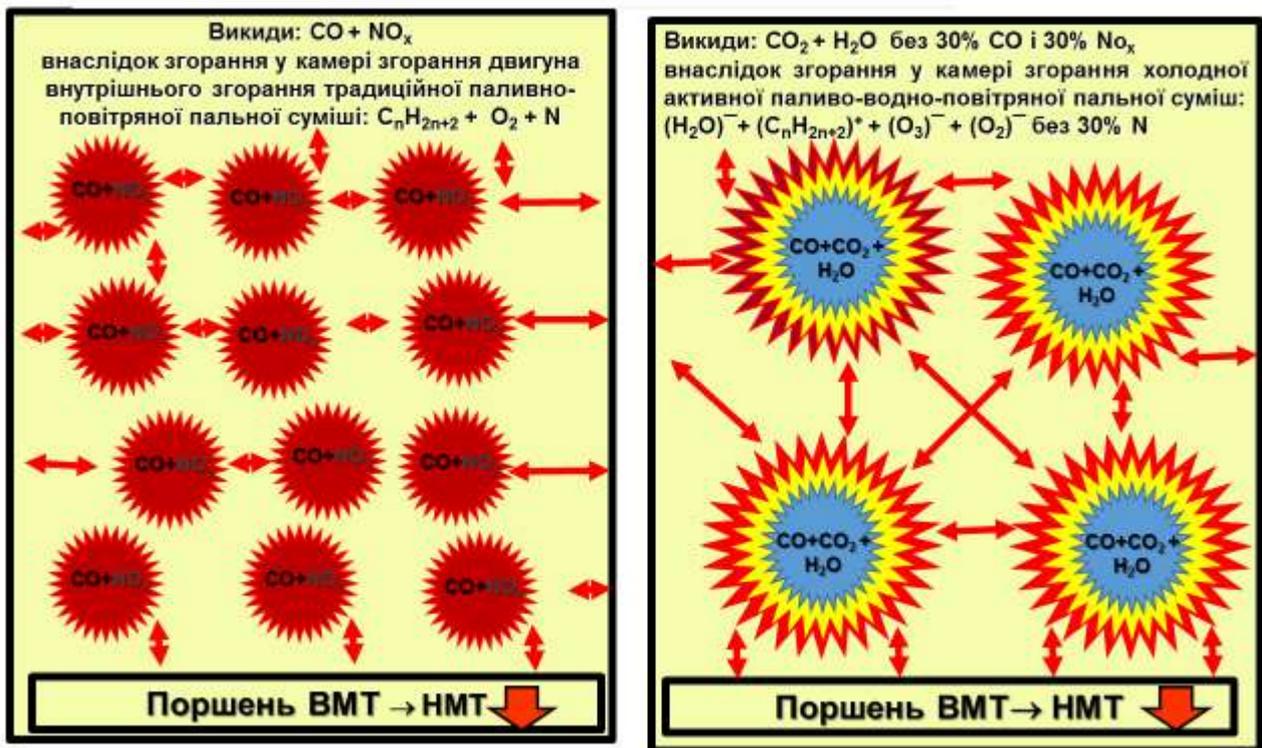


Рис.5.4. Викиди при використанні холодної активованої води як пального для двигунів внутрішнього згорання

Таблиця 5.1. Викиди при експериментальних дослідженнях процесів спалювання

Параметри	Традиційна паливна суміш	Паливна суміш з електромагнітною активацією
Температура диму, °C	155,6	171,3
Кисень, %	6,5	0
CO, ppm	36	16
NO _x , ppm	26	18,2
CO ₂ макс, %	13,7	9,6
Коефіцієнт надлишку повітря	1,45	1,58

5.1.2. Оцінювання розподілу інвестицій між проектами низьковуглецевих енергетичних технологій

Для формування методичних засад оцінки забезпечення вуглецевої нейтральності необхідно запропонувати підхід щодо врахування викидів CO₂ під час процесів збору, обробки і транспортування біомаси, виробництва біопалива або трикомпонентних паливних сумішей. Вбудовані викиди продуктів включають прямі та деякі непрямі викиди. Прямі викиди стосуються викидів,

наприклад CO₂ та інших парникових газів, що вивільняються безпосередньо в результаті хімічних реакцій на місці, таких як спалювання, розкладання, ферментація, гниття та руйнування органічних матеріалів. Викиди вуглецю можуть бути пов'язані з енергетикою. Непрямі викиди – це викиди, які пов'язані зі споживанням електроенергії під час виробництва товарів.

Викиди вуглецю визначаються за таким виразом:

$$M = \frac{44}{12} \cdot E_{\text{в.п}} \cdot C \cdot O + V \quad (5.1)$$

де M - кількість викидів в кг; $E_{\text{в.п}}$ – загальна енергія в залежності від кількості витраченого палива і теплотворної здатності палива, ТДж; $\frac{44}{12} C$ – вміст вуглецю в одиниці енергії палива в залежності від виду палива; O – коефіцієнт окислення, що вказує на відсоток вуглецю в паливі, який зрештою перетворюється на CO₂; V – сукупні викиди CO₂ від виробництва та транспортування палива, кг CO_{2 екв.} на кг палива.

Для отримання єдиного значення, що охоплює всі парникові гази, викиди оксиду нітрогену та метану було переведено в CO_{2 екв.}. В основі цих перетворень лежить потенціал глобального потепління (Global Warming Potential – GWP): викиди 1 граму метану та оксиду нітрогену є еквівалентними викидам 23 та 296 грам CO₂, відповідно. Коефіцієнт окислення більшості процесів перетворення енергії за умовчанням приймається 1.

Розподіл інвестицій між проектами низьковуглецевих енергетичних технологій є завданням з значними невизначеностями, які можна поділити на параметричні і структурні, які пов'язані відповідно з постійним розвитком технологій та програмних комплексів для моделювання, еволюцією вартості та ефективності енергетичних технологій. На рис.5.5 представлена одна з модифікацій схеми оцінювання розподілу інвестицій між проектами низьковуглецевих енергетичних технологій.

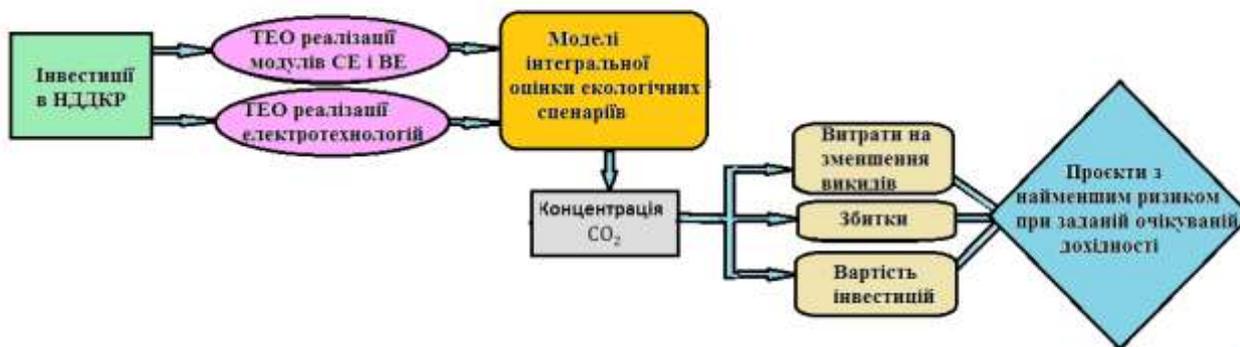


Рис.5.5. Схема оцінювання розподілу інвестицій між проектами низьковуглецевих енергетичних технологій

Актуальними глобальними екологічними сценаріями на цей час є The Shared Socio-Economic Pathways (SSPs), Representative Concentration Pathways (RCPs),

Shared Climate Policy Assumptions (SPA), а ефективним інструментом для їх розрахунку є моделі інтегральної оцінки. Загальне прагнення при такому оцінюванні полягає в тому, щоб мінімізувати суму очікуваного значення вартості скорочення викидів (від GCAM), вартості збитків (від DICE/PAGE/FUND) та вартості портфолію науково-дослідних і проектно-конструкторських робіт.

5.2. Метод спільного спалювання сирого біогазу та утилізованої води для теплогенерації і отримання наноструктур вуглецю

Відомим методам і технологіям спалювання вуглеводнів притаманні такі недоліки:

- значні енергетичні витрати на власні потреби по забезпеченню процесу спалювання і великі теплові втрати з викидними газами;
- складність реалізації автоматичного регулювання динамічного та активного режиму спалювання за необхідності постійного контролю інтенсивності та частоти коливань полум'я, регулювання інтенсивності розряду плазми шляхом зміни напруги;
- розряд плазми не використовується для запалювання, попередньої обробки пальної суміші для генерації компонентів, посилюючих її окислювальні і теплотворні властивості, а конструкція пальника не забезпечує спалювання сирого біогазу з утилізованою водою;
- відсутність засобів запобігання передчасної конденсації повітряно-пароводної або повітряно-тумановодної суміші та відокремлення твердих вуглецевих продуктів, що утворюються при спалюванні палива у множині стримерів електричних розрядів і плазмовому локальному просторі потоку газу, що знижує ефективність способу.

Удосконалений метод спільного спалювання сирого біогазу та утилізованої води для теплогенерації і отримання наноструктур вуглецю заснований на використанні низькотемпературної плазми і магнітного поля в процесах підготовки компонентів палива та супроводження його горіння та спрямований на вирішення проблеми ефективного використання вуглеводневих ресурсів і зменшення високого вмісту забруднюючих речовин в існуючих технологіях спалювання, зокрема, використання як палива необробленого біогазу з метантенку та очищених від нерозчинених домішок і волокон, знезаражених стічних вод. На рис. 5.6 представлена конструктивно-технологічна схема, яка ілюструє запропонований метод.

В порожнину пальника 1 одночасно через отвір 2 поступає потік попередньо трансформованого і очищеного від твердих часток біогазу, а через отвір 3 – потік повітря і дрібнодиспергової води. Одночасно від високовольтного джерела струму високої частоти 5 імпульси високої напруги подаються до електрода 4 та корпусу 6 пальника 1. Між напівсферичним концентратором 7 електрода 4 та корпусом 6 пальника 1 формується множина стримерів електричних розрядів (на рис.5.6 показано умовно переривчастими блискавками).

