

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

УДК 621.313.33:621.318.122

ПОГОДЖЕНО

Директор ІНН ЕАіЕ

Каплун В.В.

(підпис) (ПІБ)

“ ” 2023 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри електротехніки,  
електромеханіки та електротехнологій

Окушко О.В.

(підпис) (ПІБ)

“ ” 2023 р.

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему: Електродинамічні процеси в системі «Електродвигун–супермаховик» в  
умовах автономної системи енергозабезпечення

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(код і назва)

Освітня програма – Магістр

(назва)

Магістерська програма – Науково-технічні засади електромеханічного перетворення  
енергії

(назва)

Орієнтація освітньої програми – Освітньо-наукова

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Керівник магістерської роботи

Д-р техн. наук, проф. \_\_\_\_\_ Заблодський М.М.

(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Виконав

(підпис) (ПІБ студента)

Головненко В. П.

КИЇВ 2023

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

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри електротехніки,  
електромеханіки та електротехнологій**

канд. техн. наук, доц. Окушко О.В.

“ ” 2022 року

**ЗАВДАННЯ**

**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**

Головненко Володимир Павловичу

Спеціальність

**141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»**

Освітня програма

**Магістр**

Магістерська програма

**Науково-технічні засади електромеханічного перетворення енергії**

Орієнтація освітньої програми

**Освітньо-наукова**

Тема магістерської роботи **Електродинамічні процеси в системі «Електродвигун–супермаховик» в умовах автономної системи енергозабезпечення**

затверджена наказом ректора НУБіП України від “ ” 20 р.

№ \_\_\_\_\_

Термін подання завершеної роботи на кафедру

Вихідні дані до магістерської роботи –

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Всебічне вивчення патентно-кон'юнктурної та прикладної бази закордонного і вітчизняного досвіду з енергоощадних технологій та обладнання, в яких домінує автономна складова відновлювальних джерел енергії
2. Аналіз умов енергозабезпечення з використанням системи накопичення енергії маховика.
3. Розробка системи автономного енергозабезпечення технологічних ліній конверсії біомаси в енергію, паливо та добрива
4. Дослідження електродинамічних процесів і обґрунтування режимних параметрів системи «Електродвигун–супермаховик».

Перелік графічного матеріалу – презентація – наочні матеріали з результатами дослідження, алгоритми розрахунків і таблиці з отриманими результатами.

Дата видачі завдання “ ” 2022р.

**Керівник магістерської роботи**

**Заблодський М.М.**

**Завдання прийняв до виконання**

**Головненко В.П.**

# РЕФЕРАТ

**Структура та обсяг роботи:** робота вміщує вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 82 сторінок.

**Актуальність теми.** За останнє десятиліття значні зусилля були спрямовані на розробку технологій відновлюваної енергії. Однак переривчастий характер не дозволяє їм бути незалежними та надійними джерелами енергії для мікромереж.

Системи зберігання енергії відіграють важливу роль у забезпеченні безперервної та високоякісної електроенергії, забезпечують умови створення надійних

мікромереж, які працюють безперервно та ефективно розподіляють електроенергію шляхом балансування постачання та навантаження. Існуючі

системи накопичення енергії використовують різні технології, включаючи гідроелектрику, батареї, суперконденсатори, теплові накопичувачі, кінетичні

накопичувачі енергії Flywheel Energy Storage System (FESS), або маховики. Отже, розробка конструкції і обґрунтування режимних параметрів системи

автономного енергозабезпечення з використанням кінетичних накопичувачів енергії представляє собою актуальну науково-технічну задачу.

**Метою дослідження** є визначення параметрів і характеристик електродинамічних процесів в системі «Електродвигун– супермаховик» в умовах автономної системи енергозабезпечення для безперервної і надійної роботи технологічних ліній переробки побічних продуктів птахівництва .

**Завдання дослідження:**

1. Всебічне вивчення патентно-кон'юктурну та прикладну бази закордонного і вітчизняного досвіду з енергоощадних технологій та обладнання по переробці побічних продуктів птахівництва, в яких домінує автономна складова відновлювальних джерел енергії

2. Аналіз умов енергозабезпечення електротехнологічного комплексу з використанням системи накопичення енергії маховика

3. Розробка системи автономного енергозабезпечення технологічних ліній конверсії біомаси в енергію, паливо та добрива.

4. Дослідження електродинамічних процесів в системі «Електродвигун-супермаховик» в умовах автономної системи енергозабезпечення

**Об'єкт дослідження** – електромагнітні процеси в системах високошвидкісного електроприводу.

**Предмет дослідження** – електродинамічні процеси в системі «Електродвигун-супермаховик» в умовах автономної системи енергозабезпечення

Для досягнення мети та здійснення завдань було використано такі **методи**:

- теоретичні – аналіз, синтез, узагальнення, систематизація, порівняння для розкриття сутності та визначення базових понять досліджуваної проблеми, структурування, моделювання для розробки моделі,

- емпіричні – спостереження, порівняння, вимірювання, розрахунок, метод проб і помилок;

- кількісної обробки даних – визначення середніх значень, розрахунок заданих параметрів.

**Організація та експериментальна база дослідження.**

Біомаса побічних продуктів птахівництва з додатковими компонентами (підстилкові матеріали і відходи рослинництва) розглядаються одночасно у двох аспектах:

- сировина для генерації електричної і теплової енергії, яка необхідна для роботи ліній електротехнологічного комплексу;

- сировина для переробки у білковий концентрат, добрива, порошкоподібне і гранульоване паливо.

При цьому цільова функція об'єднує показники обсягів генерування, енергоефективності та біопоказників екологічної безпеки.

При вирішенні поставлених завдань проводились як теоретичні, так і експериментальні дослідження. Теоретичні дослідження електромагнітних процесів базуються на фундаментальних положеннях теорії електричних машин.

теорії коливань, теорії автоматизованого управління. Динамічні режими досліджуються в пакеті MATLAB Simulink.

**Теоретичне значення дослідження:** обґрунтовано можливість застосування контролера Ляпунова для згладжування потужності когенераційної установки і навантаження технологічних ліній з використанням двох різних конфігурацій

маховиків: на основі машини постійного струму та приводу асинхронної машини.

Досліджені електродинамічні процеси в системі «електродвигун-супермаховик» в умовах автономної системи енергозабезпечення при пікових навантаженнях.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	8
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН РОЗРОБОК І ОБЛАДНАННЯ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ	11
1.1 Технологічні схеми конверсії біомаси в енергію та паливо .....	12
1.2 Проблемні питання експлуатації автономних систем з використанням відновлювальних джерел енергії .....	13
1.3 Динамічні характеристики і проблеми керування перетворювачем FESS на основі двигун/Генератор – супермаховик .....	19
РОЗДІЛ 2 СИСТЕМА АВТОНОМНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЛІНІЙ ПЕРЕРОБКИ ПОБІЧНИХ ПРОДУКТІВ ПТАХІВНИЦТВА З ВИКОРИСТАННЯМ FESS .....	26
2.1 Основні передумови побудови системи автономного енергозабезпечення технологічних ліній переробки побічних продуктів птахівництва .....	26
2.2 Вибір конструкції та режимів роботи системи «високошвидкісний електричний двигун – супермаховик» .....	36
2.2.1 Структура та компоненти механічних систем зберігання енергії .....	39
РОЗДІЛ 3 ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В СИСТЕМІ «ЕЛЕКТРОДВИГУН– СУПЕРМАХОВИК» В УМОВАХ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИ ПІКОВИХ НАВАНТАЖЕННЯХ	48
3.1 Загальна характеристика системи .....	48
3.2 Основні аспекти побудови системи керування FESS з використанням теорії управління Ляпунова .....	50
3.3 Зв'язок FESS і припущення в моделюванні .....	52
3.4 Нелінійне керування маховиком на основі машини постійного струму .....	53
3.5 Результати моделювання керування маховиком з використанням машини постійного струму при ступінчастій зміні потужності .....	57
3.6 Контроль потужності індукційної машини .....	60
3.7 Моделювання трифазного короткозамкненого асинхронного двигуна .....	61

3.8 Моделювання нелінійного керування асинхронною машиною..... 63

3.9 Результати моделювання процесу керування маховиком асинхронної машини та результати..... 66

РОЗДІЛ 4 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНИХ УМОВ

РОБОТИ З ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАМИ..... 70

4.1 Основні аспекти створення системи оптимального керування електротехнічним комплексом біогазової установки..... 70

4.2 Забезпечення безпечних умов роботи з електроустановками..... 72

ВИСНОВКИ..... 78

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 80

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## ВСТУП

# НУБІП України

В Україні одночасно з утворенням об'єднаних територіальних громад (ОТГ) сформувались пропозиції зі створення енергонезалежності громад шляхом використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), енергії біомаси. Однак,

# НУБІП України

створювані об'єкти є локальними і не вирішують проблему енергонезалежності системно, що передбачає обґрунтування ряду підсистем – первинних джерел генерації електричної і теплової енергії, транспортування енергії, керування процесами і режимами в реальному часі за критеріями ефективності та

# НУБІП України

надійності. Проблема потребує розроблення нових методів оцінювання технічного та економічного досяжних рівнів енергозабезпечення на основі виробництва енергетичних рослин, утилізації відходів, використання комбінованих систем виробництва електроенергії і тепла, підвищення точності

# НУБІП України

технічного обліку електроенергії за рахунок сучасних приладів обліку високого класу точності і застосування цифрових технологій вимірів, збору і обробки даних.

# НУБІП України

За останнє десятиліття значні зусилля були спрямовані на розробку технологій відновлюваної енергії. Однак переривчастий характер, наприклад вітрової та сонячної енергії, не дозволяє їм бути незалежними та надійними джерелами енергії для мікромереж. Системи зберігання енергії відіграють важливу роль у забезпеченні безперервної та високоякісної електроенергії, забезпечують умови створення надійних мікромереж, які працюють безперервно

# НУБІП України

та ефективно розподіляють електроенергію шляхом балансування постачання та навантаження.

# НУБІП України

Існуючі системи накопичення енергії використовують різні технології, включаючи гідроелектрику, батареї, суперконденсатори, теплові накопичувачі, кінетичні накопичувачі енергії Flywheel Energy Storage System (FESS), або маховики. Літій-іонна батарея має високу щільність енергії, низьку ціну на енергоємність, але набагато меншу щільність потужності та високу вартість на одиницю потужності. Літій-іонна батарея використовується у додатках, які



потребують високої потужності енергії та є чутливими до ваги, наприклад, в автомобільній та побутовій електроніці. Порівняно з батареями, як маховик, так і суперконденсатор мають високу щільність потужності та нижчу вартість потужності. Недоліком суперконденсаторів є менша тривалість розряду і значні саморозряди. Маховики зазвичай підтримуються системами активних магнітних підшипників, щоб уникнути втрат на тертя, тому можуть зберігати енергію з високою ефективністю протягом тривалого часу.

На сьогодні відсутні дослідження по обґрунтуванню структури вибору конструкції та режимів роботи системи «високошвидкісний електричний двигун супермаховик» в системі переробки побічних продуктів птахівництва. Тому дослідження електродинамічних процесів в системі «Електродвигун-супермаховик» в умовах автономної системи енергозабезпечення є актуальною науково-прикладною задачею.

#### **Зміст поставлених завдань:**

1. Всебічне вивчення патентно-кон'юктурну та прикладну бази закордонного і вітчизняного досвіду з енергоощадних технологій та обладнання по переробці побічних продуктів птахівництва, в яких домінує автономна складова відновлювальних джерел енергії
2. Аналіз умов енергозабезпечення електротехнологічного комплексу з використанням системи накопичення енергії маховика
3. Розробка системи автономного енергозабезпечення технологічних ліній конверсії біомаси в енергію, паливо та добрива
4. Дослідження електродинамічних процесів в системі «Електродвигун-супермаховик» в умовах автономної системи енергозабезпечення

**Об'єкт дослідження** – електромагнітні процеси в системах високошвидкісного електроприводу .

**Предмет дослідження** – електродинамічні процеси в системі «Електродвигун-супермаховик» в умовах автономної системи енергозабезпечення.

Основні положення кваліфікаційної магістерської роботи доповідались на 76-й науково-практичній конференції студентів «Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК», м.Київ, НУБіП України [34].

НУБіП України

НУБіП України

НУБіП України

НУБіП України

НУБіП України

НУБіП України

## РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН РОЗРОБОК І ОБЛАДНАННЯ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

У світовій практиці станом на сьогодні є приклади реалізованих систем MicroGrid – локальних автономних систем енергоживлення комунально-побутових і виробничих об'єктів сільських територій. Відомі мультирівневі технології VSC (Voltage - Sourced Converter, США) Siemens Energy (Німеччина) для передачі електроенергії, інноваційні рішення HVDC (High Voltage Direct Current) і FACTS (Flexible AC Transmission Systems), що забезпечують адаптацію до нових викликів розумної мережі.

В Україні одночасно з утворенням об'єднаних територіальних громад (ОТГ) сформувався пропозиції зі створення енергонезалежності громад шляхом використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), енергії біомаси. Однак, створювані об'єкти є локальними і не вирішують проблему енергонезалежності системно, що передбачає обґрунтування ряду підсистем – первинних джерел генерації електричної і теплової енергії, транспортування енергії, керування процесами і режимами в реальному часі за критеріями ефективності та надійності. Проблема потребує розроблення нових методів оцінювання технічного та економічного досяжних рівнів енергозабезпечення на основі виробництва енергетичних рослин, утилізації відходів, використання комбінованих систем виробництва електроенергії і тепла, підвищення точності технічного обліку електроенергії за рахунок сучасних приладів обліку високого класу точності і застосування цифрових технологій вимірів, збору і обробки даних. США і Китай розглядає Smart Grid як провідний компонент програми стратегічного розвитку. В державах Євросоюзу технології Smart Grid перетворилися в основний інструмент енергетичної політики [1]. Але для впровадження інтелектуальної системи енергоспоживання необхідна структурна модернізація всієї енергетичної платформи [2]. Ефективність технології Smart Grid визначається автоматизацією прийняття рішень з керування нормальними та аварійними режимами [3]. Отже, для ОТГ необхідне розроблення концепції та

побудувати інтелектуальну систему для об'єднання відновлюваних джерел енергії в одну оптимальну систему енергопостачання на основі використання синхронізованих векторних вимірювань хмарних технологій.

В роботах [4-6] показано доцільність вирощування маргінальних земель для культивування сировини і виробітку біогазу. Доведено доцільність моніторингу земель за допомогою БПЛА, проте існуючі методики калібрування обладнання БПЛА неприйнятні для полів в виробничих масштабах.

### 1.1 Технологічні схеми конверсії біомаси в енергію та паливо

Конверсія (перетворення) біомаси в інші види енергоносіїв або кінцеву теплову чи електричну енергію може відбуватись фізичними, хімічними і біохімічними методами (рис 1.1).

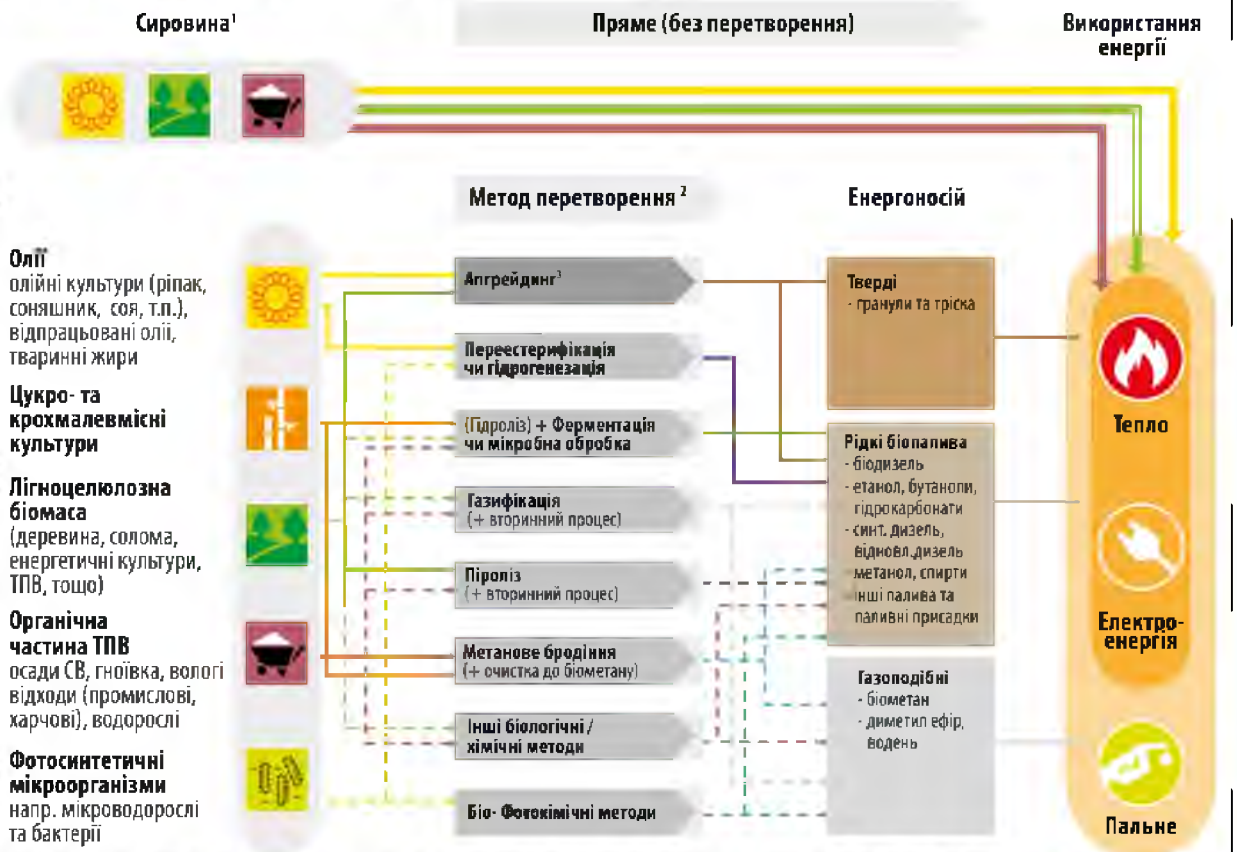


Рис. 1.1. Методи конверсії енергії біомаси (суцільні лінії представляють комерційні технології, пунктирні – технології, що розвиваються)

Однією з головних переваг використання біомаси для виробництва енергії є її універсальність, яка відображається в широкому діапазоні технологій перетворення енергії та методів використання. Біомаса може генерувати енергію

шляхом прямого спалювання (дерева, соломи), а також оброблених рідких форм (ефірні рідкопаливних олій, спирти, рідкі продукти піролізу) або газоподібного біопалива (біогаз із сільськогосподарських і рослинних відходів, осад стічних вод, органічної фракції твердих побутових відходів, продукти газифікації твердого палива).

Загалом на частку біомаси припадає 57% усієї відновлюваної енергії, що використовується у світі. Однак важливо зазначити, що використання біомаси має здійснюватися з обережністю та з урахуванням її довгострокової стійкості, щоб забезпечити стаке та ефективне використання цього ресурсу. Аналіз

прогнозного кінцевого споживання енергії з відновлюваних джерел в 26 країнах світу до 2030 р. показує, що біомаса продовжить відігравати домінуючу роль (рис.1.2).

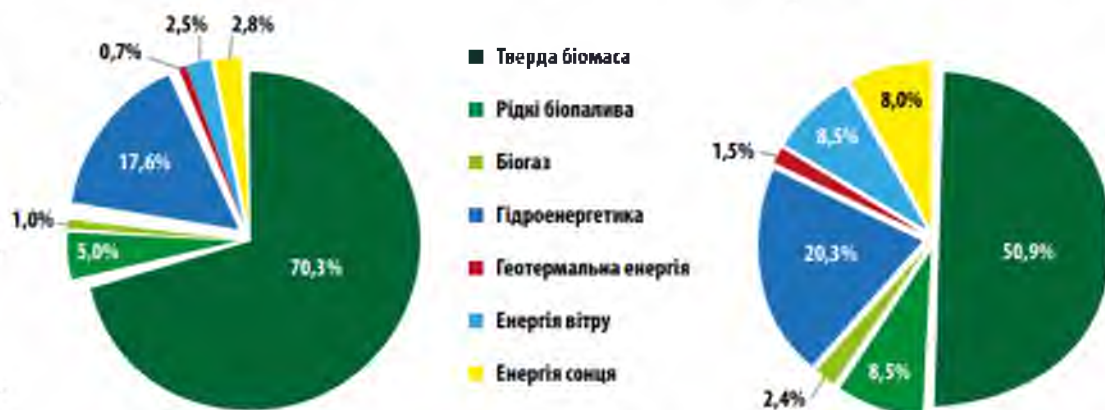


Рис.1.2. Споживання енергії з ВДВ у світі в 2010 р. (а) та прогноз на 2030р. (б)

## 1.2 Проблемні питання експлуатації автономних систем з використанням відновлювальних джерел енергії

За останнє десятиліття значні зусилля були спрямовані на розробку технологій відновлюваної енергії. Однак переривчастий характер, наприклад вітрової та сонячної енергії, не дозволяє їм бути незалежними та надійними джерелами енергії для мікромереж. Системи зберігання енергії відіграють важливу роль у забезпеченні безперервної та високоякісної електроенергії, забезпечують умови створення надійних мікромереж, які працюють безперервно

та ефективно розподіляють електроенергію шляхом балансування постачання та навантаження.

Існуючі системи накопичення енергії використовують різні технології, включаючи гідроелектрику, батареї, суперконденсатори, теплові накопичувачі, кінетичні накопичувачі енергії Flywheel Energy Storage System (FESS), або маховики. Літій-іонна батарея має високу щільність енергії, нижчу ціну на енергоємність, але набагато меншу щільність потужності та високу вартість на одиницю потужності. Літій-іонна батарея використовується у додатках, які потребують високої потужності енергії та є чутливими до ваги, наприклад, в автомобільній та побутовій електроніці. Порівняно з батареями, як маховик, так і суперконденсатор мають високу щільність потужності та нижчу вартість потужності. Недоліком суперконденсаторів є менша тривалість розряду і значні саморозряди. Маховики зазвичай підтримуються системами активних магнітних підшипників, щоб уникнути втрат на тертя, тому можуть зберігати енергію з високою ефективністю протягом тривалого часу.

Очевидно, надалі літій-іонні батареї будуть більш економічно конкурентоспроможними, ніж будь-яка альтернатива для більшості застосувань, але FESS все ж будуть конкурентоспроможні для додатків, які потребують частого заряджання/розряджання з великою кількістю циклів. Маховики також мають найменший вплив на навколишнє середовище серед трьох технологій, оскільки вони не містять хімікатів. Це робить системи накопичення енергії з використанням маховика ефективними засобами для регулювання електричної мережі, підвищення ефективності розподілу та згладжування виходу електроенергії від відновлюваних джерел енергії, таких як вітрові та сонячні електростанції, біогазові установки. Крім того, через їх високу щільність потужності та швидкий час відгуку типові програми маховика накопичення енергії також включають безперебійне електропостачання, гібридність та урегулювання пульсацій потужності та частоти мережі.

Системи накопичення енергії з використанням маховика представлені як форма механічної системи накопичення енергії у багатьох публікаціях. Зв'язана

система накопичення енергії є одним із потенційних способів покращити ефективність регулювання піку та частотної модуляції для існуючої теплоелектростанції [7]. Виходячи з характеристик типів накопичувачів енергії,

досягнення точного представлення параметрів для багаторазового накопичення енергії було необхідним кроком для координації регулювання. У цій роботі було

використано резервуар для зберігання тепла для пікового регулювання та накопичувач енергії на маховику для частотної модуляції, включаючи проектування параметрів та оцінку продуктивності для їх швидкості заряджання

(або розряджання) та ємності. Було реалізовано спільну оптимізацію подвійних

систем зберігання енергії. Варто зазначити, що криві потужності регіональних теплових та електричних навантажень повинні коригуватись відповідно до встановлених вимог. Результати показали, що встановлена швидкість заряду та

розряду, а також ємність накопичувача енергії сприяють покращенню глибини

пікового регулювання системи. Кооперативне регулювання на основі подвійного

накопичення енергії може додатково збільшити можливості регулювання піків і частотної модуляції. Наведено приклад розрахунку для перевірки надійності розрахункового методу параметра зберігання енергії. Бак для накопичення тепла

можна використовувати для регулювання піків, а накопичення енергії на

маховику для частотної модуляції. Загалом метод проектування параметрів для подвійного накопичення енергії може задовольнити інженерні вимоги та забезпечити новий напрямок для подальшого проектування параметрів сумісної

системи накопичення теплової енергії [7].

Потужність і енергетичні показники є найважливішими параметрами FESS, які мають вирішальний вплив на її динамічні характеристики в програмах регулювання частоти [8]. Для досягнення оптимальних динамічних

характеристик FESS необхідна інтегрована модель, яка включає ключові параметри електромережі та FESS. У цій роботі представлено інтегровану

передатну функцію FESS, підключеної до одношвидкої агрегованої енергосистеми. Запропонована модель включає параметри мережі живлення та FESS, яку лінеаризовано для полегшення застосування підходу екранінгу

параметрів, що розпізнає найбільш впливові параметри за допомогою методу Тагучі. Після цього використовується комбінований алгоритм оптимізації Response Surface Methodology (RSM)-GA на основі точної апроксимації передатної функції системи. Щоб отримати показники потужності та енергії FESS на основі найнижчої ціни капіталовкладень та цільових функцій найкращого динамічного відгуку, використовується алгоритм оптимізації. Експериментально підтверджена достовірність запропонованого підходу до моделювання та оптимізації.

Відомі публікації щодо зменшення пікової потужності та підвищення енергоефективності за допомогою накопичувача енергії надпровідного маховика в системі електричної залізниці [9]. Система має велику потужність електричного обладнання та навантаження і тому її інтереси зосереджені на великих системах накопичення енергії та енергії, таких як накопичувач енергії на надпровідному маховику (SFES), система накопичення енергії акумулятора (BESS) тощо. Серед різних типів накопичувачів SFES є найбільш доцільним в системі електричних залізниць, оскільки має невеликі витрати та довговічність. Корейська електрична енергетична компанія (KEPCO) стягує вартість електроенергії за загальну кількість спожитої енергії в кВт/год, а також базову плату за пікову потужність у кВт. Однак ця система білінгу є не вигідною для оператора електрозалізниці, оскільки залізниця має велику пікову потужність порівняно з енергоспоживанням. Тому багато залізничних енергетиків намагалися знайти рішення по зменшенню пікової потужності. В [9] пропонується нова стратегія для програм SFES для зменшення пікової потужності та енергозбереження, яка полягає в застосуванні надпровідних махових систем зберігання енергії потужністю 100 кВт/год для зменшення пікової потужності електричної залізничної системи. Системи електрозалізниць мають високу потужність і велику кількість рекуперативної енергії під час гальмування транспортних засобів. Характеристика високої потужності робить експлуатаційні витрати високими, оскільки система повинна гарантувати безпечну потужність електричного обладнання, а низький рівень використання



регенеративної енергії обмежує значне підвищення енергоефективності. У цій статті було доведено, що зниження пікової потужності та підвищення енергоефективності можна досягти за допомогою надпровідних махових систем зберігання енергії потужністю 100 кВт/год з оптимально контрольованими операціями заряджання та розряджання.

Значна кількість досліджень присвячена використанню надпровідних підшипників у системах зберігання енергії маховика. У підшипниковій системі використовуються упорний підшипник і два опорних підшипника, які складаються з масивів високотемпературного надпровідника YBCO з текстурою

розплаву та постійних магнітів Nd-Fe-B. Вивчається динамічна поведінка ротора, включаючи критичні швидкості та втрати на обертання. Привідний трифазний асинхронний двигун із змінною частотою, вал ротора, прикріплений до 25-кілограмового диска маховика, може розганятися до 15 000 об/хв без серйозного

резонансу [10]. Хоча система маховика стабільно працює в області надкритичних швидкостей, дуже очевидних втрат обертання не уникнути. Механізм втрат обговорювався з точки зору втрат на вихрові струми та втрат на гістерезис. Широко досліджуються техніко-економічні можливості маховиків короткочасного накопичення енергії з підшипником високотемпературної

надпровідності (ВТП) [11]. Важливо зменшити втрати змінного струму, спричинені змінами магнітного поля в об'ємних дисках/кільцях ВТСП (левітаторах), які використовуються в магнітних підшипниках маховиків. Для

ВТП підшипників виконано розрахунок і вимірювання розподілу магнітного поля. Були виміряні такі ефекти, як ексцентриситет, нахил. Виміряно залежність від часу сили левітації після стрибкоподібного руху постійного магніту. Результати були використані для налаштування алгоритму інженерного проектування для накопичувачів енергії HTS маховиків. Цей алгоритм був застосований до експериментальної моделі маховика HTS з двигуном/генератором дискового типу з радіальним потоком.

В [12] повідомляється про створення маховика для накопичення енергії з використанням автостабільних надпровідних магнітних підшипників.

Обертювий диск має загальну вагу 2,8 кг. Максимальна швидкість 9240 об / хв. Розроблено процес, який забезпечує прискорене, надійне та відтворюване виробництво надпровідного матеріалу з текстурою розплаву, який використовується для підшипників. Щоб визначити оптимальні конфігурації для радіальних і осьових підшипників, були виміряні сили взаємодії в трьох вимірах, а також вертикальна і горизонтальна жорсткість між надпровідниками і постійними магнітами в різних формах. Були проведені як статичні, так і динамічні вимірювання та порівняння з теоретичними моделями.

Технічний науково-дослідний інститут залізничного транспорту провів дослідження для розробки надпровідного магнітного підшипника, застосовного до системи накопичення енергії маховика для залізниць [13]. На першому етапі дослідження для застосування було обрано підшипник кочення, а в якості ротора було використано HTS-бак з охолодженням рідким азотом. Як статор для надпровідного магнітного підшипника використана надпровідна котушка. Вантажопідйомність надпровідного магнітного підшипника була перевірена до 10 кН у випробуванні статичним навантаженням. Після цього було проведено випробування на обертання цього доданого тягового навантаження приблизно 5 кН з максимальним обертанням 3000 об/хв. За результатами випробування обертання підшипника було підтверджено, що положення під час левітації здатне підтримувати стабільність обертання. Властивості теплообміну випромінюванням у вакуумі та провідність розрідженого газу в основному досліджувалися експериментально з метою підтвердження методу охолодження ротора. Експериментальний результат демонструє, що оптимальний тиск газу можна отримати без створення опору вітру. На другому етапі розробки буде покращено тягову вантажопідйомність підшипника з метою досягнення енергоємності практичного масштабу. Під час випробування на статичне навантаження нового надпровідного магнітного підшипника була отримана стабільна сила левітації 20 кН.

Аналіз вихрових струмів та оптимізацію для надпровідного магнітного підшипника системи накопичення енергії маховика здійснено в [14]. Оскільки

магнітне поле залежить від конфігурації котушки та об'ємів, ексцентриситет і вібрація ротора викликають коливання магнітного поля, яке індукує вихровий струм  $i$ , як наслідок, джоулеву теплоту на електричних провідниках, таких як охолоджувальні пластини. Вироблення тепла в криогенній області критично знижує ефективність FESS.

Тим не менш, значно менший обсяг досліджень, присвячених аспектам використання автономних систем з використанням відновлювальних джерел енергії в технологічних системах конверсії рослинної біомаси та побічних продуктів тваринництва та птахівництва.

### 1.3 Динамічні характеристики і проблеми керування перетворювачем FESS на основі двигун/генератор – супермаховик

FESS підходить, коли потрібні численні цикли заряджання та розряджання (сотні тисяч) середовища до високої потужності ( від кВт до МВт) протягом коротких періодів (секунди). Застосування було широко досліджено в галузі джерел безперебійного живлення, мікромереж, вітрових електростанцій, залізничні транзити, гібридні транспортні засоби тощо. Двигуни/генератори, які використовуються в FESS, вимагають широкого робочого діапазону через механізм заряду/розряду [15]. Однак широкий діапазон швидкості роботи за короткий період розряду є проблемою для керування перетворювачем FESS на основі синхронного двигун/генератора з постійними магнітами (PMSM/C), який показаний на рис. 1.3.

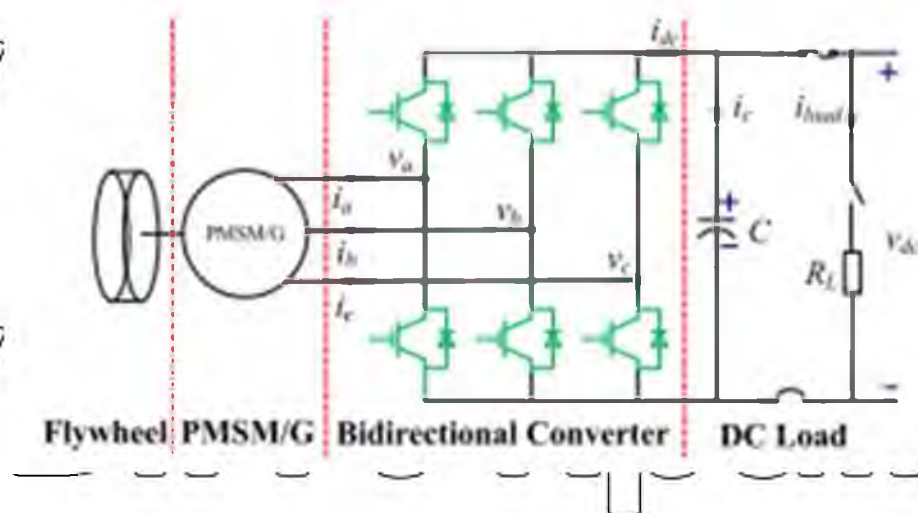


Рис. 1.3. Принципова схема FESS з навантаженням постійного струму[15]

Маховик приводиться в рух коаксіально з'єднаними PMSM/G і двонаправленим перетворювачем. RL — це еквівалентний змінний у часі параметр, який використовується для аналізу навантаження постійного струму.

Відповідно до еталонного напрямку співвідношення між напругою на клеммах і струмом статора в режимі заряду, рівняння FESS отримують і перетворюють у синхронну систему відліку як (1) – (5). Вісь d збігається з потокозчепленням  $\Psi_m$ , а вісь q ортогональна  $\Psi_m$ . Баланс потужності між PMSM/G і двонаправленим

перетворювачем виражається як (1.6), в якому негативний знак є результатом напрямку струму, визначеного на рис. 1.3

$$L_d \frac{di_d}{dt} = v_d - R_s i_d + \omega_r L_q i_q \quad (1.1)$$

$$L_q \frac{di_q}{dt} = v_q - R_s i_q - \omega_r L_d i_d - \psi_m \omega_r \quad (1.2)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - B_m \omega_m - T_L \quad (1.3)$$

$$\omega_r = P \cdot \omega_m \quad (1.4)$$

$$C \frac{dv_{dc}}{dt} = i_{dc} - \frac{v_{dc}}{R_L} \quad (1.5)$$

$$v_{dc} i_{dc} + P_{switch} = -\frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \quad (1.6)$$

де  $i_d, q$ ,  $v_d, q$  і  $L_d, q$  відповідають струмам, напругам та індуктивностям статора по осі d, q відповідно.  $R_s$  – опір статора,  $\omega_r$  і  $\omega_m$  – електрична та механічна кутові швидкості відповідно,  $\psi_m$  – потокозчеплення PMSM/G, P – число пар полюсів, J,  $B_m$ ,  $T_L$  – відповідно інерція, коефіцієнт механічного демпфування та механічний момент навантаження.  $v_{dc}$ ,  $i_{dc}$  і C – напруга, струм і конденсатор ланцюга постійного струму відповідно.  $P_{switch}$  — це втрати на перемикання біполярних транзисторів із ізольованим затвором.

При швидкому широкодіапазонному гальмуванні в період розряду (десятки тисяч об/хв за секунди), зворотна електромагнітна сила (ЕМП)

амплітуди та частоти PMSM/G послідовно зменшуються. Щоб забезпечити достатню вихідну потужність, активний струм потребує динамічного регулювання зі зміною швидкості. Однак більшість робіт з керування двигуном/генератором FESS зосереджено на управлінні крутним моментом у режимі заряду або на системному рівні контролю. Найбільш використовуваною стратегією є лінійна схема управління на основі PI локальної лінеаризованої моделі в певній робочій точці. Але вона не може забезпечити заповільні динамічні характеристики у випадку зсуву робочої точки, викликаного зміною швидкості в широкому діапазоні. Серія точних схем лінеаризації зворотного

з'язку було застосовано для роботи з нелінійністю, однак ці схеми або сильно залежать від точних параметрів, або занадто складні для реалізації на практиці.

Класична система керування розрядом це двохступурна каскадна структура, показана на рис. 1.4 із регулятором контуру напруги постійного струму на основі PI та регуляторами контуру струму по осі d-q. Запропонована стратегія надійного розряду все ще використовує каскадну структуру, а стратегія контуру струму на основі PI з  $i_d = 0$  залишається.

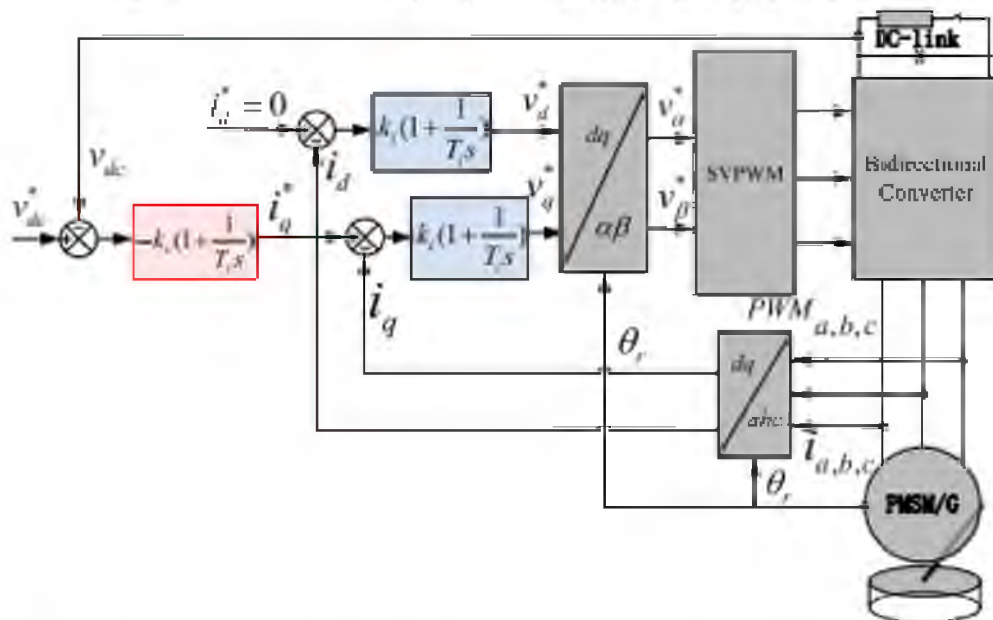


Рис. 1.4. Традиційна стратегія управління розрядом FESS на основі PI - регулятора

На рис.1.5 представлено нижню межу діапазону швидкостей і струму по осі  $\omega$  для FESS з максимальною вихідною потужністю 2,5 кВт при максимальній швидкості 12 000 об./хв. Перетин поверхні вихідної потужності FESS і певної поверхні потужності навантаження визначає нижню межу доступного робочого діапазону при конкретних умовах навантаження.

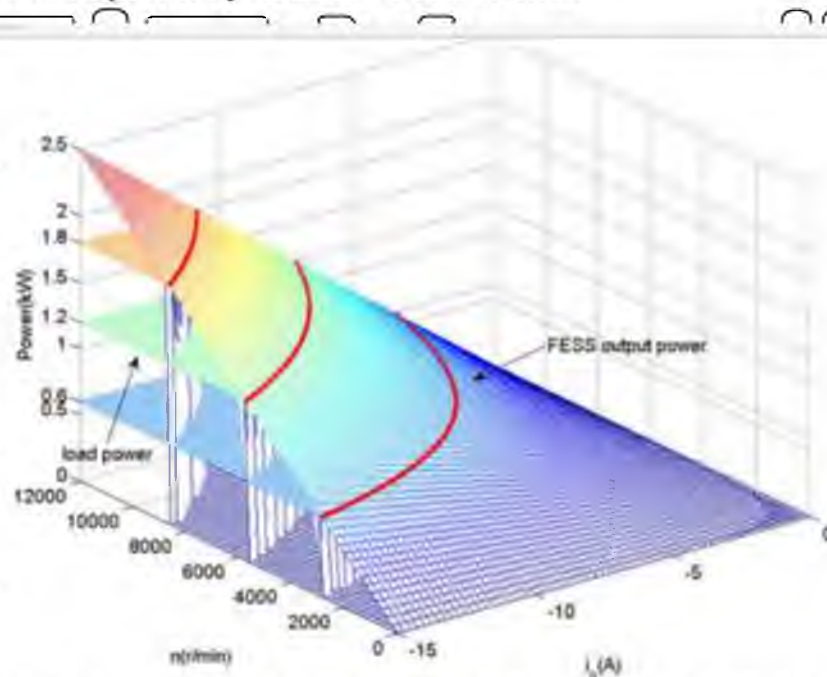


Рис.1.5. Обмеження швидкості та струму FESS 2,5 кВт при різних режимах навантаження[15].

Запропонована стійка до зміни параметрів і невизначеності стратегія, яка демонструє задовільну динамічну продуктивність у всьому доступному робочому діапазоні (рис.1.6). Запропонована стратегія розряду має петлю напруги постійного струму на основі розширеного спостерігача стану (ESO).

НУБІП України

НУБІП України



тип FESS, у якому M/G має можливість установлюватися всередині або зовні захисної оболонки. Щоб зменшити втрати ротора через аеродинамічний опір, його бажано підтримувати при низькому тиску. Вал або механічна муфта з'єднує M/G і ротор без фізичного контакту. Загальний діаметр ротора збільшується для зберігання кінетичної енергії. У деяких системах маховика зазвичай використовується зовнішня конфігурація M/G. Тут M/G працює з порівняно нижчою швидкістю, і тепло, що виділяється з нього, має швидше відводитися.