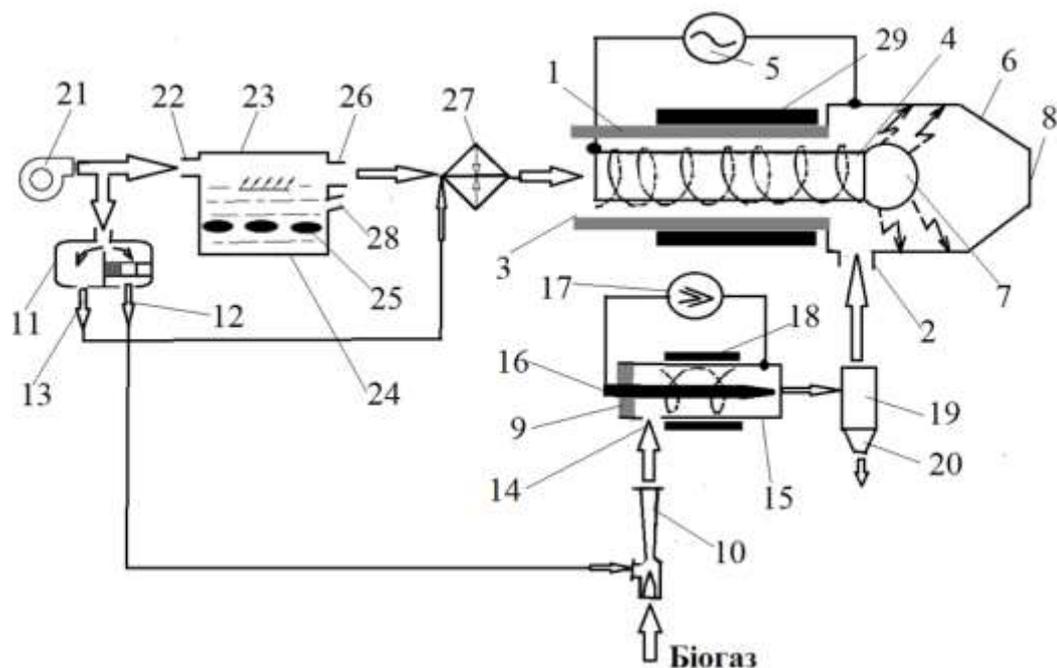


Рис. 5.6. Конструктивно-технологічна схема методу спільного спалювання сирого біогазу та утилізованої води

Одночасно на потік змішаного повітря і дрібнодиспергованої води, що рухається вздовж електрода 4, впливає комбіноване поле електромагнітної природи, створене постійним магнітом 29 і електричним полем між електродом 4 та корпусом 6 пальника 1, яке покращує окиснювальні властивості повітря та підготовляє пару або туман води до горіння, змінює структуру молекул води і активує їх. Це збільшує ймовірність додаткової іонізації, а також стимулює утворення іонів.

Залежно від швидкості подавання суміші повітря і дрібнодиспергованої води множина стримерів від наносекундних повторювальних імпульсних розрядів роздувається, розповсюджується від концентратора електрода 4 за отвір 2 входу потоку попередньо трансформованого біогазу у бік факельного отвору 8 та сприяє формуванню озону O_3 . Розмір роздування множини стримерів електричних розрядів залежить від швидкості руху повітря. При цьому у масиві роздмуханих стримерів відбувається інтенсивне змішування кисню O_2 , озону O_3 , туману води H_2O і компонентів біогазу та формується активна паливно-водно-повітряна пальна суміш. Застосування змінного електричного поля між електродом 4 і корпусом 6 пальника 1 за допомогою радіочастотного збудження дозволяє формувати тліючий розряд. Цей процес призводить до іонізації та дисоціації молекул пари, що в результаті утворює оксидовану плазму.

Сирий біогаз з метантенка спочатку надходить до камери трансформації сирого біогазу 9, а саме до впускного змішувача 10, в якому ежекційно здійснюється додавання до біогазу повітря, що дає змогу зв'язувати сірководень H_2S киснем. Попередньо повітря проходить блок розділення газів 11, в якому за допомогою магнітного поля здійснюється розділення повітря на потік повітря 12

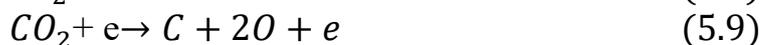
з максимальною часткою кисню, окису і двоокису азоту та другий потік 13, який містить азот і інші гази. Гази, крім кисню, окису і двоокису азоту, є практично немагнітні, оскільки їх об'ємна магнітна сприйнятливість на два порядку нижче, ніж у кисню. Якщо в газовому середовищі є кисень, то під дією магнітного поля, що створюється постійними магнітами або електромагнітним збудженням, кисень втягується в напрямку падіння напруженості магнітного поля, що викликає рух потоку повітря 12 з максимальною часткою кисню до впускного змішувача 10, з якого далі біогаз поступає через щонайменше чотири (рівномірно розташовані по колу) тангенціальні отвори 14 в зазор між зовнішнім електродом 15 і внутрішнім електродом 16 камери трансформації сирого біогазу 9, де формується вихровий потік газу.

Плазмова дуга між електродами 15, 16 ініціюється високовольтним джерелом постійного струму 17, вихідна напруга якого регулюється в діапазоні від 0 до 15 кВ. Магнітне поле, перпендикулярне радіальній складовій струму плазмової дуги, формується циліндричним постійним магнітом 18, який коаксіально закріплений навколо зовнішнього електрода 15. Величина магнітної індукції в проміжку між електродами 15, 16 встановлюється на рівні 0,25 Тл. Під впливом тангенціального вихрового потоку газу та сили Ампера, яка є сумою сил, які діють на вільні заряди, обертова дуга рухається вздовж електродів 15, 16 і стабілізується в зоні загостреної частини внутрішнього електрода 16. При цьому, частота обертання плазмової дуги значно більше швидкості біогазу, що призводить до однорідного режиму активації, взаємним зіткненням та достатньої взаємодії між активними речовинами в плазмі (енергетичні електрони, іони, атоми, збуджені молекули та радикали).

Оскільки доля метану серед основних компонент сирого біогазу може досягати 70% , то лише частина CH_4 приймає участь в процесах дисоціації шляхом зіткнень з енергійними електронами та реакцій з радикалами та атомами:



CO_2 є електронно негативним газом і може легко захоплювати електрони. Відбувається дисоціація CO_2 шляхом зіткнень з енергійними електронами та радикалами:



відновлення CO_2 шляхом реакції з радикалами та іонами через зворотні реакції



Відбувається також утворення ацетилену C_2H_2 :



Синтез кристалічного графіту в ковзаючому дуговому розряді досягає електропровідних класів, створюються різні наноструктури вуглецю з хорошими властивостями для потенційного застосування:



Сірководень H_2S згоряє з киснем з утворенням вільної сірки:



Більшість електричної енергії, що вводиться до камери трансформації сирого біогазу 9, використовується для активації хімічної реакції, а не для нагрівання маси газів.

Таким чином, основними продуктами процесу взаємодії між активними компонентами в плазмі камери трансформації сирого біогазу 9, які далі направляються в циклон 19, є газоподібні H_2 , CH_4 , C_2H_2 , CO , H_2O , тверді дикарбон C_2 , наноструктурний вуглець та інші. При цьому частина метану не вступає в хімічні реакції і транспортується, як і інші газоподібні продукти, через циклон 19 до отвору 3 пальника 1.

Тверді продукти (дикарбон C_2 , наноструктурний вуглець) збираються в бункері 20 циклона 19 і далі можуть бути використані для промислових застосувань, таких як накопичувачі енергії та паливні елементи.

Вихідний повітряний потік вентилятора 21 за допомогою системи керування розподіляється на два регульовані потоки. Один потік направлено через вхідний повітряний патрубок 22 до генератора водяного туману 23, де в резервуарі 24 з утилізованою водою він захоплює водяний туман, створений ультразвуковими генераторами 25, і далі потік суміші повітря і дрібнодиспергової води через вихідний повітряний патрубок 26 прямує через пристрій запобігання конденсації 27 до отвору 3 пальника 1. Періодичне додавання утилізованої води здійснюється через патрубок 28. Додаткова функція генератора водяного туману 23 при зменшенні мікробного навантаження утилізованої води, при цьому використовуються випромінювані сигнали на рівні 1700 кГц з питомою енергією 36 Вт·год/л.

Другий повітряний потік направляється до входу блоку розділення газів 11, де після магнітної обробки потік повітря 12 з максимальною часткою кисню, окису і двоокису азоту прямує до впускного змішувача 10. Потік 13, який

містить азот і інші гази, прямує через пристрій запобігання конденсації 27 до отвору 3 пальника 1.

Для підтримання умов, що виключають створення «холодних зон» (температур нижче точки роси) при транспортуванні суміші повітря і дрібнодиспергової води в пристрої запобігання конденсації 27 передбачено її підігрів. В період початку роботи коаксіального плазмового пальника (стартовий період) цю функцію виконує нагрівач (не показаний) в пристрої запобігання конденсації 27. В подальшому, при усталеному режимі роботи коаксіального плазмового пальника, підігрів суміші повітря і дрібнодиспергової води в пристрої запобігання конденсації 27 здійснюється за допомогою теплообмінника (не показаний) за рахунок утилізації частини теплової енергії обертової плазмової дуги з камери трансформації сирого біогазу 9.

Регулювання параметрів і характеристик процесу підготовки вуглеводневого палива і повітряно-тумановодної суміші та процесу спалювання здійснюється за допомогою автоматичної системи керування .

Приклад реалізації методу. Попередньо компонентний склад сирого біогазу визначався волюмометричним методом за використання лабораторного газоаналізатора ГХЛ-1. Основними компонентами сирого біогазу є метан CH_4 – 65,5 %; вуглекислий газ – CO_2 – 21,8 %; сірководень H_2S – 4,2 %; залишкова волога і NH_3 – 3,6%; азот N_2 – 1,32 %; водень H_2 – 2,08%; кисень O_2 – 0,6%; монооксид вуглецю CO – 0,9 %.

Основні складові експериментальної установки: камера згоряння; високовольтний генератор регульованої частоти до 1000 кГц, оптична система Шлірена для реєстрації поширення полум'я у факельній частині камери. Циліндрична камера згоряння виготовлена з нержавіючої сталі з внутрішнім діаметром 55 мм. Між зовнішнім електродом (циліндрична камера згоряння і напівсферичним концентратором (діаметр 40 мм) внутрішнього електрода формується множина стримерів електричних розрядів. Два кварцові вікна встановлені на діаметрально протилежних кінцях циліндричної камери згоряння, щоб забезпечити доступ для спостереження за полум'ям. Для візуалізації поширення полум'я за допомогою високошвидкісної цифрової камери з максимальною швидкістю захоплення до 6600 кадрів за секунду була створена система візуалізації Шлірена типу Z.

Системи активування (намагнічування) та диспергування брудної (каналізаційної) води, яка складається із трансформатора (220В, 0,7А/24В), диспергаційного резервуара, ультразвукових диспергаторів з частотою випромінювання 1700 кГц і питомою енергією 36 Вт·год/л. Вентилятором з потужністю 900 Вт повітря продувається крізь верх диспергаційного резервуару та виносить водний туман до гвинтової магістралі намагнічування в зону запалювання та згорання паливної суміші в системі генерування багатостримерних розрядів. Для визначення структурних змін, спричинених дією постійного магнітного поля використовували метод оптичного поглинання у видимій та ультрафіолетовій області. Для вимірювання застосовувався

автоматизований спектрофотометр FUV-1600PC. На рис.5.7 показані спектри оптичного поглинання утилізованої води.