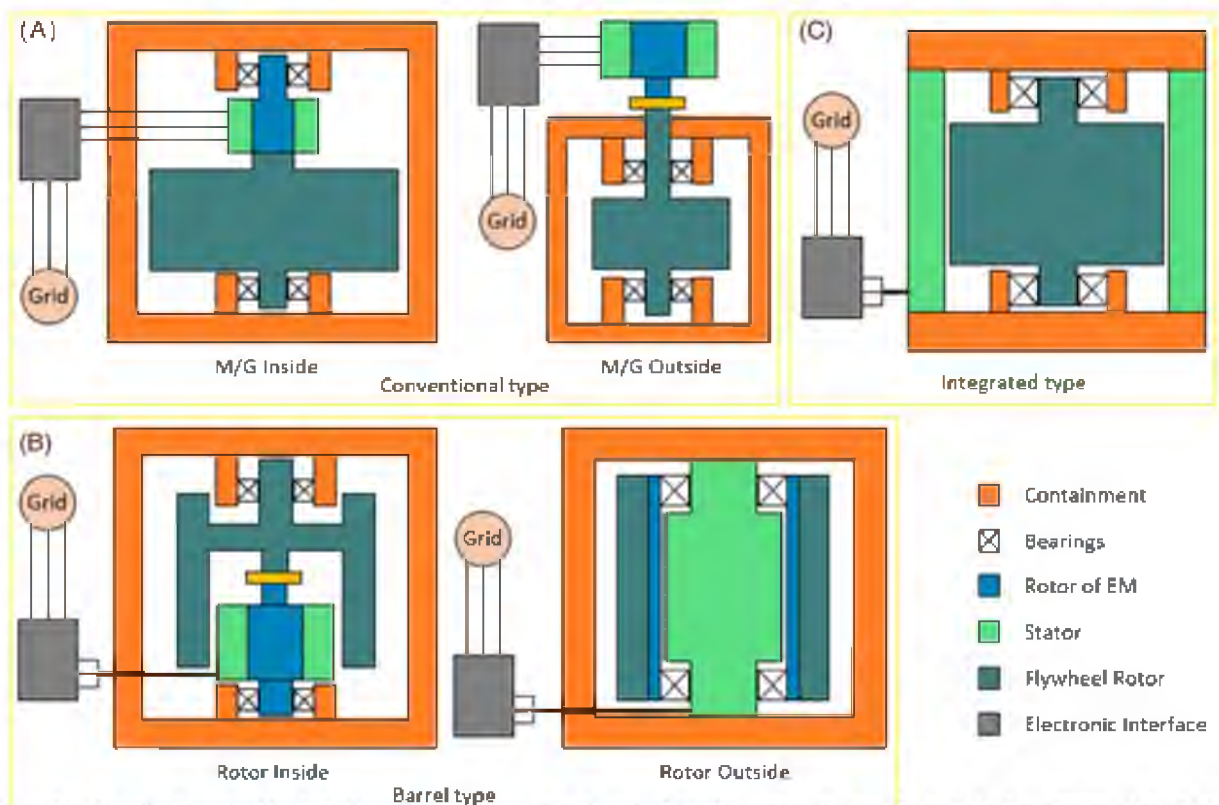


Рис.1.7. Різні конфігурації FESS

На рис.1.7, В спроектовано конфігурацію, яка називається «бар rel» або «порожнистий». Ця структура забезпечує переваги маховика композитного ротора, оскільки вона компактна і може зберігати енергію в кільці з легкою втулкою посередині. Тим не менш, ця конструкція неефективна при застосуванні для ізотропних сталевих махових роторів. «Інтегрований» або «гібридний» тип конструкції зображено на рис. 1.7, С. Ця структура являє собою комбінацію частин накопичувача енергії ротора та електромагнітних блоків. Загальну вагу конфігурації утримування можна зменшити, використовуючи цю конструкцію.



Однак є деякі серйозні проблеми: 1) потребує занепокоєння безпекою установки захисної оболонки; 2) не застосовується до роторів композитного типу, оскільки для створення крутного моменту потрібен електромагнітний матеріал.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## РОЗДІЛ 2 СИСТЕМА АВТОНОМНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЛІНІЙ ПЕРЕРОБКИ ПОБІЧНИХ ПРОДУКТІВ ПТАХІВНИЦТВА З ВИКОРИСТАННЯМ FESS

### 2.1 Основні передумови побудови системи автономного енергозабезпечення технологічних ліній переробки побічних продуктів птахівництва

ПРАТ "Миронівський хлібопродукт" збудував територію на птахофабриці "Оріль-Лідер" біогазову станцію потужністю 5,5 МВт/год. Це перша в Європі біогазова станція такої потужності й рівня технологій, яка працює на курячому посліді і відходах комплексу з переробки курчат-бройлерів (рис.2.1).



Рис.2.1."Комплекс "Біогаз Ладижин"

Біогазова установка, яка використовує як сировину курячий послід та відходи центрів переробки бройлерів, є першою в Європі за потужністю та технологіями (див. рис. 2.1). ПРАТ «Оріль-Лідер» на даний момент має 3 виробничі лінії, інкубатор з річною продуктивністю 75 млн яєць, виводом 81,9%.

Крім того, річне виробництво яєць становить 52 млн. штук, а в цілому по області функціонує 24 птаховницькі виробничі бази та 239 пташників. Також є цех із забою та переробки бройлерів максимальною продуктивністю 9500 голів на годину. Виробництво підстилки на одну курку становить приблизно 0,27-0,32 кг на день, і можна виділити два основних типи підстилки - клітини та підстилку.

Клітковий послід є дуже чистим, оскільки не містить сторонніх домішок, крім води та незначної кількості пуху, пір'я та часток кормів. У більшості випадків клітковий послід отримують від яєчних курей, які утримуються в кліткових

батареях, тому є відносно легкодоступним джерелом біомаси. Клітковий послід може бути в рідкому стані або мати натуральну вологість, а також може бути підсушеним для зручності зберігання та транспортування. Рідкий послід вологістю 83-95% отримують в кліткових батареях з скребковими механізмами прибирання посліду, оскільки, по перше - вода у нього потрапляє з напувалок недосконалої конструкції, а по друге - для надійної роботи скребкових механізмів оператори змушені розбавляти його водою. Як наслідок, маса посліду порівняно з натуральною та, відповідно, витрати на його транспортування збільшуються в 2-3 рази. Рідкий послід також вимагає більших площ для зберігання, несе більше загроз для довкілля та ветеринарно-санітарного благополуччя самого господарства, значно ускладнюється його подальша переробка більшістю способами.

Останнім часом на зміну клітковим батареям з скребковими механізмами приходять кліткові батареї з стрічковими транспортерами прибиранням посліду та удосконаленими ніпельними напувалками з каплеуловлювачами, які виключають потрапляння води у послід. Для зменшення витрат електроенергії на прибирання, використовують батареї, які дозволяють прибирати послід один раз в 3-5 днів. Більшість птахів утримують на глибокій підстилці, що дозволяє знизити частоту прибирання посліду. При цьому отримують підстилковий послід, який являє собою суміш посліду та підстилкових матеріалів (стружки, лушпиння соняшника, соломи, торфу тощо) на різній ступені мікробіологічного розкладу. Уміст метану в біогазі визначає його цінність як енергоносія.

На птахофермі «ОрільЛідер» на продукування біогазу використовуються відходи з відповідності нагромадження маси та утилізації її 365 діб на рік з загальним виходом 655 т/добу:

- Пташиний послід з підстилкою 180 т / добу (66 000 т / рік);
- Флотацийний шлам (рідкий) 40 т / добу (14 600 т / рік) ;
- Відходи убійного цеху 35 т / добу (13 000 т / рік) ;
- Силона маса сорго 50 т / добу (18 000 т / рік) ;
- Вода з очисних споруд 350 м куб / добу (128 000 м куб / рік).

Вихід біогазу на рік складає 19200000 м<sup>3</sup>, із цієї кількості біогазу при спалюванні його в когенераційній установці можна отримати 38400000 кВт год електроенергії, теплової енергії – 27400 Гкал/рік. і 10400000 м<sup>3</sup>/рік біогазу, який використовується для отримання тепла. Кількість рідких біодобрив коливається від 150000 до 261346 м<sup>3</sup>, а твердих від 14103 до 28981 т.

На птахофабриці, де зараз утримується 27 мільйонів голів птиці, добудовують нові пташники, що передбачено інвестиційним планом, кількість сировини буде зростати. Отримання біогазу з курячого посліду — це складний процес. Зброджування посліду, одержаного за кліткового утримання курей (несучок, курчат та бройлерів), дає вихід біогазу приблизно 140 м<sup>3</sup> з тони відходів. Послід із підстилкою, який видаляють із пташника раз на 35-40 днів, дає нижчий вихід біогазу (приблизно 80 м<sup>3</sup>/т), що зумовлено високим вмістом лігніну (компоненту соломи, тріски), який не піддається зброджуванню.

В нашому проєкті пропонуються технологічні рішення по птахофермі «Оріль-Лідер», які передбачають створення системи переробки усіх побічних продуктів птахівництва, в тому числі, для виробництва сухого або гранульованого палива з пташиного посліду та системи автономного енергозабезпечення технологічних ліній.

Наявність власних полів поблизу «Оріль-Лідера» дозволяє біогазовому комплексу без проблем реалізовувати відходи виробництва, вносячи дигестат замість мінеральних добрив. Щомісячно фабрика виробляє 2 тисячі тонн. Ще 5-7% твердих добрив продається споживачам в регіоні. Існують технічні умови на виробництво рідкої та твердої фракції з досушування дигестату, але оскільки в Україні немає сформованого ринку сухих органічних добрив, досушена біомаса використовується як паливо для котлів.

В когенераційних установках загальний ККД може досягати 95% (42% - ККД вироблення електричної енергії, 43% - ККД вироблення теплової енергії). З цієї причини застосування когенераційних установок є раціональним і економічно виправданим. Також варто зазначити, що когенераційні установки мають дуже широкий діапазон одиничної електричної потужності - від 50 кВт до

2 МВт. Така універсальність дає технічну можливість застосування когенераційних установок як для невеликих фірм і фермерських господарств, так і для великих компаній.

Устаткування підбирається так само, як і стандартні електрогенератори.

Рациональний вибір заснований на сумарній потужності всього обладнання та електроприладів, що працюють в технологічних лініях, плюс 20% резерву. Залежно від потужності варіюється кількість тепла, що виробляється системою.

*Принцип роботи когенераційної установки.* Газоподібне паливо (біогаз)

надходить на газопоршневий двигун для подальшого згорання та приведення в рух поршневої групи (рис.2.2).

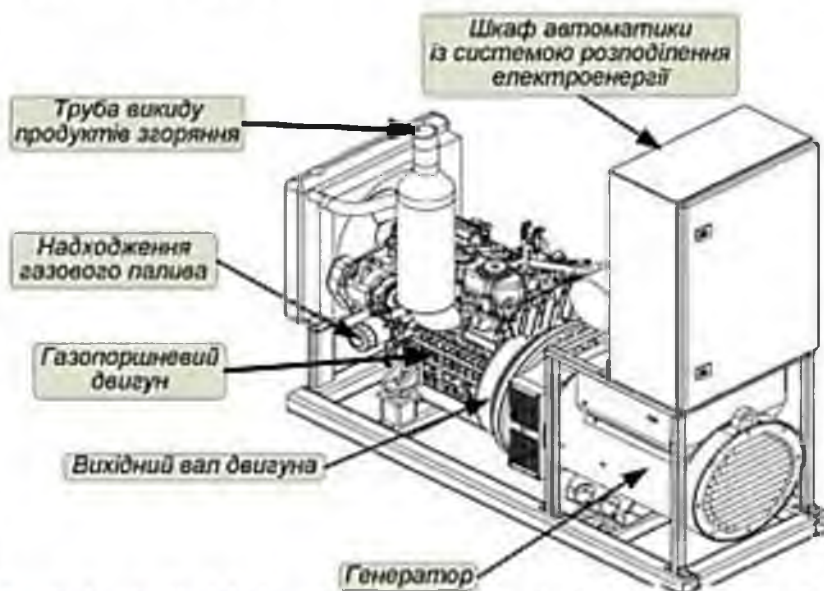


Рис.2.2. Когенераційна установка

Ця механічна енергія передається через вал до генератора, який у свою чергу виробляє електроенергію. При виробленні електричної енергії в

когенераційній установці паралельно виділяється тепло – це тепло від газів, що виходять, масла та антифризу, які охолоджують двигун. Тепло відводиться за допомогою комплексу теплообмінників для підігрівання мережевої води та утилізатора вихлопних газів для підігрівання мережевої води або виробництва пару. При цьому в середньому на 100 кВт електричній потужності споживач отримує 150-160 кВт теплової енергії у вигляді гарячої води (90°C-115°C) для опалювання і гарячого водопостачання. Система теплообміну утворена двома взаємно розділеними контурами. У первинному контурі, який заповнений антифризом або хімічно очищеною водою, передається тепло від двигуна і змащувального масла в утилізаторі тепла антифризу і від вихлопних газів в утилізаторі тепла газів. Регулювання теплопродуктивності здійснюється перепуском газу через байпас. Нагрітий теплоносій первинного контура передає тепло в основному теплообміннику мережевій воді. Основних теплообмінників два – один робочий, один резервний, що виключає втрати тепла при виведенні теплообмінника на обслуговування. У разі потреби виробництва електричної енергії і неможливості використати тепло у вторинному контурі, охолодження первинного контура забезпечується примусовим охолодженням. Таким чином, у процесі когенерації тепла енергія використовується максимально ефективно.

Підігрівання для стабільної температури зброджування здійснюється, як правило, прокачуванням нагрітої води через спеціальні теплообмінники, що змонтовані в біогазовій установці. Нагріту воду одержують у котельному агрегаті, використовуючи для його роботи частину виробленого біогазу, витрати якого можуть доходити до 30 – 40% загального виходу.

Дохідна частина економічного аналізу (проекту) складається з: заміщення природного газу біогазом (на підприємстві використовують газ для обігріву, отримання пари, а також гарячої води) продажу електроенергії за «зеленим» тарифом. Сьогодні на птакофермі «ОрільЛідер» річний обсяг продажу електроенергії складає 38400 тис.кВт.год.

Вода, яка використовується для охолодження генератора, може спрямовуватися в теплообмінник і служити джерелом енергії для підігріву матеріалу, що завантажуються. Електрична енергія може використовуватися на власні господарські потреби або продаватися в енергетичну мережу. Один кубічний метр біогазу дозволяє виробляти:

- 2 кВт.год. електричної енергії (при коефіцієнті корисної дії системи 30%);
- 5 кВт.год. теплової енергії (при коефіцієнті корисної дії системи 70%);
- у комбінованих системах виробництва електричної енергії та теплоти: 2 кВт.год електричної енергії та 6,3 кВт.год теплової.

Саме на прикладі цієї птахоферми ми будемо розглядати проект (рис.2.3) побудови та умови енергозабезпечення системи переробки побічних продуктів птаківництва з використанням системи накопичення енергії маховика (FESS).

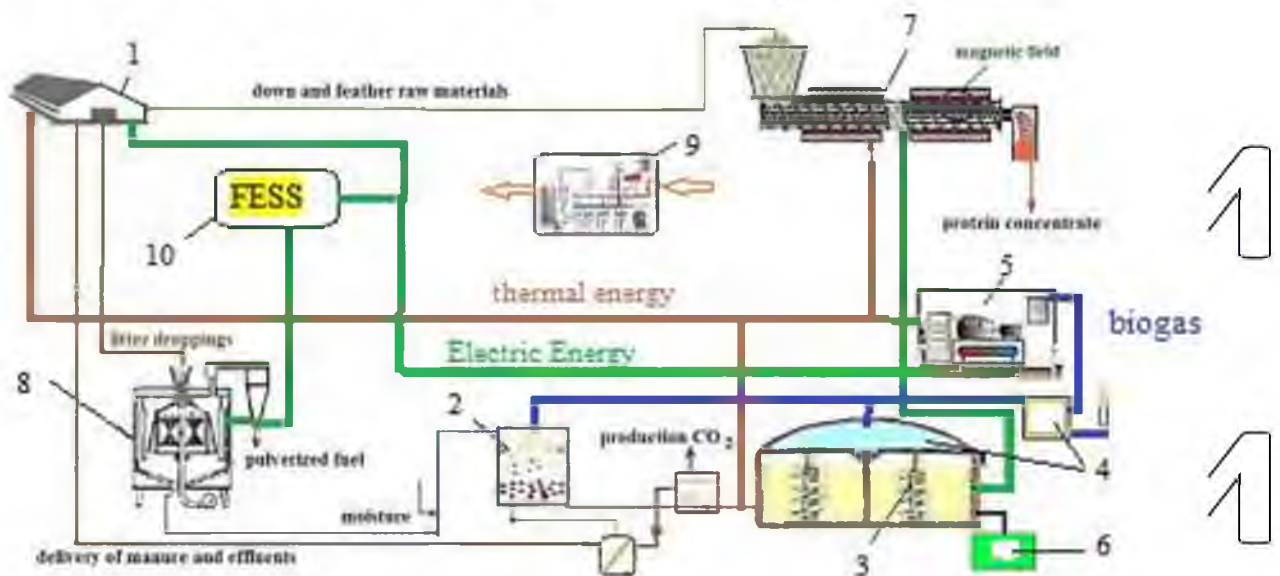


Рис.2.3. Запропонована схема енергозабезпечення в системі переробки побічних продуктів птаківництва

Система переробки побічних продуктів птаківництва має такі складові: 1- птахоферма та убійний цех; 2 - біореактор гідролізу; 3 – біореактор метаногенеза; система обігрівання; 3-механічні мішалки; 4- газольдер і система очищення біогазу; 5 – блочна когенераційна установка; 6-сепаратор; 7 – технологічна лінія гідротермічної переробки пухо-пір'яного сировини; 8 – технологічна лінія високошвидкісної відцентрової переробки посліду в порошкоподібне і

гранульоване; 9 – пост інтелектуального керування, суміщений з контролером рекуперації енергії; 10 – система накопичення енергії маховика (FESS), загальна схема якої представлена на рис.2.4.

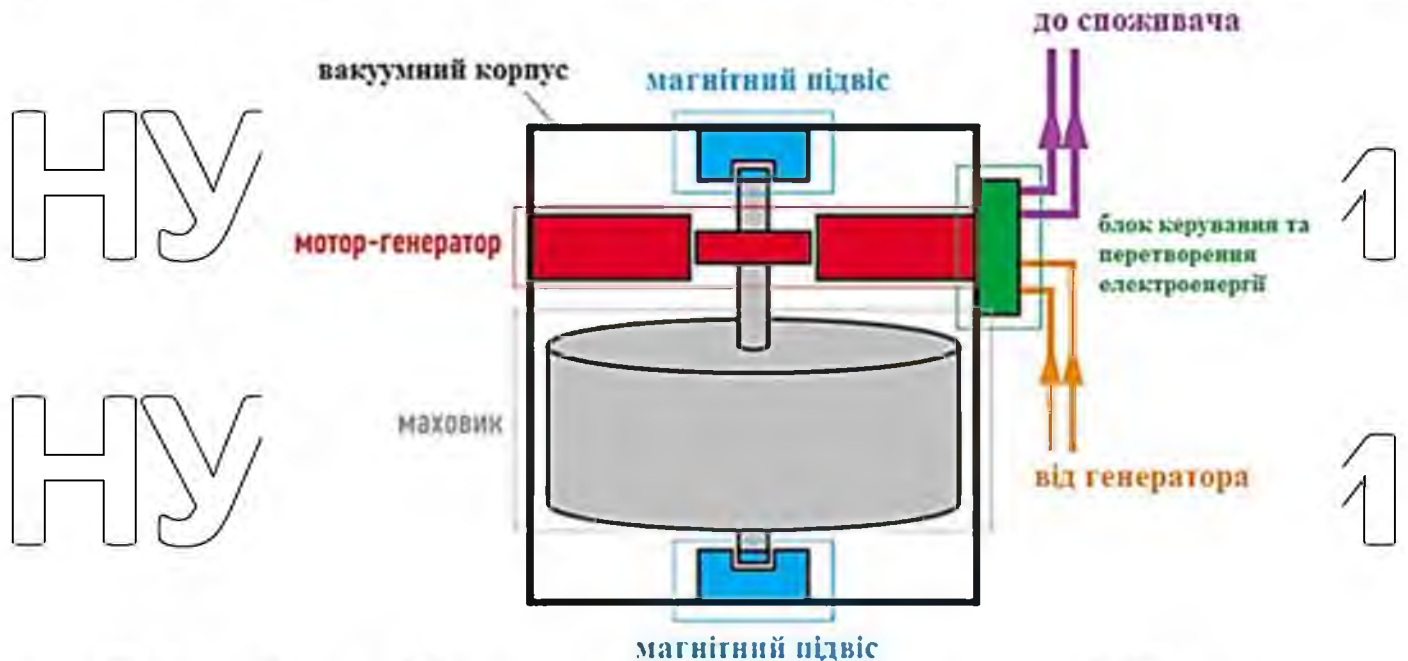


Рис.2.4. Система накопичення енергії маховика (FESS)

Принцип роботи біогазової установки передбачає максимальну автоматизацію та зведення до мінімуму витрат людської праці. Подача сировини в ферментатори (2, 3) відбувається 4-6 разів на добу за допомогою спеціального насоса для рідких і драглистих субстратів. Субстрат постійно переміщується за допомогою низькошвидкісних механічних мішалок, що гарантує повне і дбайливе перемішування. Вивантаження перебродженого субстрату відбувається автоматично з такою ж періодичністю, як і завантаження. Біогаз збирається в газгольдері (4), який використовується в якості газонепроникного покриття ферментатора і виконує функцію акумулювання газу. Зовнішній купол має високу стійкість до ультрафіолету, стійкий до підпалювання і є надзвичайно розтяжним. Схема біогазової установки передбачає високу еластичність цього елемента і надійну фіксацію конструкції. Відведення біогазу відбувається по трубопроводу, який оснащений пристроями автоматичного відведення конденсату і запобіжними пристроями, які захищають газгольдер (4) від перевищення допустимого тиску. З газгольдера (4) йде безперервна подача



біогазу на когенераційну установку або систему очищення біогазу. Перероблений субстрат після установки подається на есепаратор (6). Система механічного поділу працює від 4-6 разів на добу і розділяє залишки бродиння після ферментатора на тверді та рідкі біодобрива. Все обладнання контролюється системою автоматики (9). Технологія отримання біогазу передбачає два режими з організації та контролю роботи систем на ділянках біогазової станції:

– програмно-тимчасове управління технологічними фазами здійснюється по тимчасових інтервалах і синхронізується між системами;

– за значеннями контрольно-вимірювальних приладів. За цим принципом організовані системи автоматичного контролю граничних або аварійних значень технологічних операцій. Сигнали для синхронної роботи всієї установки надходять на центральний програмно-логічний контролер. Контролер проводить опитування всього технологічного ланцюга комплексу і виводить інформацію на екран монітора. На екрані відображені всі споруди та вузли, оснащені приводами і датчиками параметрів. Всі робочі параметри біогазової установки і технологічних ліній відображаються на моніторі центральної диспетчерської.

Концепція гібридної системи енергозабезпечення електротехнологічного комплексу відрізняється встановленням певного балансу і оптимізації енергопотенціалу біомаси побічних продуктів птахівництва для генерації електричної і теплової енергії з енергопотенціалом сировини у поточних режимах її переробки у білковий концентрат, добрива і паливо, умовами консолідації з основними мережами енергопостачання птахофабрики при пікових сезонних навантаженнях.

*Орієнтовні витрати енергії для лінії гідротермічної конверсії пуху-пір'яної сировини у білковий концентрат.* Від однієї куриці можна отримати до 100 г пір'я. Від однієї індички можна одержати до 350 г пір'я. Бройлерна птахофабрика «ОрільЛідер» з лінією забою 9500 голів на годину виробляє 2,5 тисячі тон пера на рік. При продуктивності серійного зразка гідролізера (рис.2.5) для високотемпературної короткочасної обробки 500 кг вологого пера на годину, добова тривалість його роботи складає біля 14 годин (дві робочі зміни).



Рис.2.5. Серійний зразок гідролізера для високотемпературної короткочасної обробки (продуктивність 500 кг вологого пера на годину або 250 кг сухого пера на годину)

Наявність в установці 4-х секцій дозволяє розділити функції, спростити конструкцію та технології виготовлення. 1-а секція - захоплюючий бункер зі шнеками, що здійснює попереднє подрібнення з попереднім нагріванням не більше 60-120°C. 2-а секція - подальше нагрівання, ущільнення до отримання надійної пробки і ретельніше подрібнення пера. 3-я - подрібнення пера, його подальший нагрівання температура 180-200°C, тиск від 0.5 МПа до 15.0 МПа, 4-а секція витримує заданої тривалості високотемпературного водного гідролізу протягом 90-270 с при тиску 5-15 МПа та температурі 18-250°C.

Без використання нагрівання сировини потужність подрібнення становила 120 кВт. При встановленні обігрівальних сорочок робочої зони та нагріванні сировини до температури 120°C процес подрібнення протікає при споживаній потужності 5 кВт, а при нагріванні сировини до температури 210°C споживана потужність двигуна зменшується в 18-20 разів. Оскільки процес переробки пір'я в гідролізері відбувається при постійному поповненні сировини, то середня споживана потужність електропривода буде формуватись умовами обробки по кожній з 4-х секцій гідролізера і становитиме загалом 80 кВт. Відповідно, споживання на рік 400000 кВт \* год електроенергії та 4650 Гкал/рік теплової енергії (1 Гкал = 1.163 кВт\*час).

Орієнтовні витрати енергії в технологічній лінії високошвидкісної відцентрової переробки посліду в порошкоподібне і гранульоване паливо. Впроваджується устаткування для переробки посліду з удосконаленою конструкцією високошвидкісної центрифуги-млина для переробки пташиного посліду у паливо, принципова схема якого була представлена у 2 розділі, рис.2.6.

Вихідною сировиною може бути як підстільковий, так і безпідстільковий послід або їх суміш. При продуктивності лінії 8 т/год, споживаній електричній потужності 250 кВт і однозмінній роботі (7 годин), необхідна кількість сировини складає 50 т/добу. Річне споживання електричної енергії – 638750 кВт \* год.

Опитується птахофабрика енергією, яку виробляє біогазовий комплекс.

Вироблена за рік електрична енергія 38400000 кВт \* год за нашим проектом частково використовується на власні потреби, а саме:

- витрати енергії в технологічній лінії високошвидкісної відцентрової переробки посліду в порошкоподібне і гранульоване паливо – 1077500 кВт \* год.;

- витрати енергії для лінії гідротермічної конверсії пуху-пір'яної сировини у білковий концентрат – 1000000 кВт \* год.;

- витрати енергії на освітлення, роботу допоміжних механізмів (мішалок, насосів, конвейерів), аварійного обладнання, акумуляцію електричної енергії – 485000 кВт \* год.

Решту електричної енергії (біля 35837500 кВт \* год.) підприємство може продавати державі за зеленим тарифом.

Генерація електроенергії з поновлюваних джерел енергії, різко зросла в останні кілька десятиліть, і одна з найважливіших проблем такої енергетики є сталість доступності енергії, тому енергосистеми поновлюваних джерел повинні бути з'єднані з системами зберігання енергії, які зможуть накопичувати її коли існує надлишок і віддавати в період відсутності. Крім того, за рахунок збереження енергії, досягається стійка рівновага між попитом і пропозицією, а відтак віддача електричної потужності може бути стабільною і керуватися більш ефективно. Одним з методів системи зберігання для електричної енергії є перетворення в механічну енергію, яка поділяється в основному на дві частини.

кінетичну і потенційну. Саме за законом збереження цих енергій і працюють системи акумулювання. Досягнення науки в галузі енергетичної електроніки, створення магнітних підшипників та композитних матеріалів дають основу для створення систем накопичення енергії маховика постійної ємності, які можна використовувати як заміну або доповнення до батарей в системах безперебійного живлення (СБЖ). Хоча виготовлення в цілому дорожче, ніж акумулятори з точки зору першої вартості, але набагато довший термін експлуатації з гарантованим зносом протягом 25 років, простіше обслуговування та екологічність є великими перевагами. Отже, вимоги до систем зберігання енергії можна підсумувати в необхідності гнучкого і безперервного постачання споживачів енергією без збоїв (таких, як просідання напруги, яке відбувається через перевантаження і може тривати протягом декількох мілісекунд і більше), швидкій реакції на споживану потужність, надійність конструкції та високий запас напрацювання «на відмову».

В результаті, система накопичення енергії дозволяє використовувати більшу генеровану потужність від поновлюваних джерел енергії з високою надійністю і гнучкістю.

Маховики можуть стати відмінним доповненням до систем, що виробляють енергію, тому що енергію можна легко вводити та виводити залежно від того, скільки енергії вироблено в певний час. Маховики також можуть використовуватися для багатьох проєктів різного масштабу, але реалізуються лише в тому випадку, якщо буде визнано, що це економічно доцільно для всієї системи. Використовувані FESS мають вражаюче високі ККД – 95% [18].

## 2.2 Вибір конструкції та режимів роботи системи «високошвидкісний електричний двигун – супермаховик»

Загалом, під накопичувачем енергії приймають пристрій, здатний накопичувати в собі енергію будь-якого типу на протязі часу заряду  $t_z$ , і після цього передавати значну частину цієї енергії навантажені на протязі часу розряду  $t_r$ . Взаємозалежність параметрів накопичувача при заряді і розряді визначається законом збереження енергії, що відповідає вираженню

$$P_3 \cdot t_3 \cdot \eta = P_p \cdot t_p \quad (2.1)$$

де  $P_3$  і  $P_p$  – середні значення потужностей зарядного і розрядного процесів;  
 $\eta$  – ККД накопичувача.

Значення  $t_3$  і  $t_p$ , а також енергетичні показники при заряді і розряді можуть сильно відрізнятися. Відповідно існує декілька основних напрямків використання накопичувачів:

1. Акумуляція надлишкової енергії в енергосистемі і подальше використання накопиченої енергії в періоди інтенсивного енергоспоживання;
2. Перетворення енергії з одного виду в інший;
3. Перетворення необхідних показників певного виду енергії.

Для того, щоб накопичувач забезпечував подальше використання енергії, він повинен включати принаймні два блоки:

- пристрій управління (ПУ) потоком енергії, регулює і перетворює енергію одного роду в інший відповідно до закону зміни потужності;

- акумуляційний елемент (АЕ), що безпосередньо запасає і зберігає енергію.

У енергетиці можливе використання таких типів АЕ: маховиків, гравітаційних установок, конденсаторів, хімічних і теплових акумуляторів, соленоїдів, що кріопровідникових і надпровідникових соленоїдів.

Існує два типи ПУ накопичувачів енергії: електричний (керований перетворювач) та електромеханічний (асинхронна машина, машина постійного струму або синхронна машина).

Використання супермаховиків для накопичення енергії вважається перспективним напрямком. Адже, у потрібний час значну частину накопиченої енергії можна отримати як за короткий, так і більш тривалий термін залежно від потреб. Теоретичні розрахунки маховика та дослідження показують, що за кількістю накопиченої енергії на кожен кілограм ваги, тривалістю зберігання енергії, терміном служби, маховики можуть випереджати акумулятори, конденсатори та інші накопичувачі.

Принцип роботи маховичних накопичувачів енергії заснований на поступовому розкручуванні тіла, що обертається за рахунок зовнішньої енергії. Використання маховиків дозволяє поступово накопичувати енергію при розгоні маховика, а потім віддавати її у вигляді електричної чи механічної енергії за короткий чи тривалий час.

Кількість накопиченої енергії в маховику залежить від маси, геометричних розмірів та швидкості обертання. При однаковій масі більше енергії можна накопичити за більшої швидкості. Проте, швидкість обертання обмежується механічною міцністю матеріалу. Наприклад, литі металеві диски або циліндри мають деякі внутрішні неоднорідності і дефекти, які можуть призвести до руйнування маховика і пошкодження предметів, що знаходяться поблизу. Тому були проведені дослідження механічної міцності різних матеріалів.

Основні елементи конструкції супермаховика повинні забезпечувати надійну та тривалу роботу. Для зменшення втрат при великих обертах від тертя маховика та повітря, маховик рекомендовано розміщувати у вакуумній камері. Ця камера має бути достатньо міцною, щоб витримувати атмосферний тиск близько 10 кг на квадратний сантиметр, а також забезпечити надійну фіксацію підшипників та валу маховика. Якщо при аварії не буде руйнувань корпусу, все одно вся накопичена енергія виділиться у вигляді тепла. Для безпеки при випробуваннях герметичну капсулу з маховиком розміщують під землею.

Матеріали виготовлення маховиків для одержання максимального виходу енергії обираються з урахуванням питомої міцності матеріалу. Це межа міцності матеріалу, віднесена до його щільності. Його значення показує, наскільки міцною буде конструкція за заданої маси. Виявилось, що найпоширеніші конструкційні матеріали як сталь, алюміній та інші, поступаються легким матеріалам за здатністю накопичувати енергію в маховиках.

Значення максимального запасу енергії в маховиках, виготовлених з різних матеріалів

Свинець – 0,45 – 0,75 кДж/кг

Мідь – 3 – 5 кДж/кг

Сталь – 30 – 50 кДж/кг

Титан, дюралюміній, магнієві сплави 45 – 75 кДж/кг

3 берези, ялини 150 – 200 кДж/кг

Бамбук 300 – 500 кДж/кг

Сталева стрічка 100 кДж/кг

Сталевий трос 300 – 500 кДж/кг

Литий кварц 1 МДж/кг

Графітне волокно 1 – 1,5 кДж/кг

Волокна скляних кварцових ниток до 5 МДж/кг

Алмазне волокно 15 МДж/кг

Щільно запакований азот 60 МДж/кг

## 2.2.1 Структура та компоненти механічних систем зберігання енергії

Супермаховик як систему зберігання енергії, можна поділити на дві

основні категорії: перша – система маховика низьких швидкостей обертання (менш ніж 10000 обертів на хвилину), яка складається з сталевого ротора і механічного підшипника. Друга система є системою маховика з високою

швидкістю (до 60000 оборотів в хвилину), і ротор виготовлений з

композиційного матеріалу та використовує магнітні підшипники замість механічних, але в цілому, основні частини системи зберігання є наступними і показані на рис. 2.6



Рис. 2.6 Система накопичення енергії маховика (FESS)

Основні компоненти системи накопичення енергії маховика (FESS)

- електричний двигун-генератор, який працює в якості двигуна при заряджанні і як генератор при розряджанні;

- маховик ротор, який зберігає кінетичну енергію;

- підшипник, (найчастіше магнітний) щоб зменшити втрати на тертя;
- двонаправлений конвертер, що забезпечує передачу електричної потужності в обох напрямках під час зарядки і розрядки;

- вакуумний насос (для створення розрідження в камері обертання).

Маховик (також званий ротором або ободом) є важливою частиною системи накопичення енергії з використанням маховика. Ця частина накопичує більшу частину кінетичної енергії під час роботи. Таким чином, конструкція ротора має вирішальне значення для енергетичної потужності і зазвичай є відправною точкою всього дизайну системи накопичення енергії з використанням маховика.

Наступні рівняння описують енергосміст маховика:

$$\frac{E}{m} = \alpha' \alpha'' \alpha''' K \sigma / \rho$$

$$\frac{E}{v} = \alpha' \alpha'' \alpha''' K \sigma$$

де  $\alpha'$  – коефіцієнт міцності,  $\alpha''$  – коефіцієнт глибини розряду,  $\alpha'''$  – відношення обертової маси до загальної маси системи,  $\sigma$  – міцність матеріалу на розрив,  $K$  – коефіцієнт форми,  $\rho$  – щільність.

Ротор із меншою щільністю та високою міцністю на розрив матиме вищу п'ятому енергію (енергія на масу), тоді як щільність енергії (енергія на об'єм) не залежить від щільності матеріалу. Як правило, ротор тримається на валу, який згодом підтримується підшипниками. Вал також діє як обертова частина двигуна/генератора. Орієнтація вузла ротор-вал може бути горизонтальною або вертикальною. Для виготовлення ротора часто вибирають два види матеріалів: композит і метал.

*Композитний маховик*



Дослідження конструкції композитного маховика були зосереджені насамперед на покращенні його питомої енергії (рис.2.7). Існує прямий зв'язок між співвідношенням міцності і щільності матеріалу та питомою енергією маховика.

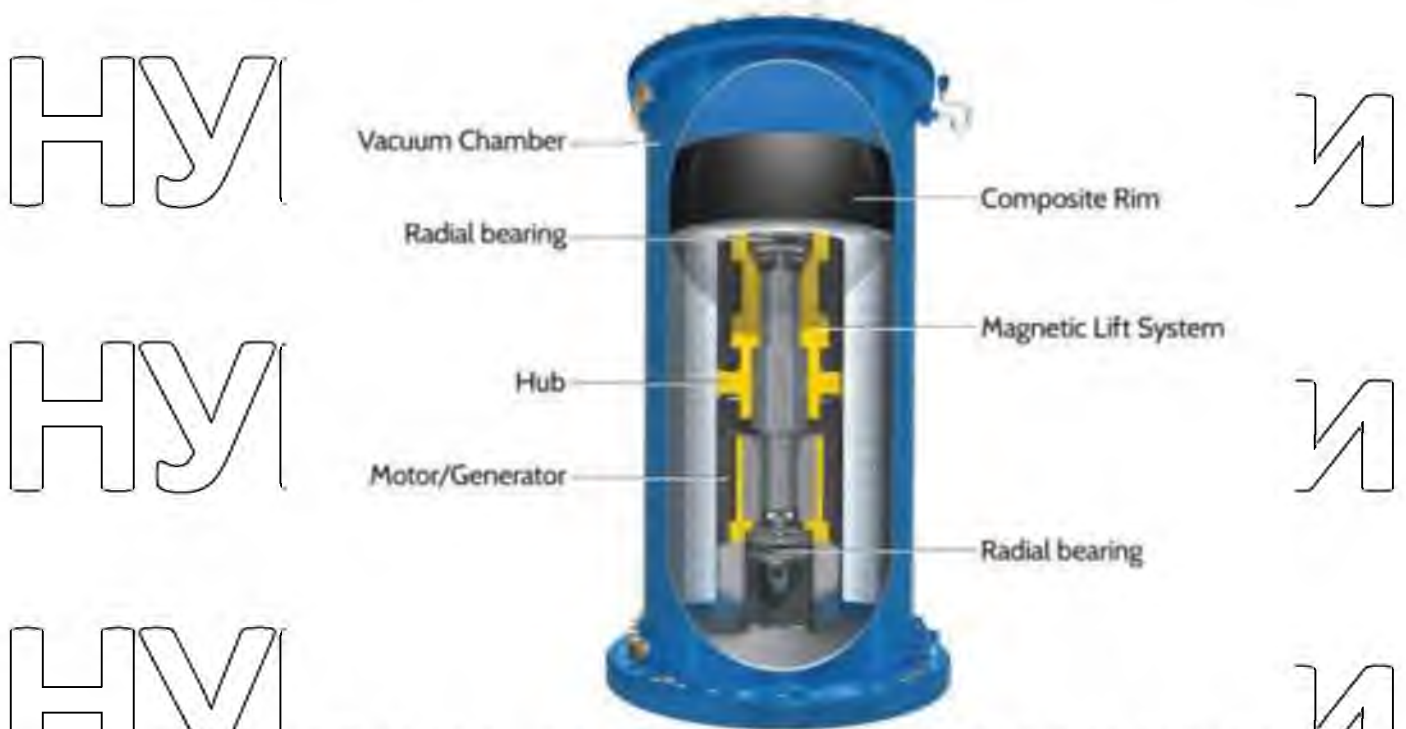


Рис.2.7 Маховик, що містить композитний ротор електричної машини, призначений для регулювання частоти

Композитні матеріали відрізняються низькою щільністю і високою міцністю на розрив. Оскільки вони анізотропні, композиційні матеріали мають вищу поздовжню міцність на розтяг, але набагато меншу радіальну міцність на розтяг, що обмежує їх енергетичну ємність. Термоусадочна установка кількох тонких композитних ободів може усунути цей недолік шляхом зменшення напруги в радіальному напрямку (рис.2.8). Популярним критерієм проектування композитних маховиків є критерій руйнування Цай-Ву. Композитний маховик зазвичай включає кілька різних матеріалів, таких як вуглецеве волокно, скловолокно та епоксидна смола. Процес оптимізації часто виконується, щоб знайти оптимальну конструкцію з урахуванням товщини обода, припусків на усадку та різних комбінацій матеріалів. Хоча композиційні матеріали можуть досягати досить високої питомої енергії (50-100 Вт год/кг), часто потрібен

металевий вал для взаємодії з підшипниками та двигуном/генератором, що призводить до зниження питомої енергії в цілому. При розгляді всього маховика один із складених прототипів досяг 11,7 Вт·год/кг

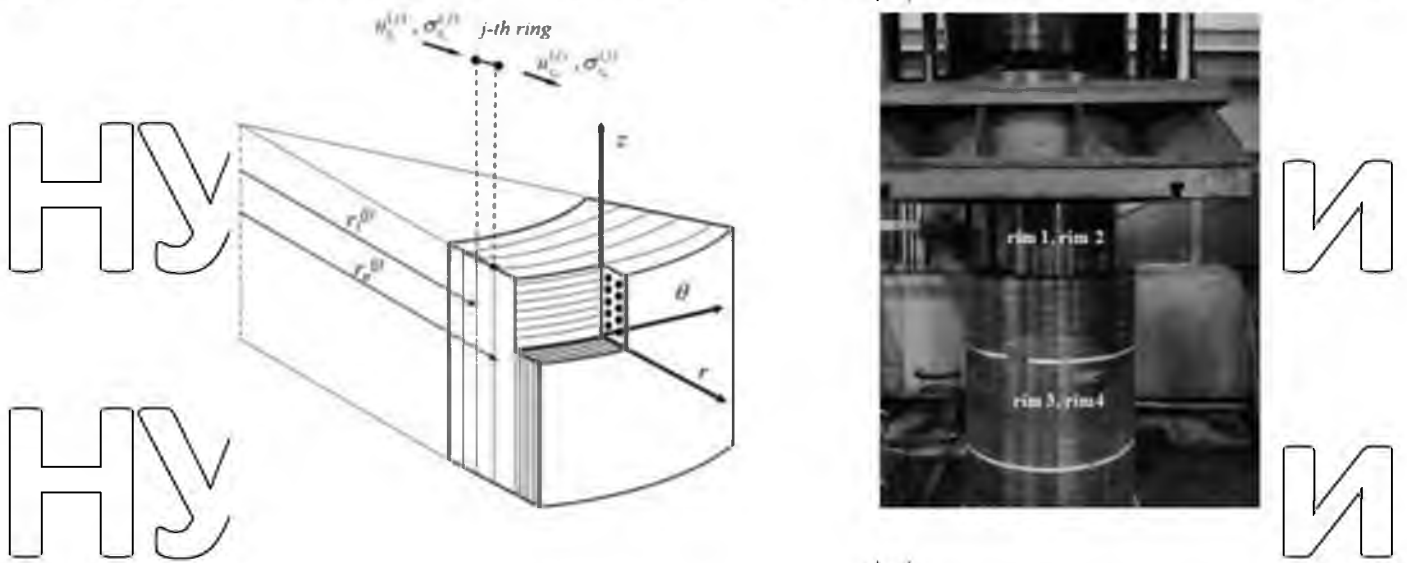


Рис. 2.8 - Композитний маховик із кількома ободами та процес усадки

*Сталевий маховик*

Історично сталевий маховик вважався «низькошвидкісною» та «старою» технологією, пов'язанню з механічними підшипниками з високими втратами (рис.2.9).



Рис.2.9. Сталевий маховик

Існує менше досліджень у конструкції сталевого/ізотропног маховика. Ці роботи спрямовані на покращення питомої енергії та щільності енергії шляхом

пошуку оптимального геометричного профілю або використання нової конфігурації. Останнім часом сталеві маховики повертають інтерес завдяки їхнім перевагам, таким як низька вартість, легкість виготовлення та краща можливість переробки.

#### *Види експлуатаційних підшипників*

Робочі підшипники — це набір підшипників, які підтримують ротор, коли він працює в нормальному режимі. Однією з особливостей сучасної системи накопичення енергії з використанням маховика є використання магнітних підшипників (МП). МП дозволяють ротору обертатися без фізичного контакту з будь-якими компонентами, щоб усунути втрати на тертя, які неминучі для механічних підшипників. Для механічних підшипників, таких як кулькові, втрати потужності приблизно пропорційні швидкості обертання ротора. Це запобігає системі накопичення енергії з використанням маховика працювати на вищій швидкості.