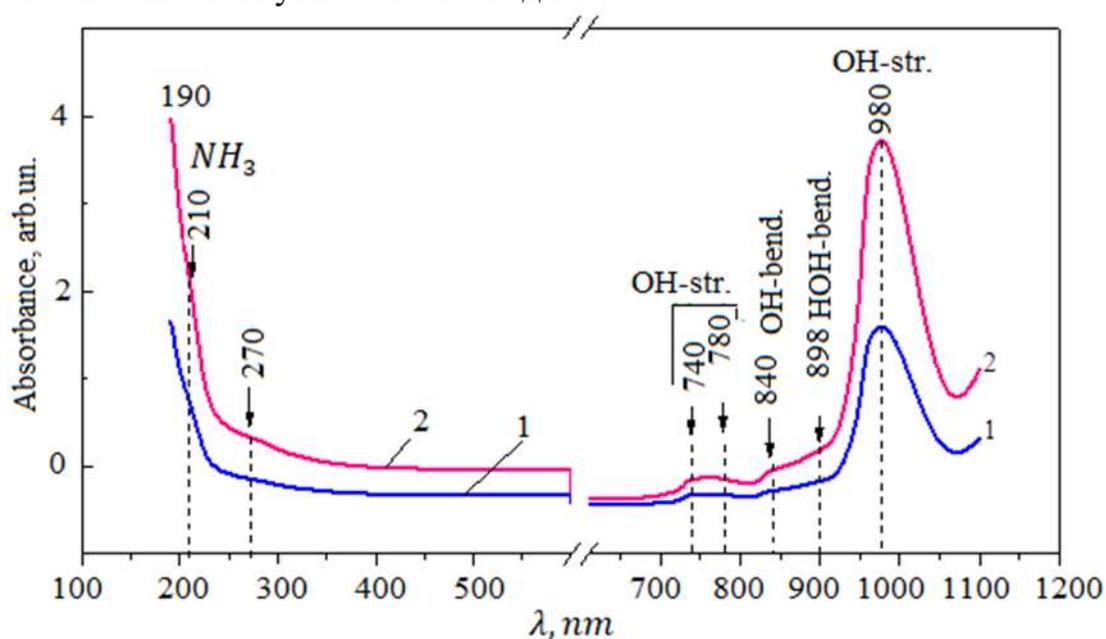


Рис.5.7. Спектри видимого та ультрафіолетового поглинання утилізованої води: 1 – утилізована вода без впливу магнітного поля, 2 – утилізована вода, яка оброблена магнітним полем з індукцією 0.25 Тл

Смуга при 210 нм спричинена поглинанням світла іонами нітратів, крутий підйом спектру поглинання у ультрафіолетову область свідчить, зокрема, про наявність домішки аміаку NH_3 . Смуги поглинання з положеннями максимуму > 400 нм зумовлені обертонами та їх комбінаціями коливань зв'язків О-Н. Негативний індукційний ефект зв'язку О-Н може проявитися, коли він більш електронегативний за атом карбону, внаслідок чого замісник відтягує, віднімає від молекули електронну густину на себе. Смуга поглинання з положенням 840 нм пов'язана зі згинними коливаннями зв'язків ОН, а смуга при 898 нм – зі згинними коливаннями подвійного зв'язку Н-О-Н.

Як видно зі спектрів, положення максимумів та півширина смуг поглинання не змінюються при дії магнітного поля індукцією 0.25 Тл. Проте, спостерігається зростання інтенсивності поглинання у всьому досліджуваному діапазоні приблизно у 1.8 – 1.9 рази. Одночасна дія магнітного та високочастотного електричного полів призводить до посилення поляризації молекули H_2O і особливо сильно позначається на процесах, в яких відбувається самодисоціація молекул води. В результаті цього можуть утворюватися іони H^+ та OH^- , а також гідратований електрон e^- , які приймають участь в хімічних реакціях.

Сирий біогаз надходить до камери трансформації сирого біогазу, а саме до впускного розподільвача сирого біогазу, в якому попередньо за допомогою ежектора здійснюється додавання до біогазу повітря з максимальною часткою кисню, щоб усунути сірководень. Камеру виготовлено з нержавіючої сталі з тефлоновою основою. Внутрішній конусоподібний електрод з діаметром основи 30 мм і висотою 50 мм був закріплений всередині, а зовнішній циліндричний

електрод був заземлений. Найменша відстань між двома електродами становила 3,5 мм. Біогаз поступає через тангенціальні отвори в зазор між електродами, де формується вихровий потік газу. Плазмова дуга між електродами ініціюється високовольтним джерелом постійного струму, вихідна напруга якого регулюється в діапазоні від 0 до 15 кВ. Магнітне поле, перпендикулярне радіальній складовій струму плазмової дуги, формується постійним магнітом, який коаксіально закріплений навколо зовнішнього електрода. Величина магнітної індукції в проміжку між електродами встановлюється на рівні 0,25 Тл.

Для регулювання швидкості потоку використовувався контролер масової витрати газу серії Seven Star D07-7b/D07-19b/MFC. Швидкість потоку сирого біогазу переважно встановлювалась на рівні 10 л/хв.

Процеси в камері трансформації сирого біогазу окремо досліджувались за допомогою газового хроматографа (GC9790A) для кількісної оцінки виходу газів H_2 , CH_4 , C_2H_2 , CO , H_2O та твердого продукту дикарбона C_2 . Оптико-емісійна спектроскопія (OES) використовувалася для орієнтовної ідентифікації проміжних речовин, при цьому оптичний детектор був встановлений на виході з камери трансформації сирого біогазу. При напрузі джерела постійного струму 11,5 кВ спостерігалась висока концентрація радикалів OH, що сприяла потенційно високій окислювальній здатності плазми. У спектрі переважали смуги випромінювання CH_4 , перехідні смуги CH, як результат дисоціації метана, спектральні смуги H_2 , C_2H_2 , CO , смуги C_2 , а також смуги сірки, як результат неповного згоряння сірководню. Селективність вуглеводнів H_2 , C_2 знижувалася зі збільшенням прикладеної напруги.

Визначення швидкості ламінарного горіння, яке зазвичай використовується для перевірки хімічної кінетики, здійснено у факельній частині пальника. Газоподібні продукти після проходження камери трансформації сирого біогазу та циклона мали температуру 107 °C, а потік суміші повітря і дрібнодиспергової води, що рухається вздовж гвинтових повітряних каналів до простору запалювання та горіння мав температуру 21°C. В табл.5.2 наведені порівняльні дані експерименту по спалюванню сирого біогазу, біогазу, очищеного лугом від CO_2 без застосування камери трансформації сирого біогазу, та утилізованої води. Коефіцієнт витрати повітря підтримувався на рівні $\alpha = 1,2$. Температура полум'я вимірювалась інфрачервоним безконтактним пірометром GM2200 Venetech.

Таблиця 5.2. Порівняльні дані експерименту по спалюванню біогазу з утилізованою водою

Вуглеводневе паливо	Відсоток додавання води в паливну суміш	Швидкість ламінарного горіння, м/с	Температура полум'я, °C
	0	0,6	800

Біогаз, очищений лугом від CO ₂ без застосування камери трансформації сирого біогазу	10	0,65	1100
	15	0,72	980
	20	0,6	890
Біогаз, оброблений в камері трансформації сирого біогазу	0	0,54	765
	10	0,59	1050
	15	0,64	950
	20	0,52	790

Збільшення швидкості та температури полум'я для палива з додаванням води може бути наслідком домінування хімічного ефекту (наприклад, хімічної реакції за участю молекул води для утворення радикалів H, O та OH). Подальше збільшення відсотка додавання води в паливну суміш призводить до ефекту охолодження і відповідного зниження швидкості та температури полум'я.

Метод забезпечує підвищення ефективності горіння за умови найменшої кількості вуглеводневогазової компоненти і використання утилізованої води як палива, трансформацію сирого біогазу з вмістом CO₂ більше 25%, частинок пилу, слідами ароматичних сполук, силосанів, аміаку та сірководню у паливну суміш з підвищеним вмістом водню та відокремлення дикарбону і наноструктурованого вуглецю, а також зменшення викидів шкідливих речовин.

5.3. Розвиток технологій переробки метану у контексті забезпечення енергетичної безпеки та зменшення впливу на навколишнє середовище

Зростаючий попит на відновлювані джерела енергії сприяє активному розвитку технологій переробки біогазу, зокрема метану, одного з його основних компонентів, який відіграє ключову роль у забезпеченні енергетичної безпеки та зменшенні впливу на навколишнє середовище.

Різного роду методи переробки та утилізації метану набувають особливого значення, і перспективним рішенням є використання коаксіальних плазмових пальників для спалювання сумішей метану. Ці пристрої забезпечують ефективне горіння з мінімальними шкідливими викидами завдяки високим температурам та високому ступеню іонізації в плазмовому середовищі. Для моделювання та оптимізації цих плазмових систем необхідні точні дані про коефіцієнти електронного транспорту та параметри електронного рою, що дозволяє глибше зрозуміти фізичні процеси, що відбуваються під час розряду. До цих характеристик належать середня енергія електронів, характеристична енергія, рухливість, дрейфова швидкість, коефіцієнти дифузії та іонізації — усі вони значною мірою залежать від функції розподілу електронів за енергіями (EEDF). Для отримання таких розподілів зазвичай розв'язують рівняння Больцмана,

використовуючи доступні перерізи взаємодії електронів із газами. Сьогодні існує низка програмних інструментів, які дозволяють ефективно вирішувати це рівняння, ґрунтуючись на різних фізичних та чисельних методах. Серед них — безкоштовна програма BOLSIG+, що використовує гідродинамічну модель газового розряду, а також пакети Bolos, Boltzmann і COMSOL Multiphysics, які дозволяють детально враховувати кінетичні та енергетичні процеси в плазмі. Зазвичай для електронів у однорідному електричному полі застосовується класичне двочленне розкладання функції розподілу, що дозволяє отримати стаціонарні розв'язки.

Метан, як відомо, є потужним парниковим газом, який робить значний внесок у глобальне потепління. Незважаючи на його широке використання в технологіях плазмової обробки, електроніці, системах моніторингу забруднень та інших галузях, він становить потенційну загрозу для екосистем через свою токсичність і стійкість. Скорочення викидів метану є одним з найпривабливіших негайних варіантів дій щодо зміни клімату. У зв'язку з цим світова спільнота активно працює над впровадженням міжнародних угод і протоколів, спрямованих на обмеження викидів метану та заміну його екологічно безпечнішими альтернативами. Одним із можливих шляхів зменшення шкідливого впливу метану є створення газових сумішей з його менш шкідливими або нейтральними аналогами. Цей метод, наприклад, вже використовувався у бінарних сумішах гексафториду сірки (SF_6) з He, CO_2 , N_2 .. У цьому контексті азот виступає як приваблива альтернатива, адже він не є парниковим газом, є нетоксичним, хімічно інертним і у великій кількості наявним в атмосфері. У дослідженнях висвітлюється практичне застосування програмного забезпечення для моделювання плазмового перетворення метану та сумішевих газів, тоді як деякі роботи фокусуються на відхиленнях функції розподілу електронів від рівноважного стану, а також впливі параметрів розряду та складу суміші на розвиток стримерних розрядів. Відомий перспективний плазмовий процес для безкаталізаторного одностадійного перетворення CH_4 та CO_2 на високоцінні оксигенати (тобто метанол, оцтову кислоту, етанол та ацетон) при атмосферному тиску та кімнатній температурі з використанням реактора з діелектричним бар'єрним розрядом. Зміна таких параметрів процесу, як потужність розряду, температура реакції та час перебування призводить до одночасної зміни ключових властивостей розряду, таких як середня енергія електронів, густина електронів та питома енергія, що підводиться. Усі ці параметри є визначальними факторами плазмохімічних реакцій. Активація метану за низької температури залишається основною проблемою для її використання в галузі скорочення викидів парникових газів та отримання продуктів з доданою вартістю, тоді як нетермічна плазма забезпечує перспективний підхід до активації метану без каталізатора. Досліджується також інноваційний механізм об'єднання енергії для активації метану без каталізатора за низької температури, що забезпечується наносекундною імпульсною нетермічною плазмою в суміші аргону та метану, за допомогою оптичної діагностики та кінетичного моделювання.