Підшипники з рідинною плівкою можуть мати меншу потужність втрати, але вони потребують додаткової системи змащування, що робить їх непридатними для вакуумних систем накопичення енергії. Короткий перелік різних технологій підшипників систем накопичення енергії з використанням маховика. Зауважте, що гомоплярні активні магнітні підшипники у таблиці відносяться до зазвичай використовуваних гомоплярних активних магнітних підшипників із зміщенням постійного магніту.

#### *Магнітний підшипник*

Магнітний підшипник системи накопичення енергії з використанням маховика може бути активним або пасивним. Активний магнітний підшипник потребує силової електроніки та контролера зворотного зв'язку. Він може бути гомоплярним, що означає, що він має постійні магніти (або струм зміщення), щоб забезпечити потік зміщення, або гетероплярним, який не включає потоки зміщення. Багато комерційних магнітних підшипників є гетероплярними активними магнітними підшипниками через нижчу вартість. Алгоритми керування використовуються для вирішення таких проблем, як зв'язки систем,

гіроскопічні ефекти та синхронні вібрації. Пасивні магнітні підшипники не вимагають управління зі зворотним зв'язком, але мають більш складну конструкцію, ніж активні магнітні підшипники. Надпровідні магнітні підшипники також широко вивчаються для накопичення енергії маховика для їх чудових характеристик. Однак більшість конструкцій складні і потребують криогенного обладнання.

#### Гібридний підшипник

Механічні підшипники, такі як шарикопідшипники, рідко використовуються лише для опори маховика. Однак вони використовуються як частина гібридної підшипникової системи разом із магнітними підшипниками. Інша типова гібридна система підшипників поєднує в собі пасивний і активний магнітні підшипники.

Виходячи з попередніх розрахунків електричної енергії на власні потреби в системі переробки побічних продуктів птахівництва надалі досліджимо FESS, в якому передбачено використання з композитного матеріалу ротора маховика та гібридних підшипників.

Типове щоденне побутове споживання електроенергії в системі переробки побічних продуктів птахівництва наведено на рис.2.10,а. У нашому випадку максимальна потужність  $P_{dmax} = 2925$  кВт, а середньодобова потужність дорівнює  $\langle P_a \rangle = 83$  кВт. Еволюція споживання енергії зображена на рис.2.10,б, де показано, що щоденне енергоспоживання близько  $1900$  кВт\*год.

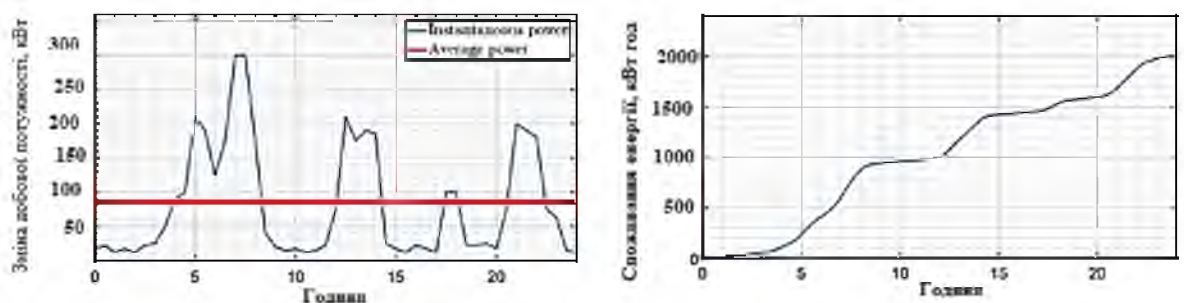


Рис. 2.10. Типова добова потужність та споживання електроенергії: (а) зміна добової потужності; (б) еволюція споживання енергії

Для плавного споживання електроенергії (обмежити потужність мережі до середньої потужності споживача) може бути реалізована система зберігання на основі маховика, як показано на рис. 2.11. Вона складається з обертової маси, що приводиться в рух електричною машиною (MPSM, IM тощо). Введення електричної енергії викликає обертання циліндричної маси на високих швидкостях (2000–16000 об/хв). Потім енергія зберігається в маховику як кінетична. Її можна миттєво відновити, використовуючи електричну машину як електрогенератор, що призводить до зниження швидкості обертання маховика.

У якості мережі може бути вибрано вихід електричної енергії з когенераційної установки.

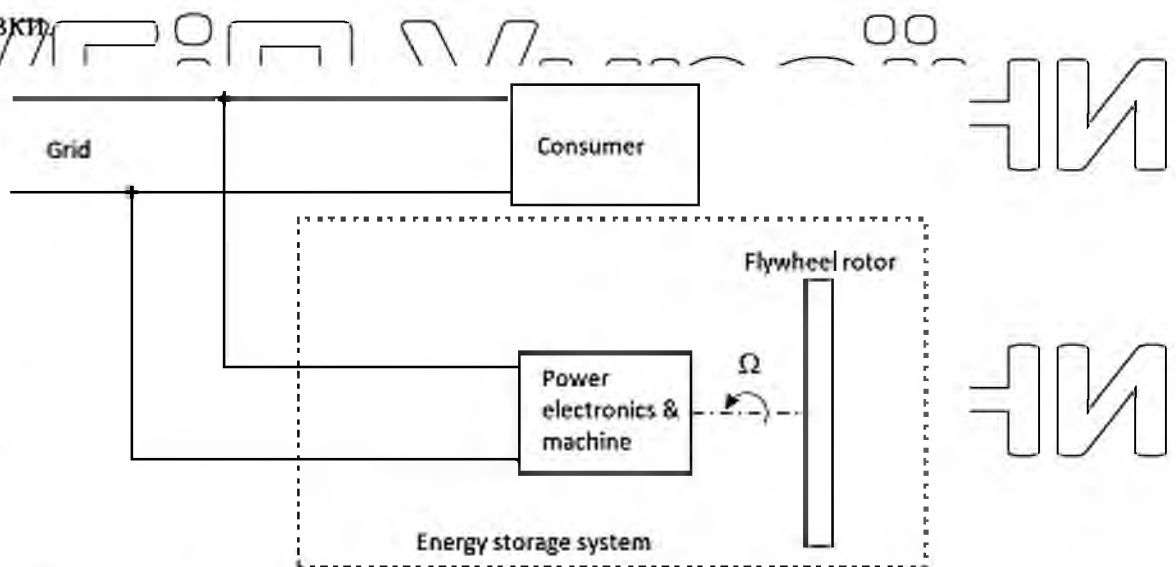


Рис. 2.11 Система зберігання енергії на основі маховика

За умов, показаних рис. 4.6, зміни потужності та енергії системи зберігання енергії наведені на рис. 2.12. Для постійної подачі електроенергії, щоб обмежити струми, що протікають в обмотки статора машини, мінімальна швидкість обертання фіксується на рівні 50% від максимальної швидкості, тобто  $\Omega_{\min} = 50\% \Omega_{\max}$ , що означає, що мінімальна енергія маховика дорівнює 25% від максимальної енергії, тобто  $W_{\min} = 25\% W_{\max}$ . Щоб виконати це обмеження і задовольнити навантаження в будь-який момент, маховик спочатку повинен бути заряджений енергією  $W_{s0} = 368 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ .

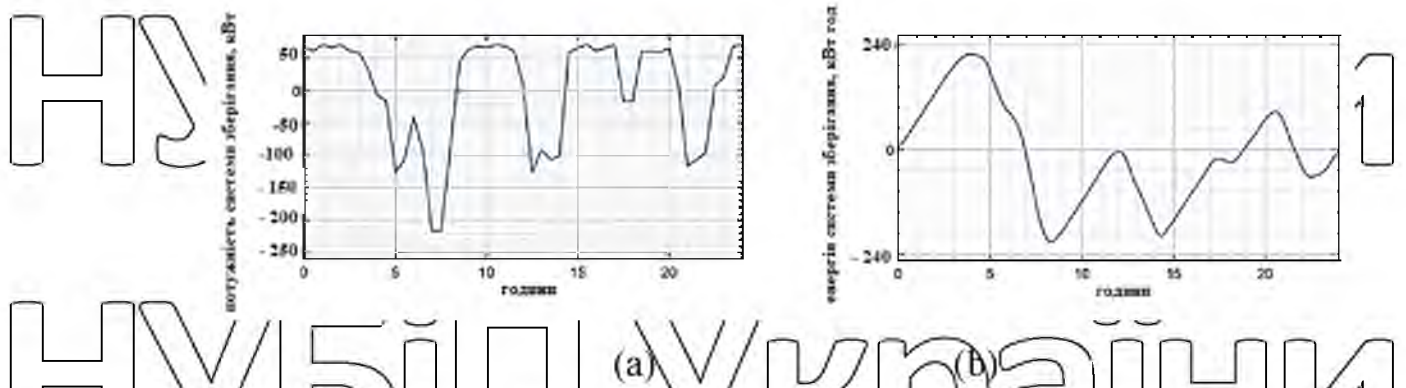


Рис. 2.12. Ділова потужність маховика та еволюція енергії: (а) – потужність системи зберігання; (б) – енергія системи зберігання

Енергія, яка надається в систему зберігання, і відповідні зміни швидкості обертання маховика, показані на рис. 2.13.

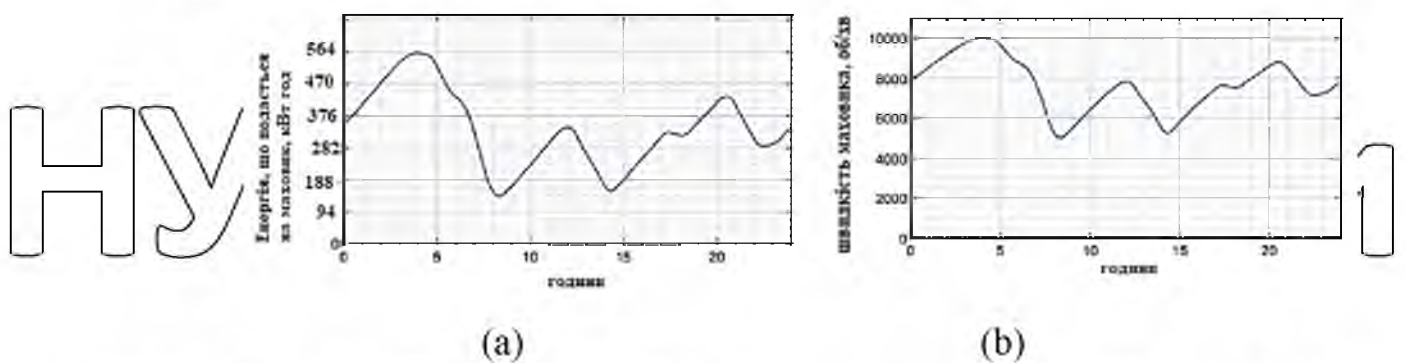


Рис. 2.13. Енергія та швидкість обертання маховика: (а) – енергія, що подається на маховик; (б) – зміни швидкості обертання маховика

З причин механічних обмежень швидкість обертання, як правило, обмежена  $N_{max} = 10\ 000$  об/хв, що дозволяє обчислити момент інерції маси ротора  $J_f$ , щоб мати можливість зберігати  $W_{smax} = 780$  кВт·год, як показано на рис. 2.13 а.

$$J_f = \frac{W_{smax}}{\frac{1}{2}\Omega_{max}^2} = 3900 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (2.2)$$

Припустимо, наприклад, що ротор маховика складається з композитного матеріалу (Kevlar 29 + епскс. зв'язка) радіусом  $r$  і висотою  $h$ . Параметри, що характеризують матеріал:

- Щільність композитного матеріалу :  $\rho = 1,36 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$
- Максимальна периферійна швидкість:  $V_{\text{max}} = 1093 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$

Радіус циліндра  $r$  можна розрахувати на основі максимальної периферійної швидкості наступним чином:

$$r = \frac{V_{\text{max}}}{\Omega_{\text{max}}} = 0,9 \text{ м} \quad (2.3)$$

Для твердої циліндричної маси момент інерції визначається як

$$J_t = \frac{1}{2} m r^2 \Rightarrow m = \frac{J_t}{\frac{1}{2} r^2} = 9,6 \times 10^3 \text{ кг} \quad (2.4)$$

Нарешті, виходячи з щільності композитного матеріалу, висоту циліндра можна розрахувати наступним чином:

$$h = \frac{m}{\rho \pi r^2} = 2,7 \text{ м} \quad (2.5)$$

Система «високошвидкісний електричний двигун – супермаховик» може бути встановлена на магнітних підшипниках і захищена у вакуумі в захисному корпусі, щоб оптимізувати продуктивність пристрою (час обертання) і таким чином збільшити час зберігання. На практиці цей вид системи зберігання має ККД близько 80%.

## РОЗДІЛ 3 ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В СИСТЕМІ «ЕЛЕКТРОДВИГУН-СУПЕРМАХОВИК» В УМОВАХ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИ ПІКОВИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

### 3.1 Загальна характеристика системи

Виходячи з рівнів обсягу максимальної і середньодобової потужностей енергозабезпечення в системі переробки побічних продуктів птахівництва надалі досліджуємо два варіанта: FESS на базі асинхронної машини; FESS на базі машини постійного струму. Також буде виконано аналіз застосування систем лінійного та нелінійного керування FESS.

FESS змодельований як високоінерційний маховик, з'єднаний з обертовою машиною. Оскільки збірка вала і ротора двигуна передбачається жорсткою, тому їх маса агрегується з маховиком. FESS під'єднано до мережі змінного струму через зворотний зв'язок перетворювачів широтно-імпульсної модуляції (ШИМ), що дозволяє вести двонаправлену передачу активної та реактивної потужності з суміжною системою перетворення енергії когенераційної установки. Зміна вихідної потужності отримується модуляцією швидкості FESS.

В роботі пропонується контролер, що за своєю суттю враховує нелінійність машини та уникає повторний процес налаштування. На рис.3.1,а показана загальна схема системи FESS з пов'язаними застосуваннями. Передача електроенергії від когенераційної установки здійснюється по двом каналам: перший канал – нормована потужність до загальної електромережі; другий канал для передачі середньої добової норми електричної потужності до автономної мережі живлення технологічних ліній системи переробки побічних продуктів птахівництва.

На рис. 3.1, б показано топологію управління FESS. У термінології контролю проблему можна описати як проблему відстеження потужності, на яку відхиляється навантаження технологічних ліній  $P_W$  від потрібної середньої добової норми електричної потужності  $P_d$ . При цьому динаміка перетворювача не включається в таку динамічну модель.



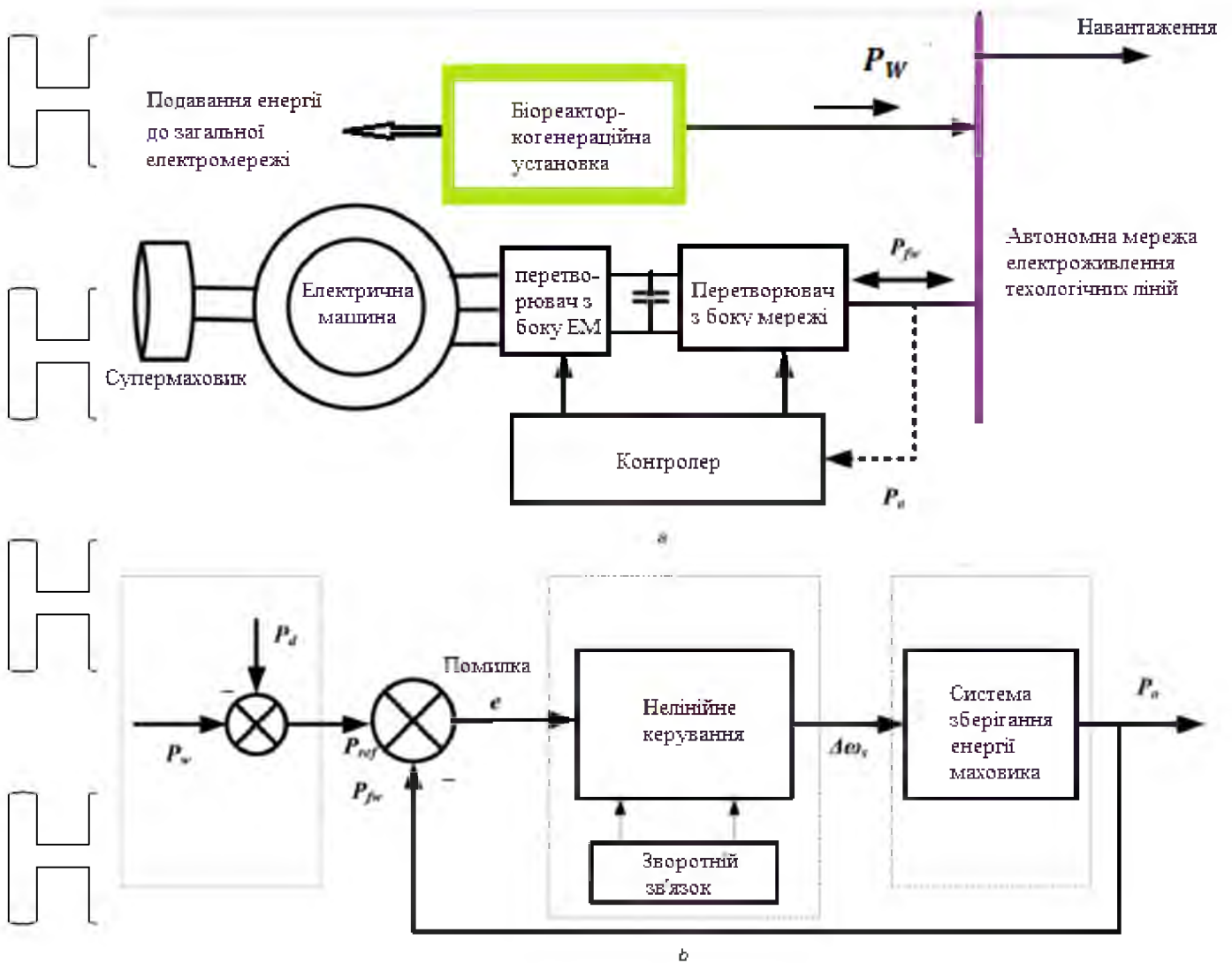


Рис. 3.1 FESS: а) Застосування до енергосистеми, б) Топологія управління

FESS при підключенні до когенераційної установки

В магістерській роботі при дослідженні електродинамічних режимів для порівняння з нелінійним регулятором використовувався ПІ-регулятор з ручним налаштуванням. Стабільність ПІ-регулятора змінюється з зміною робочої точки, тоді як нелінійний регулятор призначений для асимптотичної стабільності. Ідея роботи полягає у впровадженні контролера живлення, який контролює потужність, що подається в мережу технологічних ліній і не потребує подальшого налаштування, коли воно реалізовано, незалежно від типу та варіації потужності.

Швидкість FESS є показником його стану заряду, при цьому зменшення швидкості вказує на виробництво електроенергії, і навпаки. Нелінійне управління також включає в себе стан швидкості в своїй конструкції таким

чином, що зміна швидкості обмежена в діапазоні заданого режиму. Динамічний відгук FESS залежить від його розміру та потужності, вимірювання потужності та енергії FESS, що впливає на вибір будь-якого накопичувача, що працює спільно з переривчастим навантаженням або джерелом енергії.

Збільшення ємності можливе за допомогою комплексу маховиків, якими також можна керувати індивідуально.

### 3.2 Основні аспекти побудови системи керування FESS з використанням теорії управління Ляпунова

Будь-яка система електроприводу має властиві нелінійності, які зазвичай не враховуються при проектуванні лінійних контролерів. Це створює загрозу стабільності та ефективності машини під час її експлуатації. Більш надійне керування можливе за допомогою нелінійних контролерів, у яких зберігаються необхідні нелінійності для підвищення стабільності при роботі в непередбачених режимах. Дія нелінійного контролера має прямий вплив на асимптотичну стійкість системи, що дозволяє справлятися з збуреннями. Такі системи керування можуть бути застосовані для відстеження змінного в часі навантаження або підтримки системи по певній траєкторії. В нашому випадку розглядається проблема відстеження. Теорія управління Ляпунова знайшла широке застосування в управлінні нелінійними електричними машинами. Загалом, якщо стаціонарний стан помилки між траєкторією системи та бажаним рішенням має тенденцію зниження до нуля при  $t \rightarrow \infty$ , система називається асимптотично стійкою.

Концепція стійкості Ляпунова базується на енергетичному вмісті системи і передбачає, що рух системи є стійким, якщо вона постійно втрачає енергію, щоб установитися в точку рівноваги. В конструкції регулятора Ляпунова, енергетична функція, яка називається керуючою функцією Ляпунова, складається з системи станів і дозволяє безпосередньо спостерігати асимптотичну стабільність системи. Для асимптотичної стійкості функція Ляпунова повинна бути додатно визначеною, а її похідна при розв'язку від'ємно визначеною. Чим більше негативність похідної функції, тим швидше

система встановлюється до остаточної рівноваги.

Вибір цієї керуючої функції Ляпунова часто буває експадним і не впливає з особливостей шаблон, але зазвичай пов'язаний з заданими зусиллями контролю. Більше зусилля управління, необхідне для швидшої конвергенції системи, може перетворитися на системи, які практично важко досягти, і спричинити скасування корисних нелінійностей, що призводить до ненадійності. Динаміка замкнутого контуру нелінійної системи з законом керування  $u$  і заданий наступними рівняннями:

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (3.1)$$

$$u = g(x, t) \quad (3.2)$$

де  $f$  і  $x$  є  $n$ -вимірним вектором нелінійної функції та вектором стану відповідно.

Стійкість по Ляпунову для розглянутої вище системи забезпечується, якщо траєкторія системи в певному стані рівноваги не виходить за межі заданої області притягання кінцевої точки рівноваги [19]. Нестійкість пов'язана зі зростанням механічної енергії, тоді як асимптотична стабільність передбачає розсіювання механічних енергії. Нульова енергія системи відповідає умові, при якій  $x = 0$  і  $\dot{x} = 0$ . Тому траєкторія станів пов'язана з механічною енергією, і розсіювання енергії триває до  $k = 0$ . Обрана таким чином функція повинна мати властивість бути додатною, якщо  $x = 0$  і  $\dot{x} = 0$ , і повинна бути монотонно спадною, коли  $x$  і  $\dot{x}$  змінюються. Для позитивно визначеної функції, яка визначена за нерівністю (3.3), якщо існує негативно визначена похідна, яка задана нерівністю (3.4), тоді функція  $V(x)$  називається функцією Ляпунова для системи:

$$V(x) > 0 \quad (3.3)$$

$$\dot{V}(x) \leq 0 \quad (3.4)$$

Цей метод дає свободу змінювати динаміку системи, а функція використовує властивості системи, якою потрібно керувати. Далі ми застосуємо метод Ляпунова для керування двома конфігураціями маховика та перевіряємо його здатність виконувати команду еталонної потужності.

Цілодобове функціонування біогазових установок супроводжується неперервним виходом біогазу із-за складності визначення точного терміну зміни потоків свіжої та збродженної сировини в умовах недостовірної оцінки зміни температури збродження при вимірюванні, що обумовлено значною тепловою акумулюючою ємністю сусли. Це потребує додаткового обладнання для зберігання збродженого матеріалу та біогазу в умовах відключення когенераційних установок в години найменшого споживання [20]. Приєднання когенераційних установок до електричних мереж здійснюється у відповідності до Правил приєднання когенераційних установок до електричних мереж [21].

При цьому приєднання когенераційної установки означає створення технічної можливості здійснення передачі електричної енергії, виробленої когенераційною установкою, необхідного обсягу за певний проміжок часу з дотриманням її якості та надійності в узгоджену точку приєднання.

### 3.3 Зв'язок FESS і припущення в моделюванні

З'єднання з боку мережі FESS і керування здійснюється за допомогою системи зворотнього перетворення електроенергії, як показано на рис. 3.1а. Контролер з боку мережі підтримує напругу ланцюга постійного струму, тоді як контролер з боку перетворювача машини виконує регулювання потужності FESS.

Перетворювачі є перетворювачами джерел напруги на основі ШІМ із керуванням струмом, які складаються з напівпровідникових перемикачів, таких як біполярні транзистори з ізольованим затвором. Постійні часи електронних компонентів обчислюються в мікросекундах і їх динаміка майже миттєва, якщо порівнювати з динамікою машини. Тому їх можна представити своїм ідеалом/середнім моделі, які є компонентами без втрат з нульовою динамікою. Крім того, перемикання цих біполярних транзисторів із ізольованим затвором може спричинити перемикання гармонік високого порядку, які не впливають на фундаментальні компоненти. У дослідженнях стабільності цікавить динаміка низьких частот, тому замість миттєвих значень можна розглядати середні значення струмів і напруг.

У випадку ідеальних моделей із швидкими контурами керування, як у цьому випадку, напруга ланцюга постійного струму може вважатися постійною, а крутний момент — миттєво доступним. Миттєва потужність на сторонах постійного та змінного струму, визначена добутком сигналів осі  $dq$  та напруги постійного струму, є рівною, а фактичні струми вважаються миттєво рівними їхнім еталонним значенням. Зазвичай величину та фазу напруги можна змінювати за допомогою цих VSC, і тому їх можна моделювати як джерело напруги з величиною та струмом. Розглянуте тут моделювання IM є моделлю третього порядку, у якій знехтовано перехідними процесами статора. Це автоматично означає, що змінні статора змінюються миттєво. При достатньо великій інерції, великих взаємних індуктивностях і малому опорі статора це припущення не впливає на електромеханічну динаміку системи. Це означає, що нехтування динамікою перетворювача не створить істотного впливу на продуктивність системи.

Електротехнічною частиною проекту передбачено підключення комплексу до електричних мереж району для видачі та прийому електроенергії в енергетичну систему. Вироблена потужність напругою 10 кВ передається повітряною лінією з трансформаторної підстанції 10 кВ на загальну електричну мережу району ЛЕП 10 кВ, яка знаходиться поруч. До трансформаторної підстанції комплексу приєднуються трансформатори власних потреб та лінії зв'язку з енергосистемою, а також приєднуються 4 газопоршневі когенераційні установки потужністю по 1,2 МВт. Для забезпечення електроенергією споживачів власних потреб газопоршневої електростанції проектом передбачено будівництво трансформаторної підстанції з установкою трансформатора потужністю 600 кВА.

### 3.4 Нелінійне керування маховиком на основі машини постійного струму

Отже, розглядається топологія нелінійного керування, застосована до машини постійного струму. Знання параметрів машини вважалось абсолютним.

тобто передбачається повний зворотний зв'язок стану. Тут розглядається машина з керуванням напругою якоря, де збудження поля підтримується постійним, а магнітне насичення нехтується. Нелінійність керування виникає через добуток двох станів, швидкості та крутного моменту. Оскільки струм поля постійний, регулювання швидкості залежить тільки від струму якоря. Зміна швидкості відбувається шляхом зміни прикладеної напруги, керуючої змінної.

*Модель машини постійного струму*

Крутний момент машини постійного струму  $\tau_m$  пов'язаний з потоком повітряного зазору,  $\phi$ , і струмом якоря,  $I_a$ , як

$$\tau_m(t) = k_i \phi I_a(t) \quad (3.6)$$

де  $k_i$  є константою пропорційності.

Для постійного струму поля, як і в машині постійного струму з постійним магнітом, постійний потік (3.6) може бути написано як

$$\tau_m(t) = k_m I_a(t) \quad (3.7)$$

де постійний момент двигуна  $k_m$  (вольт/(рад/с)) є

$$k_m = k_i \phi \quad (3.8)$$

Моделювання диференціальних рівнянь постійного струму, керованого якорем машина, в режимі руху, включає електромеханіку рівняння струму і швидкості якоря з постійним потоком [22]

$$\frac{dI_a(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} (E_A(t) - R_a I_a(t) - k_b \omega_m(t)) \quad (3.9)$$

$$\frac{d\omega_m(t)}{dt} = \frac{1}{J_m} (k_m I_a(t) + T_l(t) - B_m \omega_m(t)) \quad (3.10)$$

де  $\omega_m(t)$  – механічна швидкість (рад/с) та  $E_A(t)$  прикладена напруга у вольтах,  $R_a$  і  $L_a$  – опір та індуктивність обмотки якоря відповідно, а  $k_b$  – постійна зворотна е.р.с.

Момент навантаження,  $T_1(t)$ , вважається нулем для FESS.  $B_m$  – це коефіцієнт в'язкого тертя, який тут вважається незначним, а  $J_m$  – інерція FESS. Рівняння (3.9)

можна переписати через крутний момент, помноживши обидві частини на  $k_m$

$$\frac{d\tau_m(t)}{dt} = \frac{1}{L_a}(k_m E_A(t) - R_a \tau_m - k_b k_m \omega_m(t)) \quad (3.11)$$

Рівняння (3.10) і (3.11) складають модель простору станів машини постійного

струму, з матрицею станів  $[\omega_m \quad \tau_m]^T$ . Береться прикладена напруга  $E_A(t)$  як керуючий вхід  $U$ . Відповідне представлення простору станів буде таким

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_m \\ \dot{\tau}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\tau_m}{J_m \omega_m} & 0 \\ -c & -b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_m \\ \tau_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ a \end{bmatrix} U \quad (3.12)$$

де  $a = k_m/L_a$ ,  $b = R_a/L_a$ ,  $c = k_m k_b/L_a$ .

Умова рівноваги для системи виходить шляхом встановлення  $\dot{\omega}_m$  і  $\dot{\tau}_m$  до нуля. Розв'язуючи  $\omega_m$  і  $\tau_m$ , отримуємо рівновагу стан як  $[aU/c, 0]$ . З аналізу видно, що система досягає умови рівноваги за постійним значень вихідної потужності. Вихідна потужність машини постійного струму визначається таким нелінійним рівнянням

$$P_o = \omega_m \tau_m \quad (3.13)$$

Інтегральне керування було реалізовано, як у наступному рівнянні, де контролер налаштований на підсилення регулятора  $T$  таким чином, щоб зусилля керування було мінімальним, а вихідна потужність машини відповідала необхідному посиленню:

$$U = - \frac{(P_{\text{eref}} - P_0)}{T} \quad (3.14)$$

Результати моделювання, показані далі в розділі, підтверджують нездатність вбудованого контролера забезпечити належне відстеження, що призвело до розробки нелінійного рівняння керування.

*Нелінійне керування маховиком з постійною потужністю струму*

Мета проектування нелінійного контролера полягає в тому, щоб вихідний сигнал  $P_0$  відстежував бажану еталонну потужність  $P_{\text{eref}}$  як у режимі двигуна, так і в режимі генерації. Спочатку визначається помилка відстеження  $e$  і далі отримуємо її похідну:

$$\dot{e} = P_{\text{eref}} - P_0 \quad (3.15)$$

$$\dot{e} = P_{\text{eref}} - P_0 \quad (3.16)$$

$$\dot{e} = (P_{\text{eref}} - (\omega_m \dot{\tau}_m + \tau_m \dot{\omega}_m)) \quad (3.17)$$

Щоб довести збіжність динаміки похибки до нуля, обрано квадратичну функцію Ляпунова, яка забезпечує стійкість системи, як

$$V = \frac{1}{2} e^2 \quad (3.18)$$

Щоб система була глобально стійкою, похідна функції Ляпунова повинна бути рівномірно негативно визначеною. Похідна від функції Ляпунова є

$$\dot{V} = e \dot{e} \quad (3.19)$$

і щоб забезпечити її негативну визначеність, похідну модифікують за рівнянням (3.20), де  $k_1$  є позитивним контрольним параметром

$$\dot{V} = e \dot{e} - k_1 e^2 + k_1 e^2 \quad (3.20)$$

Похідна функції Ляпунова змінюється на такі вирази:



$$\dot{V} = e(\dot{P}_{\text{eref}} - \dot{P}_o) - k_1 e^2 + k_1 e^2 \quad (3.21)$$

$$\dot{V} = e(\dot{P}_{\text{eref}} - (\omega_m \dot{\tau}_m + \tau_m \dot{\omega}_m)) - k_1 e^2 + k_1 e^2 \quad (3.22)$$

Негативна визначеність (3.22) гарантується, якщо

$$(e(\dot{P}_{\text{eref}} - (\omega_m \dot{\tau}_m + \tau_m \dot{\omega}_m)) + k_1 e^2) = 0 \quad (3.24)$$

що призводить до

$$\dot{V} = -k_1 e^2 \quad (3.24)$$

Рівняння (3.24) стає можливим шляхом вибору прикладеної напруги  $E_A(t)$  такою, щоб вона дорівнювала контрольному входу  $U$ .

$$U = [\dot{P}_{\text{eref}} + k_1 e - \tau_m \left(\frac{\tau_m}{J_m}\right) + b\omega_m \tau_m + c\omega_m^2] / a\omega_m \quad (3.25)$$

Динаміка помилки замкнутого циклу системи керування потім виводиться як

$$\dot{e} = -k_1 e \quad (3.26)$$

Значення  $k_1$  можна вибрати так, щоб значення (3.24) було від'ємним. Це

значення залишається фіксованим незалежно від опорного сигналу та реакції

FESS і є фіксованим для конструкції. Здіждність  $e$  до нуля вказує на здатність машини виконувати задану еталонну команду потужності.

### 3.5 Результати моделювання керування маховиком з використанням машини постійного струму при ступінчастій зміні потужності

Ступінчаста зміна вихідної потужності починається в момент часу 5 с, а потім зменшується до нуля через 10 с. Використовуючи лінійне і інтегральне керування, FESS не в змозі відстежувати призначену еталонну потужність 2

кВт, а також нелінійне керування, як показано на рис. 3.2 а, і вихід системи

встановлюється на значенні, більшому за еталонне. Значення  $k_1$  у нелінійному

управлінні прийнято рівним 1000. Кількісна оцінка точності реакції нелінійного керування порівняно з лінійним керуванням здійснюється за допомогою часу

затримки  $T_d$  і часу наростання  $T_r$  відповіді системи.  $T_d$  і  $T_r$  нелінійної реакції керування менші, ніж у інтегрального керування, показано на рис. 3.2б. Відповідна зміна швидкості машини, вихідного крутного моменту та необхідних керуючих зусиль також наведено на рис. 3.3.

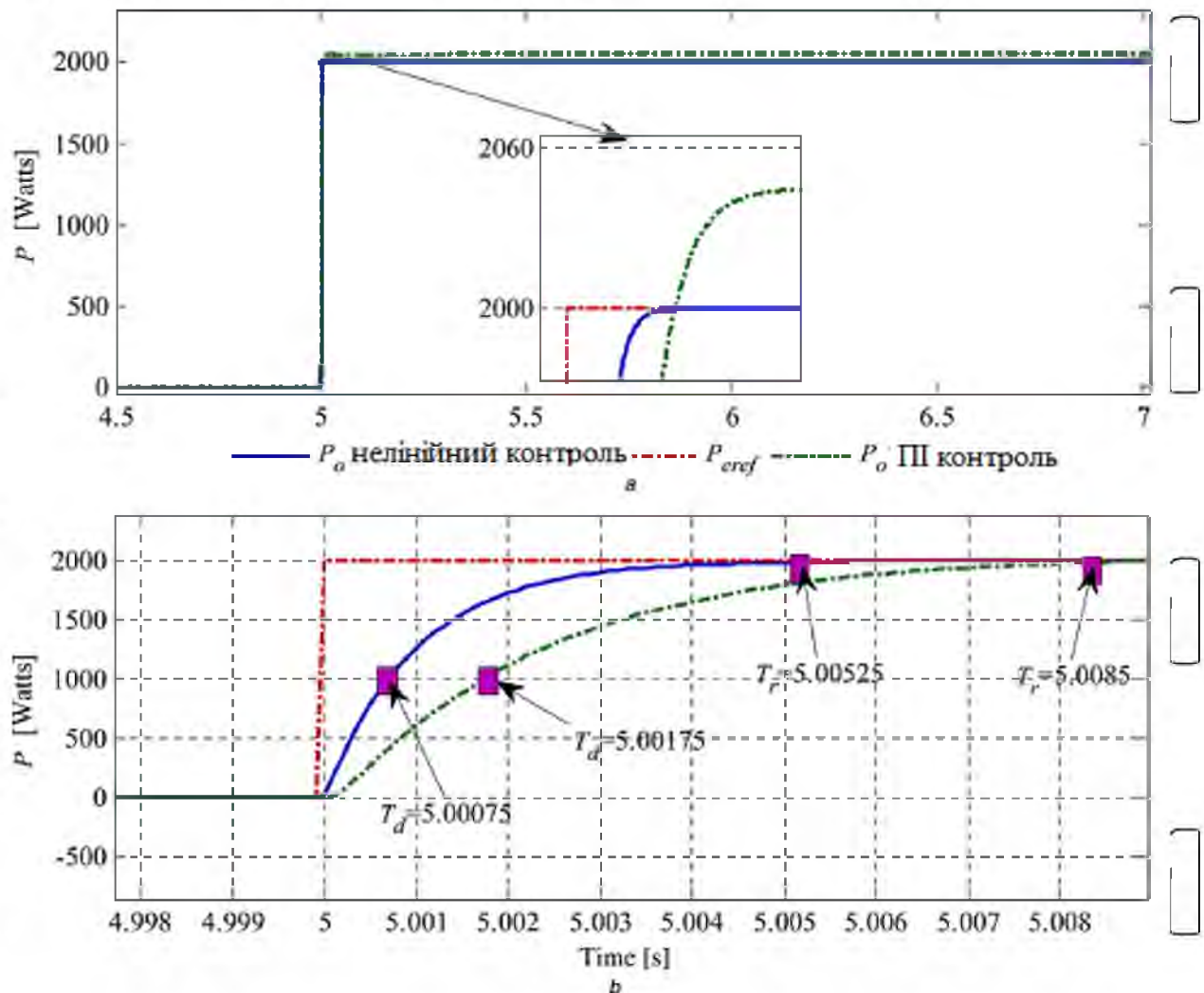


Рис. 3.2. Реакція маховика на базі машини постійного струму на ступінчасту зміну опорної потужності (0–2000В<sup>2</sup>): а) зміна вихідної потужності, б) збільшення зображення в області близько 5 с

Відповідна зміна швидкості машини, вихідного моменту і необхідне керуюче зусилля також наведено на рис.3.3. Керуюче зусилля, яке є прикладеною напругою, мінімально змінюється від свого номінального значення в момент зміни двигуна на генератор і навпаки. Час відлику маховика на таку зміну

знаходиться в діапазоні мс. Характеристики швидкості та крутного моменту машини постійного струму під час ступінчастої зміни опорної потужності показано на рис. 3.3d для різних значень рівнів потужності, починаючи від 2,5 до 4 кВт. У режимі двигуна крутний момент зменшується зі збільшенням швидкості, як показано в квадранті 1 графіка, а під час режиму генерації крутний момент має від'ємний характер, як показано в квадранті 4, оскільки електрична потужність генерується зі зменшенням швидкості.

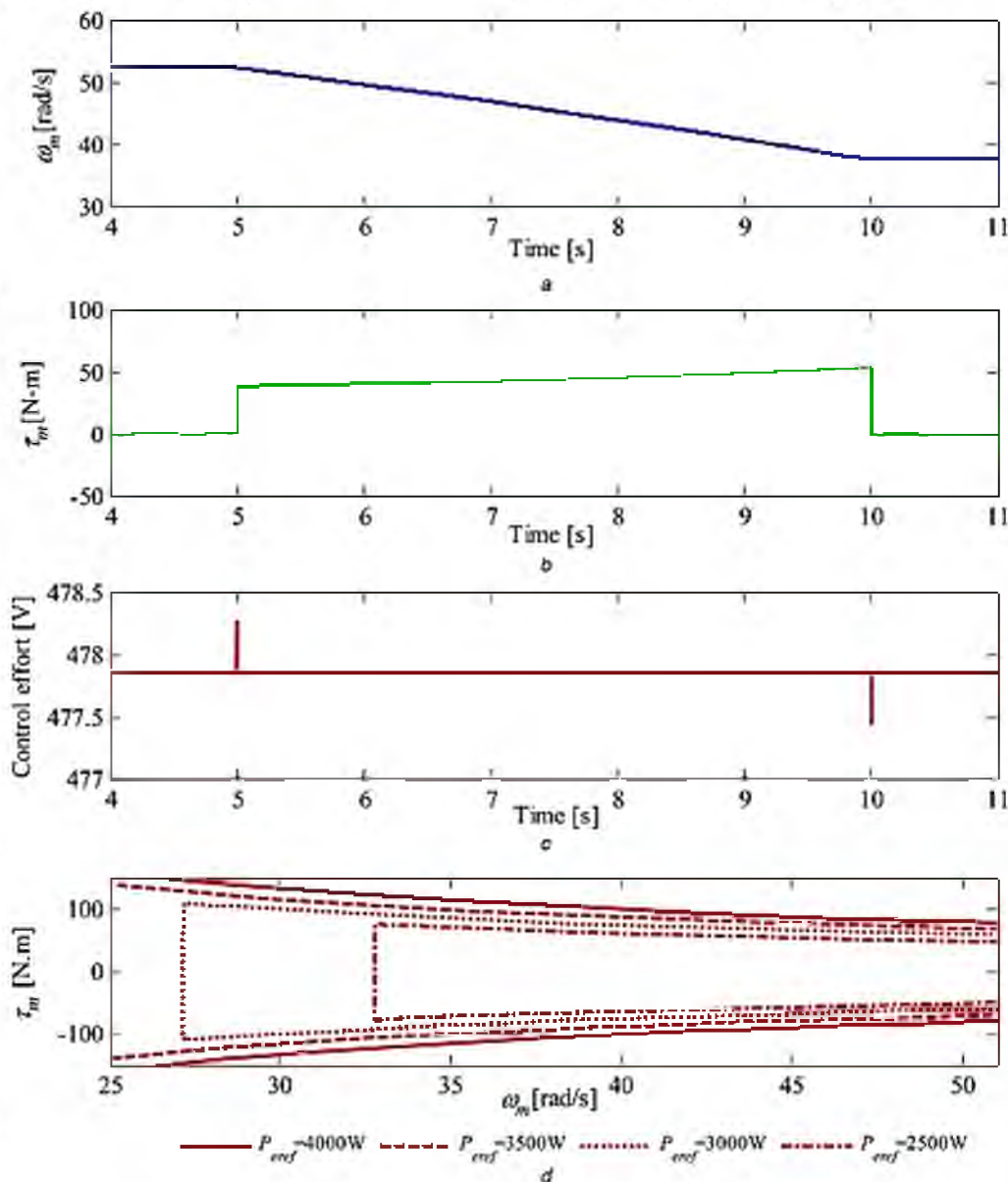


Рис. 3.3. Характеристики маховика на основі машини постійного струму для ступінчастих змін опорної потужності (0 – 2000Вт при 5с і 2000 – 0 Вт при 10 с) з нелінійним керуванням: (а) Швидкість, (б) Крутний момент, (с) Керуюче зусилля, (д) Швидкісно-моментні характеристики при різному опорі потужності

Значення позитивного контрольного параметра  $k_1$ . При виборі значення параметра керування  $k_1$ , як правило, не дотримуються певних правил, вибір є складним і більшою чи меншою мірою залежить від необхідних зусиль керування. У випадку аналізу машини постійного струму зміна  $k_1$  спричиняє зміну відповіді, як показано на рис.3.4. Відповідь на  $k_1$ , що дорівнює 1000, була обрана, оскільки вона давала майже точну відповідь із розумним зусиллям керування.