Таким чином, актуальними стають дослідження з метою отримання нових важливих даних про поведінку електронів у бінарних сумішах метану, що дозволить глибше зрозуміти фізику процесів у таких середовищах і сприятиме розвитку ефективніших, екологічно безпечних технологій. Далі ми представляємо результати дослідження параметрів електронного рою та транспорту в сумішах метану та азоту шляхом розв'язання рівняння Больцмана за допомогою інструментів COMSOL Multiphysics на основі гідродинамічної моделі.

5.3.1 Моделювання розподілу енергій електронів у газорозрядній плазмі бінарної суміші метан–азот

Функція розподілу енергії електронів (EEDF) є фундаментальним інструментом для моделювання плазмових процесів, оскільки вона описує розподіл енергій електронів у газорозрядній плазмі. EEDF впливає на ключові параметри, такі як коефіцієнти іонізації, збудження та дисоціації, що безпосередньо впливають на динаміку розряду та поведінку плазми.

Визначимо основні фактори, що впливають на EEDF. Ступінь іонізації (n_e/N_n) – співвідношення густини електронів до густини нейтральних частинок (n_e/N_n), яка визначає кількість електрон-електронних та електрон-нейтральних зіткнень. Чим більше n_e/N_n , тим більша ймовірність електрон-електронної взаємодії, що може змінювати форму EEDF у бік високих енергій. Валивим фактором слід вважати молярну частку збуджених частинок, оскільки збуджені атоми або молекули можуть брати участь у резонансних процесах, що впливають на ймовірність зіткнень електронів і змінюють EEDF. Знижена кутова частота визначає, яким чином електромагнітне поле впливає на прискорення електронів у плазмі. За низьких частот поле може створювати нестандартні форми розподілу енергії.

Рівняння Больцмана у двочленній апроксимації описує зміну EEDF, враховуючи процеси дрейфу, дифузії та зіткнень електронів із газом. Основні компоненти рівняння:

$$\frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left(W F_0 - D \frac{\partial F_0}{\partial \varepsilon} \right) = S \quad (5.17)$$

де ε – енергія електрона; W - термін, пов'язаний із дрейфом і збільшенням енергії; D - коефіцієнт дифузії в енергетичному просторі; F_0 – EEDF, S – інтеграл зіткнень, який описує зміну функції розподілу при зіткненнях.

Компоненти W і D визначають внесок дрейфу та дифузії відповідно:

$$W = -\gamma \varepsilon^2 \sigma_\varepsilon - 3a \left(\frac{n_e}{N_n} \right) A_1 \quad (5.18)$$

де γ - коефіцієнт, що враховує поле та енергетичні властивості плазми; σ_ε - ефективний переріз втрати енергії; a - параметр зіткнень; A_1 - залежний від частоти зіткнень коефіцієнт.

$$D = \frac{\gamma}{3} \left(\frac{E}{N_n} \right)^2 \left(\frac{\varepsilon}{Q} \right) + \frac{\gamma k_b T_g}{q} \varepsilon^2 \sigma_\varepsilon + 2a \left(\frac{n_e}{N_n} \right) \left(A_2 + \varepsilon^{\frac{3}{2}} A_3 \right) \quad (5.19)$$

де E - електричне поле; Q - енергія зіткнень; $k_b T_g$ - теплова енергія фону; A_2, A_3 - параметри, пов'язані з характеристиками зіткнень. При $\varepsilon = 0$ (нульова енергія) забезпечується нульовий потік:

$$\mathbf{n} \cdot \left(W F_0 - D \frac{\partial F_0}{\partial \varepsilon} \right) = 0 \quad (5.20)$$

При $\varepsilon \rightarrow \infty$, функція $F_0 \rightarrow 0$, що відображає низьку ймовірність наявності високоенергетичних електронів.

EEDF описує енергетичний баланс між такими процесами, як прискорення електронів, що залежить від електричного поля, втрат енергії, які визначаються перерізами зіткнень, наданими у таблиці перерізів (наприклад, з експериментальних даних). Використовуючи зазначену модель, стає можливим визначення коефіцієнтів зіткнень для різних сумішей метану та азоту на основі даних перерізів. В той же час модель ілюструє, як фізичні параметри впливають на EEDF, дозволяючи отримати точні значення коефіцієнтів швидкості ударів електронів для подальшого використання в плазмохімічному моделюванні.

Розрахунки енергетичного розподілу електронів (EEDF) проводились із використанням модуля фізики Boltzmann Equation, Two-Term Approximation (linear), що реалізує двочленну апроксимацію рівняння Больцмана у стаціонарному режимі (Stationary EEDF). Обраний параметр Equal secondary electron energy sharing означає, що енергія вторинних електронів розподіляється рівномірно, що спрощує врахування вторинних процесів при зіткненнях.

Для забезпечення точності розрахунків була встановлена кількість елементів у додатковому енергетичному вимірі EEDF рівною $N = 300$, а співвідношення розміру елементів — $R = 50$. Максимальна енергія електронів у розрахунку становила 100 еВ, а мінімальне значення функції розподілу — $1E-15$, що дозволяє враховувати навіть дуже низьку ймовірність наявності високоенергетичних електронів. У розрахунках використовувалися перерізи зіткнень (cross-sections) для молекул метану (CH_4) та азоту (N_2) [25]. Дані перерізи були експортовані з відповідних бібліотек LXCat, після чого проведено їх ручну підготовку та форматування відповідно до вимог програмного середовища COMSOL Multiphysics. Це включало перевірку одиниць вимірювання, структури таблиць, послідовності енергій, а також адаптацію заголовків і параметрів до стандартів, прийнятих у модулі моделювання плазми. Загальна кількість кроссекцій становила 37, і вони охоплювали широкий спектр типів взаємодій, зокрема: еластичні та нееластичні зіткнення, процеси збудження, іонізації та приєднання. У моделі розглядалися різні мольні співвідношення компонентів суміші, зокрема: $0.1CH_4 + 0.9N_2$, $0.5CH_4 + 0.5N_2$, $0.9CH_4 + 0.1N_2$, що дозволило проаналізувати

вплив вмісту кожного з газів на характер електронно-енергетичного розподілу та процеси зіткнень у плазмі. Початкова температура газу встановлювалась на рівні 300 К — це стандартне значення для умов низькотемпературної плазми. Густина електронів задавалась як $1 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$, а ступінь іонізації — 1×10^{-6} , що вказує на слабоіонізовану плазму.

Граничні умови для початкових параметрів були наступними: Initial mean electron energy: 2 В (середня початкова енергія електронів), Initial reduced electric field: 1 Td (Townsend — одиниця зведеного електричного поля), Initial condition for lam: $1 \times 10^{-21} \text{ м}^3/\text{с}$ (початкова умова для лямбда-параметра, що описує частоту зіткнень).

Метод обчислення використовував підхід Mean Energies з логарифмічним масштабуванням енергетичної сітки. Вхідні параметри цієї сітки: початок 0.5 В, кінець 10 В, із 10 кроками на десятковий порядок, що дозволяє детально відстежити зміну EEDF в широкому діапазоні енергій.

5.3.2 Енергетичні та транспортні характеристики електронів у плазмовому розряді для сумішей із різним співвідношенням компонентів метан -азот

В результаті моделювання розподілу енергій електронів у газорозрядній плазмі бінарної суміші метан–азот отримані енергетичні та транспортні характеристики електронів у плазмовому розряді. Зробимо уточнення щодо використаних одиниць: Отримані результати дозволяють оцінити, як середня енергія електронів і послаблення електричного поля впливають на ключові плазмохімічні процеси в метані. Визначені EEDF, транспортні властивості й кінетичні коефіцієнти розкривають фізико-хімічні особливості нерівноважної плазми, що виникає в умовах плазмового пальника. Рис.5.8 демонструє залежність функції розподілу енергії електронів (EEDF) від енергії для трьох газових сумішей - $0.1\text{CH}_4 + 0.9\text{N}_2$, $0.5\text{CH}_4 + 0.5\text{N}_2$, $0.9\text{CH}_4 + 0.1\text{N}_2$ — при різних значеннях середньої енергії електронів, отриманих методом Mean Energies.

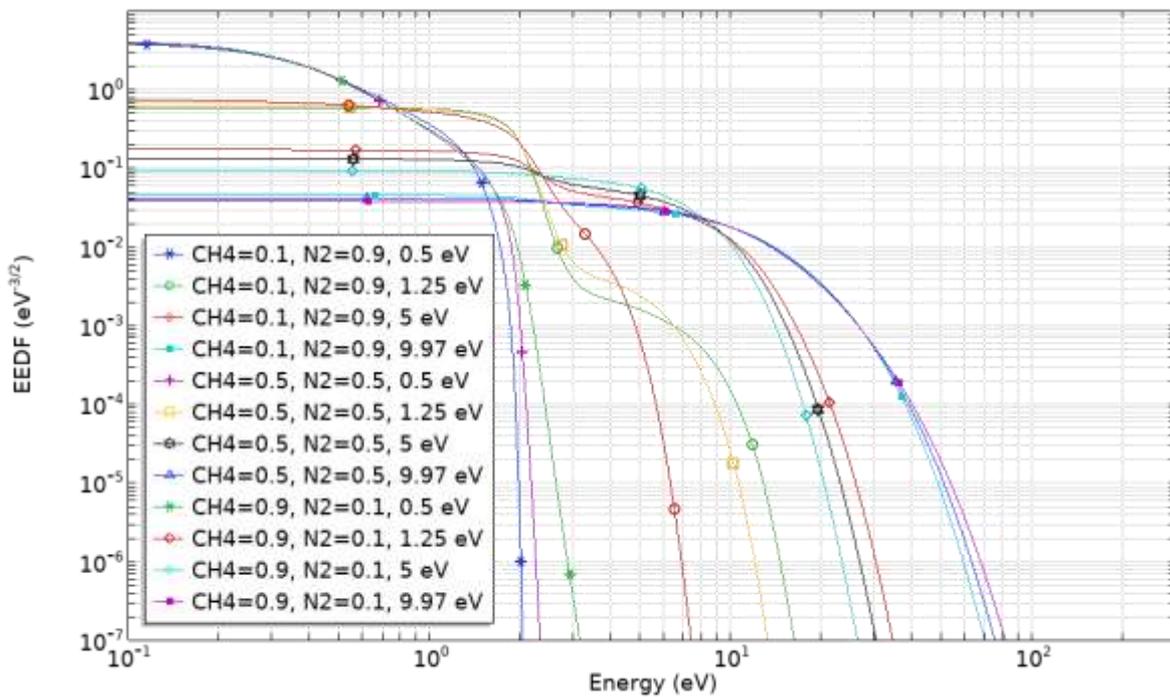


Рис. 5.8. Залежність EEDF від середньої енергії електрона для суміші $0.1\text{CH}_4 + 0.9\text{N}_2$, $0.5\text{CH}_4 + 0.5\text{N}_2$, $0.9\text{CH}_4 + 0.1\text{N}_2$

Для побудови розподілів EEDF було використано логарифмічну енергетичну сітку в діапазоні від 0.5 до 10 eV із 10 кроками на десятковий порядок, що дозволяє детально дослідити зміну форми EEDF у широкому спектрі енергетичних умов. Кожна крива на графіку відповідає рішенню рівняння Больцмана для електронів за заданого значення середньої енергії, що відображає певний режим енергії в плазмі. При низьких середніх енергіях (0.5–1.25 eV) EEDF має характерний максимум у низькоенергетичній області та стрімко спадає при зростанні енергії. Це відповідає стану плазми з домінуванням нееластичних зіткнень із низькими порогами втрат. Зі збільшенням середньої енергії електронів (до 9.97 eV) розподіл поступово розширюється і зміщується в сторону вищих енергій, що свідчить про посилення ролі високоенергетичних процесів (збудження, іонізація). Зміна складу суміші також суттєво впливає на форму EEDF. У суміші з високим вмістом азоту ($0.1\text{CH}_4 + 0.9\text{N}_2$) розподіл енергії електронів є відносно вузьким, а його спад у високій енергетичній області — крутим. Це зумовлено високими порогами збудження та іонізації молекул N_2 , що обмежують розвиток високих енергій у системі. У протилежному випадку — при домінуванні метану ($0.9\text{CH}_4 + 0.1\text{N}_2$) — EEDF стає ширшим і має виражений "довгий хвіст", що вказує на наявність значної кількості електронів із високими енергіями. Це пов'язано з нижчими порогами енергетичних процесів у метані, які сприяють ефективнішому накопиченню енергії в електронній підсистемі. Суміш $0.5\text{CH}_4 + 0.5\text{N}_2$ демонструє проміжний характер розподілу, як за шириною, так і за положенням максимуму EEDF, що відповідає її збалансованому складу. Таким чином, аналіз графіка свідчить про тісний зв'язок між середньою енергією

електронів, складом газової суміші та формою EEDF, що є важливим для розуміння кінетики плазмових процесів у системах на основі метану та азоту.

Рис.5.9 ілюструє залежність середньої енергії електронів від приведеної напруженості електричного поля E/N для трьох газових сумішей: $0.1\text{CH}_4+0.9\text{N}_2$, $0.5\text{CH}_4+0.5\text{N}_2$, $0.9\text{CH}_4+0.1\text{N}_2$. Приведена напруженість що часто позначається E/N , є безрозмірною величиною, що використовується у фізиці плазми та дослідженнях газового розряду. Вона є відношенням напруженості електричного поля (E) до щільності нейтральних частинок (N). Це відношення, яке вимірюється у Таунсендах, ($1 \text{ Td} = 10^{-21} \text{ В}\cdot\text{м}^2$) є критичним параметром для характеристики поведінки електронів у газі. Вона визначає, яку енергію набувають електрони між зіткненнями з нейтральними частинками. З графіка видно, що збільшення частки метану в суміші суттєво впливає на середню енергію електронів. Для суміші $0.1\text{CH}_4+0.9\text{N}_2$ зростання середньої енергії є найповільнішим і демонструє майже лінійну поведінку до високих значень E/N , що пов'язано з високими порогами збудження та іонізації молекул N_2 . У випадку суміші $0.5\text{CH}_4+0.5\text{N}_2$ крива демонструє вищі значення енергії в усьому діапазоні E/N , а для $0.9\text{CH}_4+0.1\text{N}_2$ — найбільші.

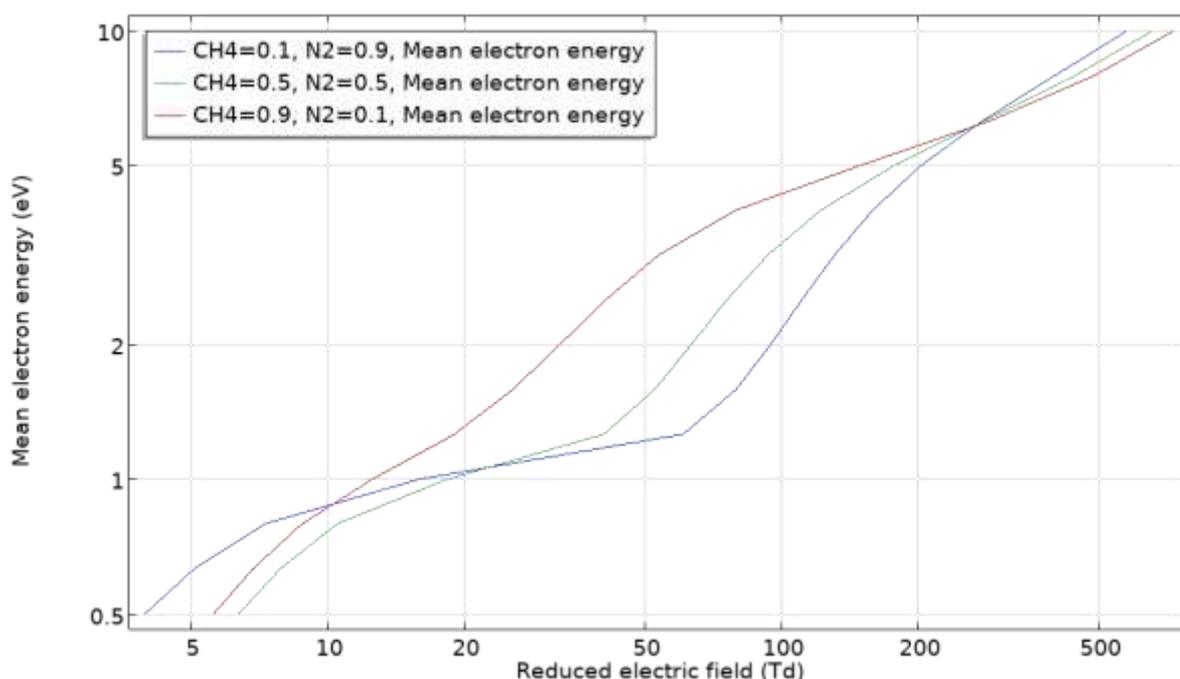


Рис. 5. 9. Середня енергія електронів сумішей з різною концентрацією $0.1\text{CH}_4 + 0.9\text{N}_2$, $0.5\text{CH}_4 + 0.5\text{N}_2$, $0.9\text{CH}_4 + 0.1\text{N}_2$ в залежності від E/N

Зростання енергії в останньому випадку є більш рівномірним, без вираженої затримки при низьких значеннях E/N , що свідчить про легший набір енергії електронами внаслідок нижчих порогів процесів у метані. Ці результати підтверджують: зі збільшенням вмісту CH_4 середня енергія електронів у суміші зростає. Така поведінка узгоджується з формою функцій розподілу (EEDF),

наведених раніше, та підтверджується результатами інших досліджень, зокрема роботи.

На рис. 5.10 представлені залежності основних транспортних коефіцієнтів електронів — рухливості (mobility), коефіцієнта дифузії (diffusivity), рухливості енергії (energy mobility) та енергетичної дифузії (energy diffusivity) — від середньої енергії електронів для трьох газових сумішей: $0.1\text{CH}_4 + 0.9\text{N}_2$, $0.5\text{CH}_4 + 0.5\text{N}_2$ та $0.9\text{CH}_4 + 0.1\text{N}_2$. На графіку видно що зі зростанням середньої енергії електронів рухливість електронів суттєво зменшується на низьких енергіях, особливо для суміші з високим вмістом N_2 , після чого стабілізується. Це пов'язано зі збільшенням частоти нееластичних зіткнень, які сповільнюють дрейф електронів. Коефіцієнт дифузії зростає поступово для всіх сумішей. Найбільші значення характерні для сумішей із вищим вмістом CH_4 , де електрони швидше накопичують енергію та мають вищу теплову швидкість. Рухливість енергії електронів зменшується до певного рівня, що свідчить про зниження ефективності переносу енергії разом із дрейфом, і далі стабілізується. Енергетична дифузія показує майже лінійне зростання з енергією, особливо в сумішах із високим вмістом метану, де вища ймовірність передачі енергії через дифузійні процеси. Порівняння трьох сумішей демонструє, що зростання концентрації метану загалом призводить до вищих значень енергетичних коефіцієнтів, що зумовлено менш енергозатратними каналами збудження та іонізації CH_4 порівняно з N_2 . Ці тенденції вказують на зміну режиму транспорту — від переважно дрейфового при низьких енергіях до енергонасиченого при вищих, коли основна частка переносу реалізується через дифузію. Такі залежності є критично важливими для моделювання плазмових процесів у розрядах з вуглеводневими сумішами, зокрема в умовах плазмового пальника або реактора, де потрібна точна оцінка енергетичного балансу електронної підсистеми, а також урахування цих результатів при формуванні динамічної системи управління енергією з контролем компонентів у реальному часі для підвищення ефективності локальної полігенераційної мікромережі, гідродинамічних та тепломасообмінних процесів системи контролю мікроклімату на промислових об'єктах.