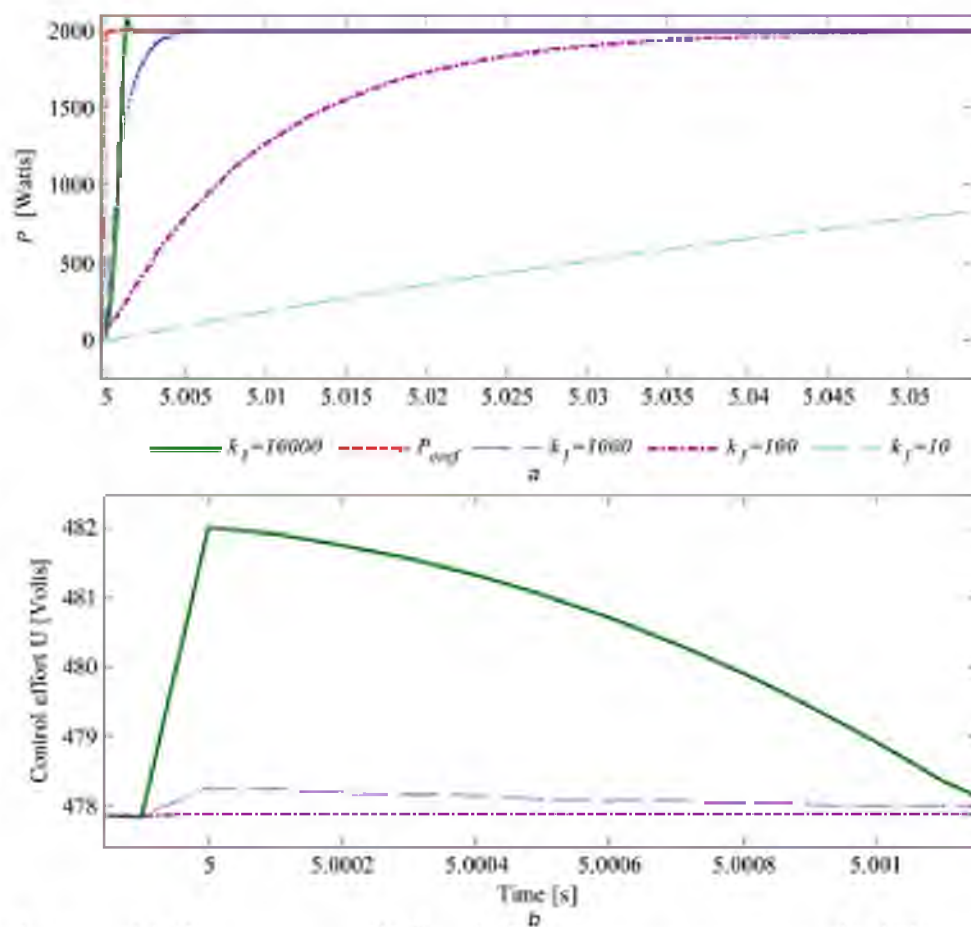


Рис. 3.4. Маховик на основі машини постійного струму. (а) Зміна вихідної потужності з  $k_1$ , (б) Зміна керуючого зусилля з  $k_1$

### 3.6 Контроль потужності індукційної машини

Розглянемо нелінійне ляпуновське керування маховика на основі асинхронної машини на основі. Єдина вимога плавного переходу від двигуна до генерації в цьому варіанті полягає в тому, щоб змусити його обертатися швидше,

ніж його синхронна швидкість. Тут використовується робоча зона ослаблення потоку асинхронної машини. Прийнята стратегія нелінійного керування враховує нелінійність між величинами статора та ротора. Передбачається, що машина працює в нелінійній і ненасиченій магнітній області. Передбачається, що швидкість ротора вимірjana, а струми статора та індукційна ЕРС можуть бути розраховані.

### 3.7 Моделювання трифазного короткозамкненого асинхронного двигуна

Динамічні характеристики трифазного короткозамкненого асинхронного двигуна описуються набором диференціальних рівнянь третього порядку в моделі осі d-q, що обертається в синхронній системі відліку [23]. Стани системи для моделі напруги за перехідним реактивним опором можна представити в просторі станів, як наведено нижче:

$$x = [e_d \quad e_q \quad \omega_r \quad \omega_s]^T \quad (3.27)$$

Диференціальні рівняння для  $e_d$  і  $e_q$ , які є напругою по вісям d-q за перехідним реактивним опором:

$$\frac{de_d}{dt} = -\frac{1}{T_o} [e_d - (X - X')i_{qs}] + s\omega_s e_q \quad (3.28)$$

$$\frac{de_q}{dt} = -\frac{1}{T_o} [e_q + (X - X')i_{ds}] - s\omega_s e_d \quad (3.29)$$

Рівняння механічного гойдання ротора, що пов'язує баланс між розвиненим електромагнітним моментом  $T_e$  та прикладеним механічним моментом  $T_m$  та з припущенням рівним нулю, виглядає так

$$\frac{J\omega_{base}^2}{S_{base}} \frac{d\omega_r}{dt} = -T_e \quad (3.30)$$

де  $\omega_r$  і  $\omega_s$  – частота обертання ротора та синхронна швидкість відповідно.

Керуюча змінна  $U$ , яка є швидкістю зміни синхронної швидкості задана таким чином:

$$\frac{d\omega_s}{dt} = U \quad (3.31)$$

Ковзання  $s$  можна розрахувати за частотою обертання ротора та синхронною швидкістю.  $T_0$  — постійна часу перехідного процесу розімкнутого ланцюга.  $J$  — сумарна інерція машини і маховика в кг м<sup>2</sup>. Реактивний опір холостого ходу  $X$  і перехідний реактивний опір  $X'$  представлені нижче:

$$X = \omega_s L_{ss} \quad (3.32)$$

$$X' = \omega_s L_d' \quad (3.33)$$

де

$$L_{ss} = L_m + L_s \quad (3.34)$$

$$L_{\pi\pi} = L_m + L_r \quad (3.35)$$

$$L_d' = L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{\pi\pi}} \quad (3.36)$$

Рівняння керування  $U$  має бути розроблено таким чином, щоб змусити машину змінювати швидкість у відповідь на задану вихідну потужність. Машина сповільнюється для розряджання та прискорюється для заряджання. Струми статора по осях  $q$  і  $d$   $i_{qs}$  і  $i_{ds}$  записуються через відповідні напруги по осях  $q$  і  $d$  статора:

$$i_{qs} = \frac{1}{r_s^2 + X^2} [(e'_q - v_{qs})r_s - (e'_d - v_{ds})X] \quad (3.37)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{r_s^2 + X^2} [(e'_d - v_{ds})r_s + (e'_q - v_{qs})X] \quad (3.38)$$

Вихідна потужність  $P_0$  машини задана як

$$P_o = v_{qs}i_{qs} + v_{ds}i_{ds} \quad (3.39)$$

### 3.8 Моделювання нелінійного керування асинхронною машиною

Ефективність алгоритму перевірено за допомогою нелінійного

моделювання в часовій області в MATLAB. Інтегральний контролер спочатку був розроблений для FESS на основі асинхронної машини, який керувався різницею між вихідною потужністю  $P_o$  та еталонною потужністю  $P_{eref}$  для

зміни синхронної швидкості машини. Прийняте рівняння керування для

інтегрального регулятора, де диференціальне рівняння для синхронної швидкості тепер буде таким, як у (3.40) з  $T$  як посилення регулятора

$$U = \frac{-(P_{eref} - P_o)}{T} \quad (3.40)$$

Як і у випадку машини постійного струму, значення  $T$  потребує повторного

налаштування. Для нелінійного плану управління Ляпунова помилка відстеження для задачі визначається як

$$e = P_{eref} - P_o \quad (3.41)$$

$$\dot{e} = \dot{P}_{eref} - (\dot{v}_{qs}i_{qs} + v_{qs}\dot{i}_{qs} + \dot{v}_{ds}i_{ds} + v_{ds}\dot{i}_{ds}) \quad (3.42)$$

де  $\dot{e}$  – похідна вихідної потужності  $P_o$ . Для того, щоб динаміка помилки системи була зведена до нуля, для цієї системи вибирається функція Ляпунова:

$$V = \frac{1}{2}e^2 \quad (3.43)$$

Подібно до підрозділу 3.4, член  $k_1 e^2$  додається та віднімається від похідної функції Ляпунова

НУБІ | | УКРАЇНИ

Щоб зменшити складність, рівняння для  $\dot{P}_o$  записується з використанням таких скорочень:

$$\dot{V} = e(\dot{P}_{ref} - \dot{P}_o) + k_1 e^2 - k_1 e^2 \quad (3.44)$$

НУБІ | | УКРАЇНИ

де

$$\dot{P}_o = X_A \dot{e}'_q + Y_A \dot{e}'_d + Z_A \dot{\omega}_s \quad (3.45)$$

$$X_A = \frac{1}{A^2} [Ar_s v_{qs} + AX v_{ds}] \quad (3.46)$$

НУБІ | | УКРАЇНИ

$$Y_A = \frac{1}{A^2} [Ar_s v_{ds} - AX v_{qs}] \quad (3.47)$$

$$Z_A = \frac{v_{qs}}{A^2} [-BD r_s - ACL_d + BDX]$$

НУБІГ | | УКРАЇНИ

При цьому

$$-\frac{v_{ds}}{A^2} [BC r_s - ADL_d + BDX] \quad (3.48)$$

$$A = r_s^2 + X^2; B = 2\omega_s L_d^2; C = (e'_d - v_{ds}) \text{ and } D = (e'_q - v_{qs}).$$

НУБІГ | | УКРАЇНИ

Щоб досягти від'ємної визначеності  $\dot{V}$  у (3.44) та забезпечити (3.49), має бути реалізована рівність (3.50)

$$\dot{V} = -k_1 e^2 \quad (3.49)$$

$$e(\dot{P}_{ref} - \dot{P}_o) + k_1 e^2 = 0 \quad (3.50)$$

НУБІП | | УКРАЇНИ

Рівняння керування, отримане з (3.50), є таким, як наведено далі



$$U = \frac{P_{\text{ref}} + k_1 e - X_A \dot{e}_\varphi - Y_A \ddot{e}_\varphi}{Z_A} \quad (3.51)$$

Контролер у (3.51) під час випробування маховика з великою інерцією на низькій швидкості зміг забезпечувати необхідне значення потужності протягом обмеженого періоду часу, після якого система мала тенденцію ставати нестабільною. Щоб покращити продуктивність контролера, у контролер (3.52) було включено додатковий інтегральний цикл дії, а рівняння змінної керування було змінено, як у (3.53).

$$\frac{dW_A}{dt} = P_{\text{ref}} - P_o \quad (3.52)$$

$$U = \frac{P_{\text{ref}} + k_1 e - X_A \dot{e}_\varphi - Y_A \ddot{e}_\varphi}{Z_A} + \frac{k_2}{Z_A} \int_0^t (P_{\text{ref}} - P_o) dt \quad (3.53)$$

Використовуючи (3.53) у (3.43), динаміку помилки замкнутого циклу системи після додавання додаткового інтегрального члена можна отримати як

$$\dot{e} = -k_1 e - k_2 \int_0^t e dt \quad (3.54)$$

Використовуючи перетворення Лапласа, характеристичне рівняння (3.54) можна записати як

$$(s^2 + k_1 s + k_2) e(s) = 0 \quad (3.55)$$

Значення  $k_1$  і  $k_2$  вибирають таким чином, щоб корені характеристичного рівняння лежали в LHS  $s$ -площини.

### 3.9 Результати моделювання процесу керування маховиком асинхронної машини та результати

Розглядається варіант поступової зміни опорної потужності в порівнянні з інтегральним керуванням: було вивчено результати застосування лінійного інтегрального регулятора з підсиленням регулятора  $T$ , що дорівнює 1, і результати наведено на рис.3.5, а. Очевидно, що маховик не в змозі відстежити еталонну потужність. На рис.3.5, b також показано продуктивність маховика при відстеженні змін опорної потужності (рівняння 3.50) без додаткового інтегрального рівняння контуру. FESS не може підтримувати тривалу стабільну продуктивність із зазначеним вище керуванням. Проблема математичної конвергенції розв'язувача через складність жорсткої задачі може бути однією з причин, чому вищезазначене керування не працює.

Покращена топологія управління з додатковим інтегралом для застосується до асинхронної машини на основі FESS і її продуктивність представлена на рис.3.5, c. Реакція маховика до ідентичного джерела потужності, що й у попередньому випадку. Вважається, що він здатний відстежувати необхідні зміни як у режимах генерації, так і в режимах руху протягом більш тривалого періоду часу без нестабільності та керуючого зусилля (рис. 3.5,d).

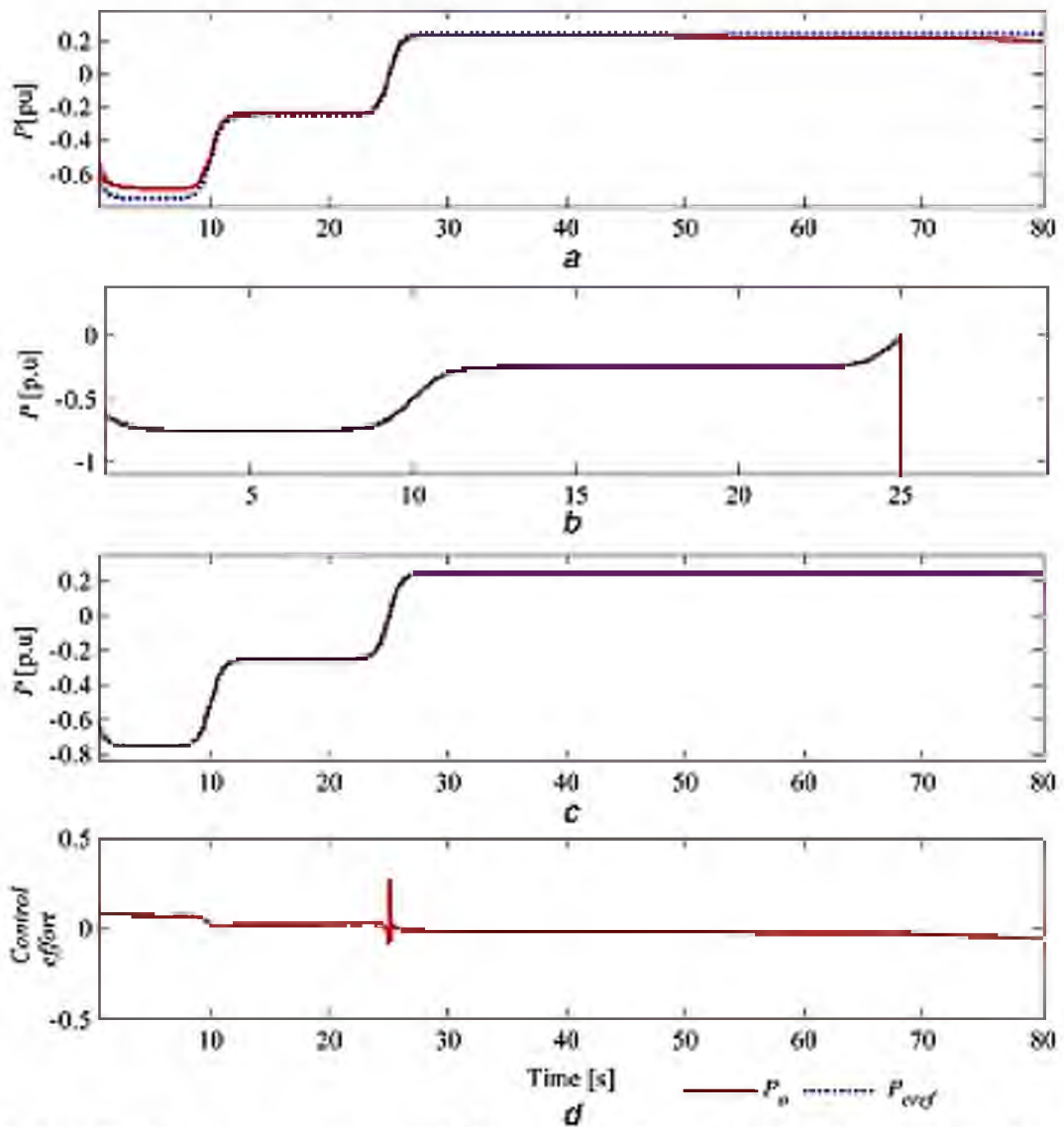


Рис. 3.5. Маховик на основі асинхронної машини: а) - вихідна потужність з лінійним інтегральним керуванням, б) - вихідна потужність з нелінійним керуванням без додаткового інтегрального контуру, в) - вихідна потужність з нелінійним керуванням з додатковим інтегральним контуром з  $k_1 = 10$  і  $k_2 = 0,001$ , д) - контрольні зусилля

Застосування контролера Ляпунова для згладжування потужності когенераційної установки і навантаження технологічних ліній моделюється в цій роботі з використанням двох різних конфігурацій маховиків: на основі машини постійного струму та приводу асинхронної машини. Системні нелінійності моделюються, і, відповідно, виводиться керуюча дія для відстеження дефіциту

або надлишку еталонної потужності на додаток до забезпечення асимптотичної стабільності. Маховик здатний стежити за швидкими змінами опорної потужності без надмірних зусиль керування, результатом чого є здатність забезпечити диспетчеризацію потужності від когенераційної установки. Метод вибору параметра керування, який не змінюється залежно від робочих умов системи, також обговорюється на відміну від PI-регулювання, яке вимагає налаштування зі зміною робочих умов. Продуктивність контролера порівнюється з лінійним PI-регулюванням і дає кращі результати.

В подальшому можливе застосування FESS і розгляд електродинамічних процесів в системі «електродвигун – супермаховик» в умовах автономної системи енергозабезпечення під час екстремального та реалістичного відхилення частоти. Системи електроенергії з низькою інерцією з високою частотою відновлюваних джерел енергії можуть страждати від швидких відхилень частоти під час порушень [24]. Швидко реагуючі системи зберігання енергії, такі як система зберігання енергії маховика (FESS), можуть допомогти обмежити відхилення частоти шляхом введення або поглинання великої кількості активної потужності, майже без проблем деградації (рис.3.6).

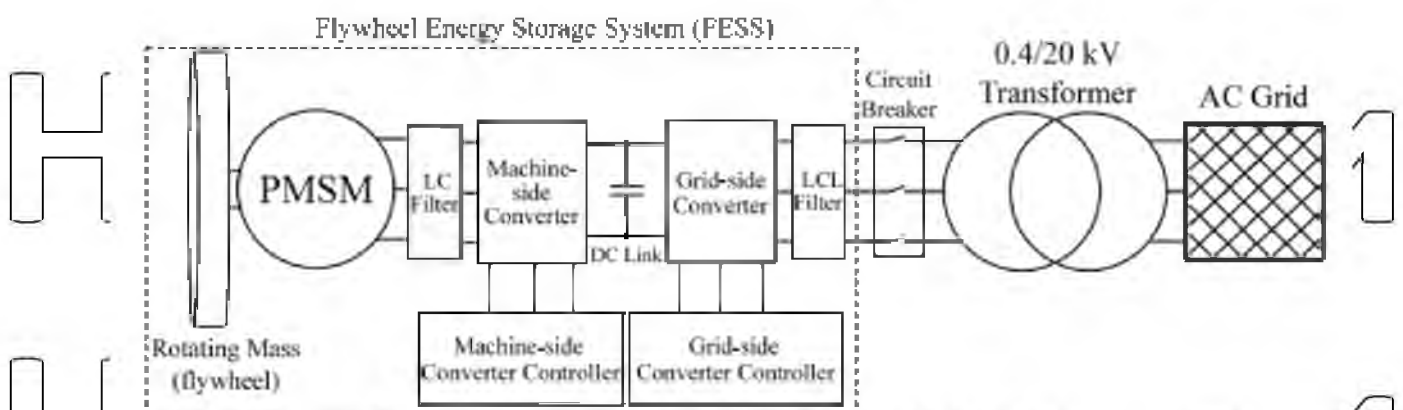


Рис.3.6. Структура махової системи накопичення енергії (FESS)

Але для точної оцінки переваг використання FESS у системах електроенергії необхідна точна та підтверджена модель, яка не лише відображає її переваги, але й показує практичні обмеження цієї технології, наприклад її втрати, її допоміжні вимоги до потужності та його обмеження протягом усього

оперативного діапазону. У роботі [24] представлена точна модель для швидкісного FESS. FESS може досягти встановленої точки потужності в межах 60 мс після відхилень частоти. Максимальна різниця між SOC моделі та реальним FES становить 0,8%.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## РОЗДІЛ 4 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНИХ УМОВ РОБОТИ В ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

### 4.1 Основні аспекти створення системи оптимального керування електротехнічним комплексом біогазової установки

Інтенсифікація біоенергетичної утилізації приводить не лише до збільшення виходу біогазу, але й до значного зменшення площі, що займають ці споруди. Такі процеси вимагають продуктивного керування складними системами метанового бродіння та побудови спеціальної системи керування (СК) електротехнічним комплексом (ЕТК) БГУ (рис.4.1). Загальний напрямок в системному проектуванні СК – це проектування системи оптимального керування ЕТК БГУ для отримання максимальних об'ємів біогазу. Як показують результати теоретичних та практичних досліджень, найбільший вихід біометану, дають субстрати з високою концентрацією енергії: свіжа трава, бадилля буряка, кукурудза, зернові рослини [25]. Найменший вихід біогазу з органічного сухого субстрату має солома. За допомогою системи керування ЕТК БГУ повинні забезпечуватися наступні ключові умови виробництва біогазу.