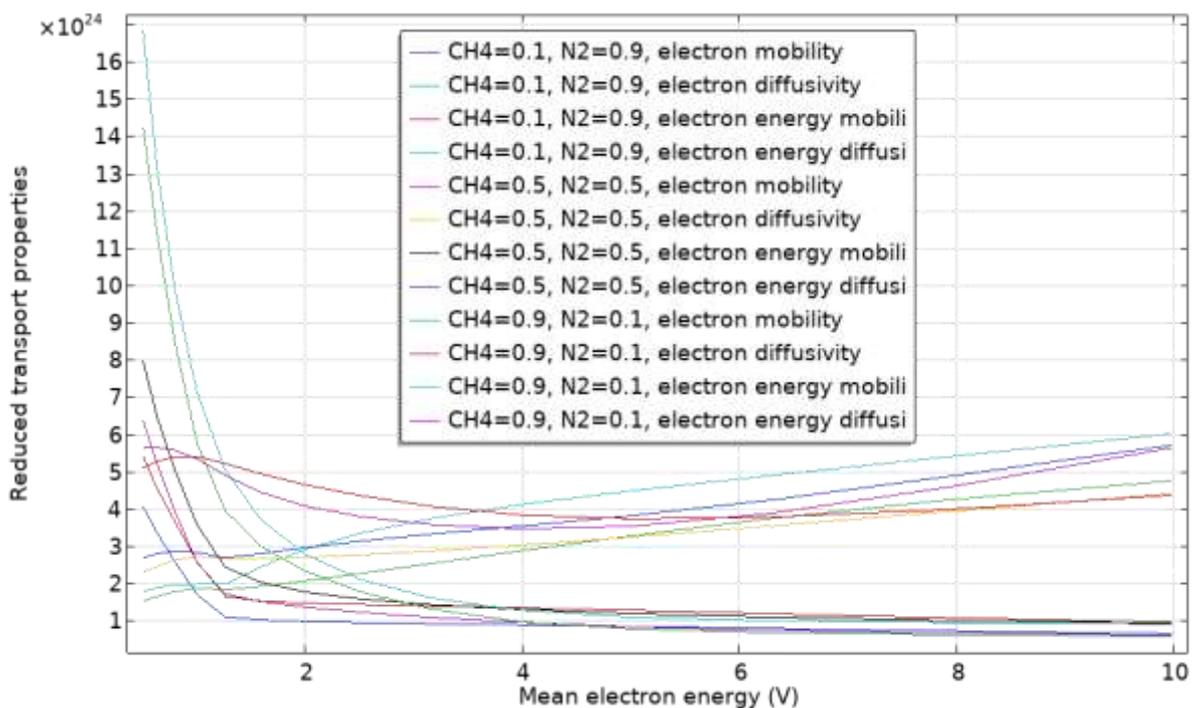


Рис. 5. 10. Транспортні характеристики як функція середньої енергії електрона

Рис. 5.11 демонструє іонізаційні та приєднувальні коефіцієнти як функції приведеної напруженості електричного поля E/N для газової суміші $0.5\text{CH}_4 + 0.5\text{N}_2$. Графік демонструє динаміку основних електронних процесів у плазмі. Криві іонізації та приєднання відображають конкурентну взаємодію двох типів процесів: генерації вільних електронів через іонізацію та їх втрати через приєднання. Іонізація CH_4 (синя лінія): має вищий поріг активації, після чого швидко зростає, досягаючи насичення при високих E/N . Це відповідає характеру метану, який має вищий поріг іонізації, але при достатній енергії створює ефективний електронний "вибух". Іонізація N_2 (зелена лінія): починається раніше і зростає плавніше, демонструючи значну активність навіть при помірних значеннях E/N , що пов'язано з особливостями збудження молекул азоту. 1-body attachment (червона лінія): різко активується вже при середніх значеннях E/N , що свідчить про інтенсивне захоплення електронів окремими молекулами, особливо в умовах частих нееластичних зіткнень. 2-body attachment (блакитна лінія): зростає поступово, досягаючи максимуму при нижчих E/N , але не досягає таких значень, як 1-body процес. Це вказує на його другорядну, хоча й стабілізуючу роль.

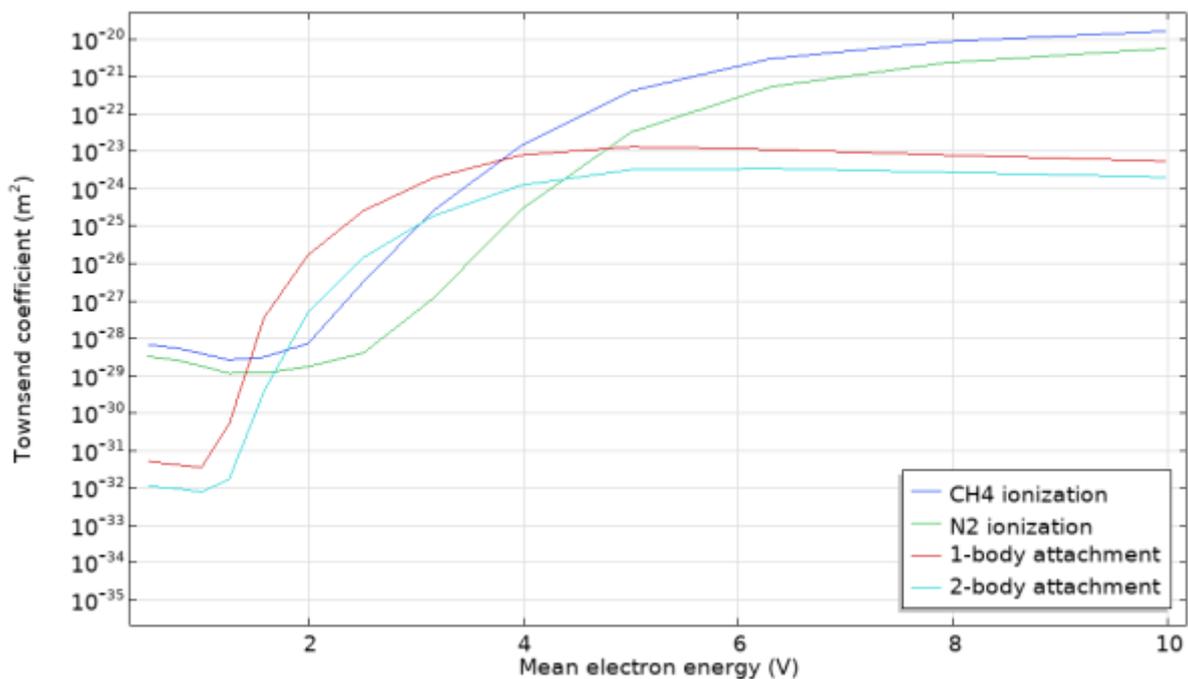


Рис. 5. 11. Коефіцієнт іонізації та приєднання для сумішей окремих концентрацій метану та азоту в залежності від E/N

На низьких E/N домінують процеси приєднання, що веде до зменшення щільності електронів і гальмування розряду. Із підвищенням E/N відбувається перехідний режим, де іонізація починає переважати. У результаті розряд стає самопідтримуваним, із високим ступенем іонізації. Ці дані узгоджуються з попередніми графіками. EEDF демонструє зміщення в область вищих енергій зі зростанням метану, середня енергія електронів зростає разом з E/NE/NE/N, транспортні коефіцієнти також змінюються відповідно до балансу іонізації/приєднання. Співіснування приєднувальних та іонізаційних процесів у сумішах CH₄-N₂ дозволяє ефективно керувати плазовими параметрами, зокрема перехідними режимами стабілізації розряду. Ці результати мають практичне значення для плазмохімічних реакторів, джерел високочастотного розряду та моделювання низькотемпературної нерівноважної плазми в технологічних застосуваннях.

5.4. Конверсія тепла відпрацьованого агента з камер згоряння в електричну енергію

Втрати теплової енергії у процесах згоряння для систем, що використовують водо-вуглеводневі суміші як паливо, можуть досягати понад 60% і це є суттєвою проблемою теплогенераційних систем. Для часткової компенсації цих втрат шляхом рекуперації доцільним є використання термоелектричних генераторів (ТЕГ), які безпосередньо конвертують тепловий потік у електричну енергію для різних застосувань. Наприклад, розроблено компактний ТЕГ для дизельного суднового двигуна, запропоновано алгоритм масштабування ТЕГ для великих промислових систем, ефективним є застосування ТЕГ у холодильних системах і сонячних установках. Паралельно

ведуться розробки і оптимізація конструкцій теплообмінників для покращеної конверсії низькопотенційного тепла в умовах змінних навантажень.

Інтеграція ТЕГ у основні системи електроживлення дозволяє зменшити навантаження на останні та забезпечити певну автономність енергозабезпечення при обмеженому доступі.

Підхід до використання термоелектричних генераторів далі показано на базі доступних комерційних модулів TEC1-12715 у поєднанні з DC-DC перетворювачем для живлення малопотужного електричного споживача в системі рекуперації тепла. Такий підхід для камер згоряння, що працюють із вуглеводнево-водяними сумішами, розглядається як нове рішення для часткової енергонезалежності допоміжних компонентів цих пристроїв.

5.4.1. Експериментальні дослідження конверсії тепла відпрацьованого витяжного повітря в електричну енергію

Експериментальна установка (рис.5.12) містить камеру згоряння, виготовлену з сталі марки AISI 304, в якій відбувається спалювання пропан-повітряної суміші з додаванням водяного туману. Від генератора високовольтних високочастотних імпульсів (ГВВІ) шляхом електричного розряду здійснюється запалювання паливної суміші.



Рис. 5.12. Експериментальна установка для досліджень конверсії тепла відпрацьованого повітряного агента в електричну енергію: 1 – камера згоряння; 2 – магістраль подавання повітря; 3 – магістраль подавання газоподібного палива; 4 – генератор водяного туману; 5 – ГВВІ; 6 – модуль TEC1-12715

Генератор водяного туману містить ультразвукові генератори та вентилятор для примусового нагнітання повітря у пальник по тангенціальній траєкторії. Метою використання водяного туману в процесі спалювання є формування додаткового активного окиснювача та пальної повітряно - вуглеводнево-водної суміші шляхом впливу імпульсних електромагнітних

полів, уникнення пікових температур полум'я та зменшення викидів оксидів азоту.

На зовнішню поверхню камери (рис. 5.12) встановлено термоелектричний модуль типу TEC1-12715 (розміри 40×40×3,2 мм, 127 термопар, максимальний перепад температур ΔT до 60 °С). Розжарена сторона модуля притиснута до корпусу камери із застосуванням термопрокладки GELID GP-Ultimate 15W/МК Thermal Pad CPU/GPU для посилення теплопередачі. Термоелектричні модулі з боку холодної сторони забезпечені алюмінієвими радіаторами і вентиляторним охолодженням, що забезпечує стабільну температуру на рівні ~101 °С . Отже, градієнт температури між гарячою та холодною сторонами становить приблизно 40 °С. Для вимірювання температурного поля застосовуються такі прилади: в камері згорання – термопари типу К з похибкою $\pm 0,5^\circ\text{C}$; на поверхні камери та термомодуля –пірометр з термопарою К-типу 13:1 (-50...+500 °С) FLUS IR-820 та тепловізійна інфрачервона камера НТ-18. Генерована термоелектричним модулем Вихідна напруга модулів вимірювалась цифровим мультиметром UNI-T UT117C True RMS високої точності.

Температурне поле поверхнів камери згорання і термоелектричних модулів під час експериментального дослідження за результатами вимірювань тепловізором показане на рис.5.13. При створеному температурному градієнті приблизно 40 °С модуль забезпечує такі рівні параметрів: вихідну напругу ~1,56 В, струм ~0,32 А і вихідну потужність ~0,49 Вт. Отже, підтверджено працездатність системи із використанням модуля TEC1-12715 для рекуперації теплових втрат.

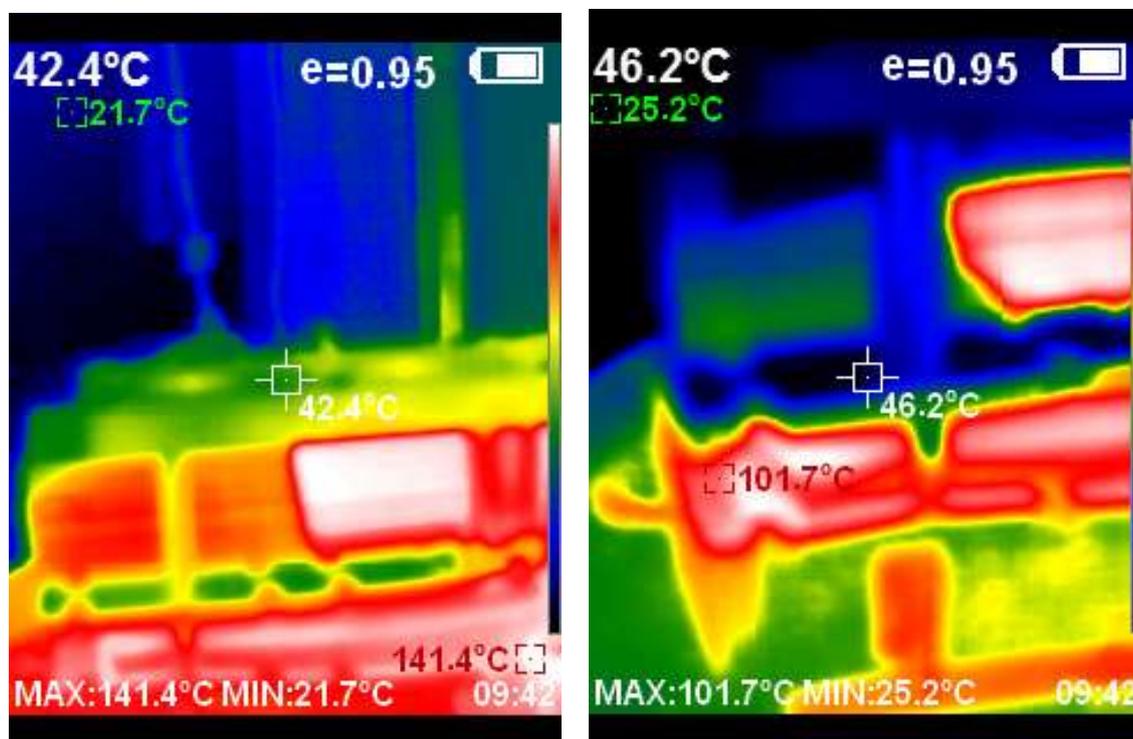


Рис.5.13. Температурне поле поверхней камери згорання і термоелектричних модулів під час експериментального дослідження

Цей рівень потужності і напруг можна використовувати в комбінації з буферним накопиченням енергії для малопотужних вузлів. Для формування більш високих напруг і струмів і масштабування з використанням DC-DC перетворювача можна запровадити конфігурацію з чотирьох ТЕГ-модулів, що з'єднані, наприклад, за такою схемою – по дві послідовні пари, які з'єднані паралельно. Така архітектура дозволяє масштабувати систему для живлення споживачів через DC-DC перетворювач (вхід: 2 В → вихід: 24 В, ККД ≈85%). Крім того, можна розглядати архітектуру накопичення енергії у суперконденсаторі або акумуляторі з імпульсною подачею.

5.4.2. Моделювання процесу роботи термоелектричного модуля

Особливу увагу приділено оцінці можливості живлення малопотужного електричного навантаження за рахунок енергії, отриманої з відпрацьованого тепла, із використанням підвищувального DC-DC перетворювача. В середовищі COMSOL Multiphysics проводиться чисельне моделювання електротермічних процесів з метою перевірки відповідності експериментальних результатів теоретичним прогнозам і формування кроків подальшої оптимізації системи.

Розроблена тривимірна математична модель, яка містить десять пар елементів P/N-Туре і враховує теплопровідність та термоелектричні ефекти. За основу елемента (термоелектричної ніжки) взято телурид вісмуту Bi_2Te_3 , а контакти виконані з міді (Copper). Граничні умови встановлювалися на основі експериментальних даних: температура гарячої сторони $T_{hot} = 141$ [degC], та холодної сторони – $T_{cold} = 101$ [degC]. Комплексна математична модель термоелектричного модуля включає таку систему співвідношень:

$$P = ST \quad (5.21)$$

де P – коефіцієнт термо-ЕРС [В], S – коефіцієнт Зеєбека [В/К], T – температура [К]

$$J_e = -\sigma S \nabla T \quad (5.22)$$

де J_e — густина термоелектричного струму [А/м²], σ — електрична провідність матеріалу [См/м], ∇T - градієнт температури [К/м]. Цей вираз визначає струм в залежності від температурного градієнта.

$$q = -k \nabla T \quad (5.23)$$

де q — вектор густини теплового потоку [Вт/м²], k - коефіцієнт теплопровідності [Вт/(м·К)]. Цей вираз визначає процес теплопровідності у середовищі твердих тіл.

$$\rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{ted} \quad (5.24)$$

де ρ – густина матеріалу [$\text{кг}/\text{м}^3$], C_p - питома теплоємність [$\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$], $u\cdot\nabla T$ —перенесення тепла конвекцією, $\nabla\cdot q$ — дивергенція теплового потоку, Q – об’ємна густина джерел тепла [$\text{Вт}/\text{м}^3$], Q_{ted} – додаткові джерела тепла.

Сітка кінцевих елементів розробленої моделі показана на рис. 5.14.

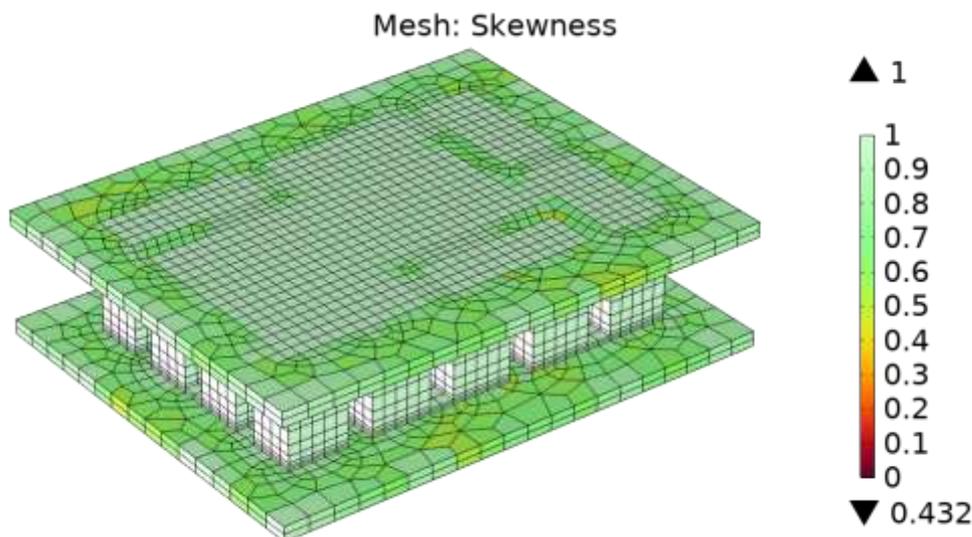


Рис. 5. 14. Сітка кінцевих елементів моделі термоелектричного модуля

Для забезпечення коректності і точності розрахунків температурного поля застосована тривимірна сітка із середньою якістю елементів 0,9482.

Для чисельного аналізу створено 3D-модель, що містила 10 пар термоелементів (рис.5.15). За аналогічного до експериментальних досліджень температурного градієнта модель генерувала вихідну напругу 0,144 В, яка після екстраполяції на повний модуль із 127 парами дорівнювала 1,83 В. У порівнянні з експериментом це значення на 14,7% вище, що пояснюється деякою ідеалізацією умов моделювання, а саме: відсутністю в моделі значень контактного опору; втрат тепла в навколишнє середовище; припущення рівномірності розподілу температури в моделі.

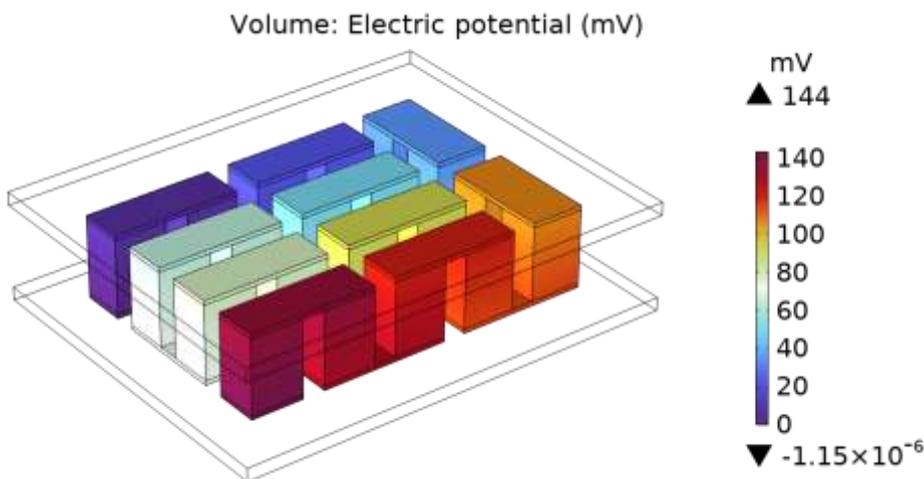


Рис. 5. 15. Розподіл електричного потенціалу

Порівняння результатів моделювання (10 пар) та експериментальних вимірювань (4 модулі по 127 пар) представлено в табл. 5:3.

Таблиця 5.3. Порівняння результатів моделювання та експериментальних вимірювань

Параметр	Моделювання (10 пар)	Екстраполяція (127 пар)	Експеримент (127 пар)
Вихідна напруга	~ 0.144 В	~ 1.82 В	~ 1.56 В

Результати досліджень доводять існування варіантів ефективного використання ТЕГ в умовах систем, що використовують водо-вуглеводневі суміші як паливо. Разом з тим, ці результати показують необхідність подальшої оптимізації у напрямках зменшення втрат тепла в навколишнє середовище, забезпечення градієнтних умов теплових потоків і застосування CFD-аналізу в камері згоряння для удосконалення теплообмінної системи.

ВИСНОВОК

1.Регіональні енергетичні системи можуть бути взяті за основу самоциркулюючих екосистем, в яких відходи, що з'являються при виробництві сільськогосподарської продукції, повертаються у виробничий цикл гідротермічної обробки та ферментації для отримання палива.

2. За методологічну основу досліджень і розробок електротехнологій в комплексах переробки біомаси за умови забезпечення вуглецевої нейтральності приймається системний підхід, в якому принципи згруповані за такими ознаками функціонування, системоутворювання та інструментальною ознакою.

3. Технологічні структури з використанням електротехнологій для переробки біомаси представляються гібридною системою енергозабезпечення електротехнологічного комплексу, в основу створення якою покладена ідея встановлення балансу між енергопотенціалом біомаси побічних продуктів птахівництва для генерації електричної і теплової енергії з енергопотенціалом сировини у поточних режимах її переробки у білковий концентрат, добрива і паливо. До технологічних структур з використанням електротехнологій також віднесені енерготехнологічний комплекс для термохімічної конверсії рослинної біомаси з високою ступінню рекуперації теплової енергії відпрацьованого теплоносія, технологічна структура багатостримерного імпульсно-розрядового супроводження горіння стехіометрично збідненої пальної повітряно-водно-вуглеводневогазової суміші з раціональним використанням дефіцитних вуглеводневих енергоресурсів і зниженням викидів шкідливих речовин при спалюванні.

4. Для удосконалення схеми оцінювання розподілу інвестицій між проектами низьковуглецевих енергетичних технологій актуальними

глобальними екологічними сценаріями на цей час слід вважати The Shared Socio-Economic Pathways (SSPs), Representative Concentration Pathways (RCPs), Shared Climate Policy Assumptions (SPA), а ефективним інструментом для їх розрахунку є моделі інтегральної оцінки.

5. Удосконалений метод спільного спалювання сирого біогазу та утилізованої води для теплогенерації і отримання наноструктур вуглецю заснований на використанні низькотемпературної плазми і магнітного поля в процесах підготовки компонентів палива та супроводження його горіння та спрямований на вирішення проблеми ефективного використання вуглеводневих ресурсів і зменшення високого вмісту забруднюючих речовин в існуючих технологіях спалювання, зокрема, використання як палива необробленого біогазу з метантенку та очищених від нерозчинених домішок і волокон, знезаражених стічних вод.