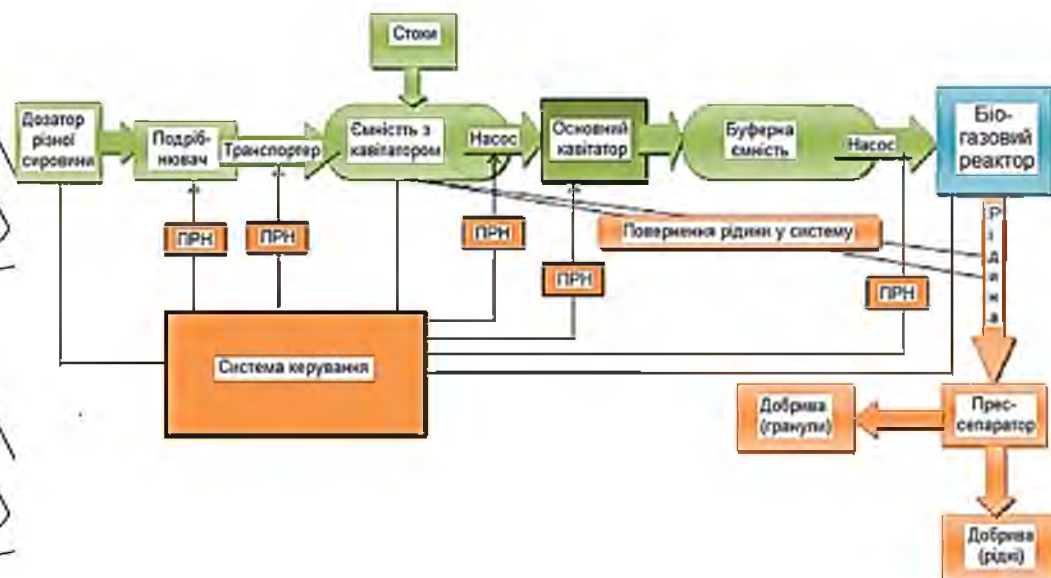


Рис. 4.1 Структура електротехнічного комплексу багатомодульної БГУ:

ПРН – плавний регулятор напруги

Оптимальним режимом для всіх груп бактерій є діапазон температур 35-40° С, що також забезпечується системою керування ЕСК БГУ з урахуванням прогнозованої температури навколишнього середовища.

У процесі бродіння кількість виробленого газу поступово зростає відповідно збільшенню його тривалості, причому спочатку воно відбувається швидше, а в міру зростання тривалості бродіння – повільніше. В результаті настає такий момент, коли подальше перебування в ферментаторі буде недоцільно з економічної точки зору.

Гідролізні і кислотоутворюючі бактерії в середовищі з рівнем рН 4,5-6,3 досягають оптимуму своєї активності, тоді як бактерії, що утворюють оцтову кислоту і метан, можуть жити лише при нейтральному або при слабо лужному рівні рН 6,8-8. Для всіх бактерій дійсним є правило: якщо рівень рН перевищує оптимальний, то вони стають менше активними у своїй життєдіяльності, що затримує утворення біогазу.

Відомо, що співвідношення вуглецю до азоту в різних типах гнойових відходах свиней та в рідких відходах ВРХ в більшості випадків не перевищує значення 15, а для стабільного протікання процесу метанового бродіння оптимальним співвідношенням є діапазон 10-30:1. Натомість, співвідношення вуглецю до азоту в ЕК в більшості випадків перевищує значення 30. Очевидно, що змішування гнойових відходів та ЕК дозволить оптимізувати склад суміші за співвідношенням вуглецю до азоту, що вказує на доцільність їх сумісного зброджування [26].

Процес інтенсифікації виходу біогазу полягає в тому, що потік різних видів біомаси у модулях БГУ подрібнюється до необхідного мікроскопічного рівня та гомогенізується. За допомогою спеціального оптичного імунного біосенсору на основі поверхневого плазмового резонансу визначається кількість та інтенсивність росту мікробної популяції у зброджуваній біомасі, що необхідно для оптимального дозування різних видів ЕК та спеціальних домішок, які в комплексі з кавітаційними деструкторами біомаси дозволять значно збільшити вихід біогазу для отримання різних видів енергії.

Технологію виробництва біогазу та органічних добрив можна представити у багатокроковій послідовності окремих стадій і робочих операцій. У БГУ охоплюється весь цикл операцій – від прийому оптимальних об'ємів різного виду вхідної сировини та спеціальних домішок і до одержання готової

продукції – біогазу та добрив. При цьому передбачається, що процес переробки

вхідної сировини являє собою керований  $N$ -етапний динамічний процес, який на кожному ( $n$ -му) етапі характеризується двома видами параметрів: параметрами керування  $m_n$  (об'ємом різного виду вхідної сировини та домішок) і

параметрами стану  $G_n(m_n)$  (об'ємом отриманого біогазу на  $n$ -му етапі) [26]. У

вигляді обмежень виступає сумарний ресурс часу функціонування БГУ ( $T$ ) та вартісні витрати ( $C$ ), що виділяються на вхідну сировину та домішки. Кінцевою метою функціонування БГУ ( $W_N$ ) є отримання максимальних об'ємів біогазу.

Загалом задача оптимального дозування різних видів вхідної сировини та домішок може бути подана наступним чином.

Знайти

$$\max W_N = \sum_{n=1}^N G_n(m_n) \quad (4.1)$$

$$\text{при } T_N \leq T; \quad C_N \leq C, \quad (4.2)$$

де  $T_N$  – використаний час на протязі  $N$  етапів функціонування БГУ;

$C_N$  – витрати на протязі  $N$  етапів функціонування БГУ

Таким чином, необхідно знайти такі об'єми різних видів вхідної сировини та домішок на кожному етапі ( $m_n$ ), щоб максимізувати цільову функцію (4.1)

#### 4.2 Забезпечення безпечних умов роботи з електроустановками

*Небезпека враження електричним струмом*

Основні причини враження електричним струмом наступні:

– поява напруги на відключених струмоведучих частинах, на яких працюють люди, унаслідок помилкового включення установки;



- виникнення крокової напруги на поверхні землі в результаті замикання проводу на землю;

- поява напруги на металевих конструктивних частинах електроустановки - корпусах, кожухах і т.д. у результаті ушкодження або старіння ізоляції та з інших причин;

- випадковий дотик чи наближення на небезпечну відстань до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою.

Відповідальність за своєчасне забезпечення працівників і комплектування електроустановок засобами захисту згідно з нормами комплектування, за організацію належних умов зберігання, створення необхідного запасу, своєчасне проведення періодичних оглядів і випробувань, вилучення непридатних засобів та організацію обліку несе власник цих засобів.

Основними технічними заходами щодо попередження електротравм при замиканнях на корпус є захисне заземлення, занулення, захисне відключення.

Заземлення в електроустановках — це навмисне з'єднання елементів електроустановки, які не знаходяться під напругою, з глухо заземленою нейтраллю генератора чи трансформатора в мережах трифазного струму, з глухо заземленим вводом джерела однофазного струму, з глухо заземленою середньою

точкою джерела в мережах постійного струму. Заземлення установки виконується відповідно до ГОСТ 12М. 030-81

Опір ізоляції повинен бути не менше 0,5 МОм.

Електрична апаратура, встановлена всередині робітничих приміщень, повинна мати ступінь захисту  $I_p = 51$  (ГОСТ 14254-80).

Ізоляція провідників виміряється мегаамперметром Ц044Т У25-0.4-1970-80.

Основні заходи і засоби від ураження електричним струмом:

- ізоляція струмопровідних частин пульта керування, як ізолюючий матеріал вибираємо поліхлорвініл ( питомий електричний опір 104 МОм , пробивна напруга 6-15 кВ/см );

- недоступність струмоведучих частин — розміщення їх на недосяжній висоті або за огорожею,

- електророзділення мережі за допомогою спеціальних розділяючих трансформаторів; - в аварійному режимі застосовується захисне занулення;

- рубильники включення замкнені в спеціальних шафах;

- орієнтація в установках – маркування для розпізнавання призначення і приналежності частин обладнання, кабелів і проводів, застосування попереджувальних сигналів, надписів, табличок для вказання на ввімкнений стан обладнання, знаків високої напруги для попередження враження струмом.

- при роботі з електроінструментом, потрібно застосовувати індивідуальні захисні засоби, такі як діелектричні рукавички і калоші, гумові килимки, ізольовані підставки.

Забороняється:

- проводити роботи на незаанулених вузлах лінії;

- проводити ремонт лінії без вимкнення електричної мережі;

- залишати лінію, що працює без нагляду;

- допускати до роботи людей, які не пройшли навчання і не були ознайомлені з правилами техніки безпеки на виробництві.

З метою запобігання травм рекомендується вживати наступних заходів обережності:

- рубильники вмикання установки повинні знаходитися в спеціальній шафі;

- силові кабелі помістити в спеціальні захисні металеві рукава;

- передбачити спеціальне захисне відключення установки у випадку попадання людини під напругу;

- на панелі управління передбачити спеціальні лампи включення установки.

Вимоги до засобів захисту, їх конструкції та обсягів і норм випробувань, порядку застосування і зберігання, комплектування засобами захисту електроустановок та виробничих бригад виконано у відповідності до вимог ДНАОП 1.1.10-1.07-01 "Правила експлуатації електрозахисних засобів" (у

подальшому - Правила). Засоби захисту, що використовуються в електроустановці, відповідають вимогам чинних державних стандартів, технічних умов щодо їх конструкції.

Електрозахисні засоби зберігаються у приміщеннях, в спеціально відведених місцях сухими і чистими, в умовах, що виключають можливість їх механічного ушкодження, шкідливої дії вологи, агресивного середовища, масла тощо.

### *Шум і вібрація*

Джерелом шуму при роботі обладнання є електродвигуни.

Для зменшення виробничого шуму передбачено проведення наступних заходів:

- встановлення екранів;
- своєчасне змашування всіх поверхонь, що труться;
- своєчасний ремонт всіх механічних вузлів за регламентом.

Фактичні показники шуму 70 дБА, що відповідає ДСН 3.36.037-99.

Персонал, що обслуговує насосне відділення, забезпечити індивідуальними засобами захисту – м'які протумовані вкладиші, тампони з ебоніту чи гуми, які знижують шум на 18-20 дБА.

Джерелом вібрації являються електродвигуни і рухомі частини лінії.

Вібрації виникають внаслідок неточності установки рухомих частин, нещільного з'єднання корпусів рухомих частин до фундаменту.

Рівень технологічної вібрації у приміщенні не перевищує 90 дБ при частоті 4 Гц, що відповідає ДСН 3.36.039-99.

Це досягається наступними заходами:

- обладнання лінії встановлено на фундаменти, маса яких набагато перевищує масу встановленого обладнання;
- використання гумових прокладок в якості амортизаторів;
- проектування додаткових ребер жорсткості.

Для захисту рук від впливу загальної вібрації передбачене взуття на товстій гумовій підшві, відповідно до ГОСТ 12.4.002-74.

Для контролю рівня шуму і вібрації передбачений прилад ВШВ-003 і шумовіброзамірний комплекс ШВК-1.

Сумарний час роботи в контактi з вiбрацiєю не перевищує 2/3 робочої зміни. Тривалість неперервної дії вiбрації не перевищує 15 – 20 хв. При такому режимі обiдня перерва не менше 40 хвилин.

#### *Пожежна безпека*

Усі електричні машини, апарати і прилади, розподільні пристрої, трансформаторні і перетворювальні підстанції, елементи електропроводки, струмоводи, світильники тощо використовуються у виконанні, яке відповідає класу зони з пожежовибухонебезпеки, тобто мають відповідний рівень і вид вибухозахисту або ступінь захисту оболонок згідно ГОСТ 14254, ПУЕ і ДНАОП 0.00-1/32-01; вогнестійкість будівлі та споруди відповідно СНиП 2.01.02-85.

Потрібні величини протипожежних відстаней відповідно додатку 3.1 до ДБН 360-92.

Кількість евакуаційних виходів із приміщень та з кожного поверху будівель, прийнято за СНиП 2.09.02-85, не менше двох. Евакуаційні виходи розташовуються розосереджено. Ширина шляхів евакуації в світлі не менша 1 м, висота проходу - не менша 2 м. Влаштування гвинтових сходів на шляхах евакуації не допускається. Між маршами сходів необхідно передбачати горизонтальний зазор не менше 50 мм (0,05 м).

Двері на шляху евакуації відкриваються за напрямком виходу з приміщення. Улаштування розсувних та в'їзних дверей на шляхах евакуації не допускається.

Мінімальна ширина дверей на шляхах евакуації повинна бути 0,8м. Ширина зовнішніх дверей сходових кліток повинна бути не менша ширини маршу сходів.

Відстань від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу із приміщення безпосередньо назовні або на сходову клітку не перевищують значень, наведених у СНиП 2.09.02-85.

Необхідний час евакуації людей із виробничих будинків встановлено в СНиП 2.09.02-85.

Згідно СН 305-74 приміщення обладнане блискавковідводами, що захищають від прямих ударів блискавки.

Для запобігання поширення полум'я на установку рекуперації у випадку пожежі на основному виробництві передбачена вогнеперешкода. Для погашення палаючого вугілля до адсорбера підведено протипожежну воду, азот. Також передбачена обвідна лінія на установці.

Для гасіння пожеж передбачені ручні вогнегасники ВП-4(3) – робочий тиск у корпусі 1,3 МПа, температури експлуатації -20 +50, термін придатності – 10 років.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовані основні передумови побудови системи автономного енергозабезпечення технологічних ліній переробки побічних продуктів

птахівництва

2. Запропоновані технологічні рішення по птахофермі «ФрільЛідер», які передбачають створення системи переробки усіх побічних продуктів птахівництва, в тому числі, для виробництва сухого або гранульованого палива

з пташиного посліду та системи автономного енергозабезпечення технологічних ліній.

3. Здійснено вибір конструкції та режимів роботи системи «високошвидкісний електричний двигун – супермаховик». Виходячи з попередніх розрахунків електричної енергії на власні потреби в системі переробки побічних продуктів

птахівництва надалі досліджимо FESS, в якому передбачено використання з композитного матеріалу ротора маховика та гібридних підшипників.

4. Досліджені електродинамічні процеси в системі «електродвигун – супермаховик» в умовах автономної системи енергозабезпечення при пикових навантаженнях. Виходячи з рівнів обсягу максимальної і середньодобової

потужностей енергозабезпечення в системі переробки побічних продуктів птахівництва досліджено два варіанта: FESS на базі асинхронної машини, FESS на базі машини постійного струму. Також виконано аналіз застосування систем лінійного та нелінійного керування FESS.

5. Застосування контролера Ляпунова для згладжування потужності

когенераційної установки і навантаження технологічних ліній моделюється в цій роботі з використанням двох різних конфігурацій маховиків: на основі машини постійного струму та приводу асинхронної машини. Системні нелінійності

моделюються, і, відповідно, виводиться керуюча дія для відстеження дефіциту

або надлишку еталонної потужності на додаток до забезпечення асимптотичної стабільності. Маховик здатний стежити за швидкими змінами опорної

потужності без надмірних зусиль керування, результатом чого є здатність забезпечити диспетчеризацію потужності від когенераційної установки

6. Інтенсифікація біоенергетичної утилізації приводить не лише до збільшення виходу біогазу, але й до значного зменшення площі, що займають ці споруди. Такі процеси вимагають продуктивного керування складними

системами метанового бродіння та побудови спеціальної системи керування (СК) електротехнічним комплексом

7. Технологію виробництва біогазу та органічних добрив можна представити у багатокроковій послідовності окремих стадій і робочих операцій. У БГУ

охоплюється весь цикл операцій – від прийому оптимальних об'ємів різного виду вхідної сировини та спеціальних домішок і до одержання готової продукції – біогазу та добрив.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. An Energy Agency of the United States, website: <http://energy.gov>
2. Кириленко, А. В., Денісюк, С. П., & Бліщов, І. В. (2014). Інтелектуальні електроенергетичні системи: елементи та режими. За заг. ред. акад. НАН України А.В. Кириленко. К.: Ін-телектродинаміки НАН України.
3. Івашків, І. М., Стефанишин, Л. С., & Король, С. В. (2020). Економічні передумови використання відновлювальних енергетичних ресурсів на вітчизняних підприємствах в умовах розвитку зеленої енергетики. *Агросвіт*, (13-14), 61-65.
4. Schröder, P., Beckers, B., Daniels, S., Gnädinger, K., Maestri, E., Marmiroli, N., ... & Sebe, A. (2018). Intensify production, transform biomass to energy and novel goods and protect soils in Europe—A vision how to mobilize marginal lands. *Science of the Total Environment*, 616, 1101-1123.
5. Yang, B., Tong, S. T., & Fan, R. (2019). Sharpening land use maps and predicting the trends of land use change using high resolution airborne image: A geostatistical approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 79, 141-152.
6. Padró, J. C., Carabassa, V., Balagué, J., Brotons, L., Alcañiz, J. M., & Pons, X. (2019). Monitoring opencast mine restorations using Unmanned Aerial System (UAS) imagery. *Science of the Total Environment*, 657, 1602-1614.
7. Sun, H., Wei, S., Qian, J., & Wang, J. (2023). Design of energy storage for assisting extraction condensing unit to peak regulation and frequency modulation. *Journal of Energy Resources Technology*, 145(5), 052001.
8. Moghaddam, H. A., Saedinia, M. H., Mohamadian, S., Mahdavi, M. S., & Gharehpetian, G. B. (2020). Integrated modeling of power network and connected flywheel energy storage system for optimal power and energy ratings of flywheel. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 36(3), 1589-1599.



9. Lee, H., Jung, S., Cho, Y., Yoon, D., & Jang, G. (2013). Peak power reduction and energy efficiency improvement with the superconducting flywheel energy storage in electric railway system. *Physica C: Superconductivity*, 494, 246-249.
10. Xu, K. X., Wu, D. J., Jiao, Y. L., & Zheng, M. H. (2016). A fully superconducting bearing system for flywheel applications. *Superconductor Science and Technology*, 29(6), 064001.
11. Vajda, T., Kohari, Z., Porjesz, T., Benko, L., Meerovich, V., & Gawalek, W. (2002). Operational characteristics of energy storage high temperature superconducting flywheels considering time dependent processes. *Physica C: Superconductivity*, 372, 1500-1505.
12. Bornemann, H. J., Zabka, R., Boegler, P., Urban, C., & Rietschel, H. (1994, May). Concepts of flywheels for energy storage using autostable high-T (sub c) superconducting magnetic bearings. In *NASA Langley Research Center, Second International Symposium on Magnetic Suspension Technology, Part 2*.
13. Seino, H., Nagashima, K., Tanaka, Y., & Nakauchi, M. (2010, June). Study of superconducting magnetic bearing applicable to the flywheel energy storage system that consist of HTS-bulks and superconducting-coils. In *Journal of Physics: Conference Series (Vol. 234, No. 3, p. 032052)*. IOP Publishing.
14. Arai, Y., Yamashita, T., Hasegawa, H., Matsuoka, T., Kainori, H., & Ishihara, T. (2015). Eddy current analysis and optimization for superconducting magnetic bearing of flywheel energy storage system. *Physics Procedia*, 65, 291-294.
15. Zhang, X., & Yang, J. (2017). A robust flywheel energy storage system discharge strategy for wide speed range operation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(10), 7862-7873.
16. Hutchinson, A., & Gladwin, D. T. (2020). Optimisation of a wind power site through utilisation of flywheel energy storage technology. *Energy Reports*, 6, 259-265.
17. Choudhury, S. (2021). Flywheel energy storage systems: A critical review on technologies, applications, and future prospects. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(9), e13024.

18. Olahi, A.; Abdelkareem, M.A.; Wilberforce, T.; Sayed, E.T. Application of graphene in energy storage device—A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021, *135*, 110026.

19. Slotine, J. J. E., & Li, W. (1991). *Applied nonlinear control* (Vol. 199, No. 1, p. 705). Englewood Cliffs, NJ: Prentice hall.

20. Rade M. Ciric. Techno-Economic Analysis of Biogas Powered Cogeneration [Text] / Ciric, M. Rade Kuzmanovic Zoran // *Journal of Automation and Control Engineering*. –2014. – Vol. 2, Issue 1. – P. 89–93. – doi: 10.12720/joace.2.1.89-

93.

21. Правила приєднання когенераційних установок до електричних мереж.

(із змінами, внесеними згідно з Постановою Національної комісії регулювання електроенергетики N 308 ( 20407-11 ) від 03.03.2011

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0778-09#Text>

22. Golnaraghi, F., & Kuo, B. C. (2017). *Automatic control systems*. McGraw-Hill Education.

23. Anaya-Lara, O., Jenkins, N., Ekanayake, J. B., Cartwright, P., & Hughes, M. (2011). *Wind energy generation: modelling and control*. John Wiley & Sons.

24. Karrari, S., De Carne, G., & Noe, M. (2021). Model validation of a high-speed flywheel energy storage system using power hardware-in-the-loop testing. *Journal of Energy Storage*, *43*, 103177.

25. Гелегуха Р.Г. Перспективи біогазу в Україні – Економічна правда, 2013

[Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<http://www.epravda.com.ua/columns/2013/07/3/383399/>.

26. Шворов С.А. Метод оптимального дозування вхідних субстратів та спеціальних домішок для біогазових установок / С. А. Шворов, О.

М.Юрченко, Д. С. Комарчук, П. Г. Охріменко // *Відновлювальна енергетика*. – 2015. – № 2. – С. 80-83.

27. Головенко В. П., Заблудський М. М. Електродинамічні процеси в системі «Електродвигун – супермаховик» в умовах автономної системи енергозабезпечення

// Тези доповідей 76-а науково-практичної конференції студентів  
«Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні  
управляючі системи в АПК», НУБіП України, м.Київ, 37. 20 квітня 2023  
р.-С.23

НУБіП України

НУБіП України

НУБіП України

НУБіП України

НУБіП України

НУБіП України