6. Склад газової суміші метан–азот ($\text{CH}_4\text{--N}_2$) суттєво впливає на енергетичний стан електронів у плазмі та характер електронно-молекулярних процесів. Зі збільшенням концентрації метану спостерігається зростання середньої енергії електронів, розширення функції розподілу енергії (EEDF) та її зміщення в область вищих енергій, що свідчить про підвищену участь енергійних електронів у плазмових реакціях. Транспортні властивості електронів — зокрема рухливість, дифузія та енергетична дифузія — виявляють тісний зв'язок із середньою енергією електронів і суттєво залежать від інтенсивності електричного поля.

7. Підтверджена ефективність перетворення частини низькопотенційного тепла камери згоряння вуглеводнево-водяних сумішей в електроенергію за допомогою автономної системи рекуперації з використанням термоелектричних генераторів. Система має потенціал для застосування в автономних енергетичних рішеннях, зокрема, може забезпечити живлення малопотужного навантаження або працювати у складі масштабованої конфігурації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Marcu Andrei, et al, “Border Carbon Adjustment in the EU: Indirect Emissions in the CBAM” European Roundtable on Climate Change and Sustainable Transition (ERCST) 05 July 2022 Online < <https://ercst.org/indirect-emissions-in-the-eu-cbam-2022/>>

2. The European Union’s Newest Tool to Tackle Carbon Leakage April 19, 2024 By Samuel Huestis <https://rmi.org/the-european-unions-newest-tool-to-tackle-carbon-leakage/>

3. Zhou, Y. (2023). Worldwide carbon neutrality transition? Energy efficiency, renewable, carbon trading and advanced energy policies. Energy Reviews, 100026. journal homepage: www.journals.elsevier.com/energy-reviews
<https://doi.org/10.1016/j.enrev.2023.100026>

4. Luo, H., Yu, M., Zhai, C., An, Y., Wang, C., & Nishida, K. (2023). Study on fermentation gas combustion with hydrogen addition under various throttle openings.

5. Al-Ali, H., Ali, D., & Atteya, A. I. (2023). Investigating the potential of renewable-hydrogen energy storage systems (RHES) in enabling Scotland's farming communities net-zero transition and sizing the proposed RHES system. *Green energy and environment technology*, 2.

6. Minx, J. C., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Bornmann, L., & Fuss, S. (2017). Fast growing research on negative emissions. *Environmental Research Letters*, 12(3), 035007. DOI 10.1088/1748-9326/aa5ee5

7. Система переробки побічних продуктів птахівництва у добриво, корм та паливо: пат. України на винахід № 126120, МПК А23N 17/00 (2016.01). заявл. 15.07.2019 р., опубл. 17.08.2022, бюл. № 33.

8. Спосіб деструктивної енерготехнологічної переробки біомаси: пат. України на винахід № 120684. МПК (2006) С10В 51/00 С10В 53/00, заявл. 09.11.2018 р, опубл.10.01.2020, бюл.№ 1/2020

9. Спосіб багатостримерного імпульсно-розрядового супроводження горіння стехіометрично збідненої пальної повітряно-водно-вуглеводневогазової суміші: пат. України на винахід № 125775. МПК Н05Н 1/24 (2006.01),С10К 3/06 (2006.01)., заявл. 05.11.2020 р, опубл. 01.06.2022, бюл. № 22.

10. Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K (2006) 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. IPCC, Japan

11. Zheng, Y., Gao, L., Dong, R., & He, S. (2022). Role of CCUS in carbon neutral power system. *Carbon Neutrality*, 1(1), 19. <https://doi.org/10.1007/s43979-022-00015-7>

12. Директива 2009/28/ЕС з використання відновлювальних джерел енергії від 23 квітня 2009 року.

13. Cross Sections for Electron Collisions with Methane / M.-Y. Song et al. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 2015. Vol. 44, no. 2. P. 023101. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4918630> (date of access: 18.05.2025).

14. BOLSIG+ solver. LAPLACE – Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie. – Available at: <https://www.bolsig.laplace.univ-tlse.fr/> (accessed: 18.05.2025).

15. Bolos: Electron Boltzmann Solver Documentation. – Available at: <http://bolos.readthedocs.io/en/latest/index.html> (accessed: 18.05.2025).

16. LXCat project – Download center for local Boltzmann solvers. – Available at: <https://fr.lxcat.net/download/> (accessed: 18.05.2025).

17. COMSOL Multiphysics Reference Manual. – Version 5.3a. – COMSOL Inc., 2017.

18. Atmospheric methane and nitrous oxide: challenges along the path to Net Zero / E. G. Nisbet et al. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2021. Vol. 379, no. 2210. P. 20200457. URL: <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0457> (date of access: 18.05.2025).

19. Invited review: A position on the Global Livestock Environmental Assessment Model (GLEAM) / M. J. MacLeod et al. *Animal*. 2018. Vol. 12, no. 2. P. 383–397. URL: <https://doi.org/10.1017/s1751731117001847> (date of access: 18.05.2025).
20. Go D. B. Transport equations for gas discharges. *Ionization and Ion Transport (Second Edition)*. 2022. P. 7–1–7–9. URL: <https://doi.org/10.1088/978-0-7503-3991-9ch7> (date of access: 18.05.2025).
21. Catalyst-free single-step plasma reforming of CH₄ and CO₂ to higher value oxygenates under ambient conditions / Y. Wang et al. *Chemical Engineering Journal*. 2022. P. 137860. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137860> (date of access: 18.05.2025).
22. Orientating the Plasma-Catalytic Conversion of Co₂ and Ch₄ Toward Liquid Products by Using a Composite Catalytic Bed / D. Li et al. *SSRN Electronic Journal*. 2022. URL: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4102505> (date of access: 18.05.2025).
23. Slaets J., Loenders B., Bogaerts A. Plasma-based dry reforming of CH₄: Plasma effects vs. thermal conversion. *Fuel*. 2024. Vol. 360. P. 130650. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130650> (date of access: 18.05.2025).
24. Temporal evolution of electron energy distribution function and its correlation with hydrogen radical generation in atmospheric-pressure methane needle–plane discharge plasmas / Y. Liu et al. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2020. Vol. 54, no. 9. P. 095202. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/abca61> (date of access: 18.05.2025).
25. Energy pooling mechanism for catalyst-free methane activation in nanosecond pulsed non-thermal plasmas / B. Huang et al. *Chemical Engineering Journal*. 2020. Vol. 396. P. 125185. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125185> (date of access: 18.05.2025).
26. A regularized high-order moment model to capture non-Maxwellian electron energy distribution function effects in partially ionized plasmas / A. Alvarez Laguna et al. *Physics of Plasmas*. 2022. Vol. 29, no. 8. P. 083507. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0095019> (date of access: 18.05.2025).
27. Numerical simulation of breakdown properties and streamer development processes in SF₆/CO₂ mixed gas / R. Zhang et al. *AIP Advances*. 2022. Vol. 12, no. 1. P. 015003. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0076343> (date of access: 18.05.2025).
28. Effects of oxygen concentration on streamer propagation and ozone production in a single-filament streamer discharge at atmospheric pressure / A. Komuro et al. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/acc18f> (date of access: 18.05.2025).
29. Temporal evolution of electron energy distribution function and its correlation with hydrogen radical generation in atmospheric-pressure methane needle–plane discharge plasmas / Y. Liu et al. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2020. Vol. 54, no. 9. P. 095202. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/abca61> (date of access: 18.05.2025).

30. LXCat: Phelps database. – Available at: <https://www.lxcat.net> (accessed: 18.05.2025).
31. A 7.5-mV Input and 88%-Efficiency Single-Inductor Boost Converter with Self-Startup and MPPT for Thermoelectric Energy Harvesting / C. Wu et al. *Micromachines*. 2022. Vol. 14, no. 1. P. 60. URL: <https://doi.org/10.3390/mi14010060> (дата звернення: 24.04.2025).
32. Heber L., Schwab J., Knobelspies T. 3 kW Thermoelectric Generator for Natural Gas-Powered Heavy-Duty Vehicles–Holistic Development, Optimization and Validation. *Energies*. 2021. Vol. 15, no. 1. P. 15. URL: <https://doi.org/10.3390/en15010015> (дата звернення: 24.04.2025).
33. Raut P., Vohra M. Experimental investigation and comparative analysis of selected thermoelectric generators operating with automotive waste heat recovery module. *Materials Today: Proceedings*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.227> (дата звернення: 24.04.2025).
34. Thermoelectric Generator with Passive Biphasic Thermosyphon Heat Exchanger for Waste Heat Recovery: Design and Experimentation / M. Araiz et al. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 18. P. 5815. URL: <https://doi.org/10.3390/en14185815> (дата звернення: 24.04.2025).
35. Konstantinou G., Kyratsi T., Louca L. S. Design of a Thermoelectric Device for Power Generation through Waste Heat Recovery from Marine Internal Combustion Engines. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 11. P. 4075. URL: <https://doi.org/10.3390/en15114075> (дата звернення: 24.04.2025).
36. Analysis and Design of a Silicide-Tetrahydrite Thermoelectric Generator Concept Suitable for Large-Scale Industrial Waste Heat Recovery / F. P. Brito et al. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 18. P. 5655. URL: <https://doi.org/10.3390/en14185655> (дата звернення: 24.04.2025).
37. Performance Assessment of Using Thermoelectric Generators for Waste Heat Recovery from Vapor Compression Refrigeration Systems / A. Attar et al. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 23. P. 8192. URL: <https://doi.org/10.3390/en14238192> (дата звернення: 24.04.2025).
38. Wang J., Lu L., Jiao K. Solar- and/or Radiative Cooling-Driven Thermoelectric Generators: A Critical Review. *Energy Engineering*. 2024. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.32604/ee.2024.051051> (дата звернення: 24.04.2025).
39. Numerical Modeling and Investigation of Streamer Breakdown in a Coaxial Plasma Torch Based on Townsend Processes / N. Zablodskiy et al. *2024 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*, Dubai, United Arab Emirates, 27–28 December 2024. 2024. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1109/iceet65156.2024.10913556> (дата звернення: 24.04.2025).

ПИТАННЯ ДЛЯ ОБГОВОРЕННЯ І САМОПЕРЕВІРКИ

1. Який напрямок вважається пріоритетним при вирішенні глобальної проблеми сучасного світу, яка пов'язана з довгостроковими зрушеннями у глобальних температурах, погодних умовах і дефіцитом енергії?
2. Які технології є основою енергетичної системи на шляху декарбонізації та досягнення цілей вуглецевої нейтральності (CN) ?
3. Які енергетичні системи можуть бути взяті за основу самоциркулюючих екосистем, в яких відходи, що з'являються при виробництві сільськогосподарської продукції, повертаються у виробничий цикл гідротермічної обробки та ферментації для отримання газоподібного палива.?
4. Можливі підходи та методологічна основа (принципи і ознаки) досліджень для досягнення цілей вуглецевої нейтральності.
5. Наведіть приклади і охарактеризуйте технологічні структури з використанням електротехнологій для переробки біомаси.
6. Оцінювання розподілу інвестицій між проектами низьковуглецевих енергетичних технологій.
7. Метод спільного спалювання сирого біогазу та утилізованої води для теплогенерації і отримання наноструктур вуглецю.
8. Надайте характеристику розвитку технологій переробки метану у контексті забезпечення енергетичної безпеки та зменшення впливу на навколишнє середовище.
10. Запропонуйте способи і наведіть приклади конверсії тепла відпрацьованого агента з камер згоряння в електричну енергію.

