

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розроблення автоматизованої системи керування комплексом паливних елементів

Виконав: студент

IV курсу, групи КТс-41

спеціальності

151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва спеціальності)

Олійник І.І.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Хоміцький О.І.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Микитишин А.Г.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2024

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Микитишин А.Г.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« » 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Олійнику Івану Івановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення автоматизованої системи керування комплексом паливних елементів

Керівник роботи Хоміцький Олег Іванович, асистент кафедри КТ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «17» травня 2024 року № 4/7-515

2. Термін подання студентом завершеної роботи 21 червня 2024р.

3. Вихідні дані до роботи Технічні вимоги щодо керування комплексом паливних елементів

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

Аналітична частина

Проектна частина

Спеціальна частина

Безпека життєдіяльності, основи охорони праці

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Титульний слайд

Актуальність роботи

Завдання роботи

Основна частина

Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	Сенчишин В.С., доцент кафедри МТ		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи	20.05.2024	Виконано
2.	Підбір джерел по темі роботи	22.05.2024-24.05.2024	Виконано
3.	Опрацювання публікацій та збір даних по темі роботи	24.05.2024-27.05.2024	Виконано
4.	Виконання роботи згідно мети	27.05.2024-29.05.2024	Виконано
5.	Оформлення першого та другого розділів	29.05.2024-31.05.2024	Виконано
6.	Оформлення третього розділу	31.05.2024-11.06.2024	Виконано
7.	Оформлення четвертого розділу	11.06.2024-13.06.2024	Виконано
8.		14.06.2024-15.06.2024	Виконано
9.		16.06.2024-17.06.2024	Виконано
10.	Оформлення кваліфікаційної роботи	18.06.2024-19.06.2024	Виконано
11.	Нормоконтроль	19.06.2024-20.06.2024	Виконано
12.	Перевірка на плагіат	21.06.2024	Виконано
13.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	21.06.2024	Виконано
14.	Захист кваліфікаційної роботи		

Студент

_____ (підпис)

Олійник І.І.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Хоміцький О.І.

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра складається з пояснювальної записки та графічної частини (ілюстративний матеріал – слайди).

Об'єм графічної частини дипломної роботи становить _____.

Об'єм пояснювальної записки складає ___ друкованих сторінок формату А4.

В роботі використано ___ літературних джерел.

Задовільна перехідна поведінка є однією з критичних вимог до системи паливних елементів як для автомобільного, так і для побутового застосування. Необхідна добре спроектована система керування, щоб забезпечити швидку та послідовну перехідну поведінку системи паливних елементів. Система складається з чотирьох основних підсистем, а саме, підсистеми постачання реагентів, тепла та температури, управління водою та підсистеми керування електроенергією. Додаткові складності виникають для системи з водневим паливним процесором, який перетворює паливо на основі вуглецю на водень. Взаємодії між підсистемами призводять до складної проблеми керування.

У цій роботі представлені дві проблеми керування, пов'язані з системою паливних елементів. Перша проблема контроль катодного кисневого реагенту для системи прямого водневого паливного елемента високого тиску (FCS). Мета контролю полягає в тому, щоб ефективно регулювати концентрацію кисню в катоді шляхом швидкого і точного поповнення кисню, що виснажується під час виробництва електроенергії. Друга проблема полягає в управлінні з кількома входами та кількома виходами паливної системи (FPS) низького тиску на основі часткового окислення природного газу. Метою контролю є регулювання як температури каталітичного часткового окислення (CPOX), так і концентрації водню на аноді. Динамічний аналіз системи та проектування керування здійснюються з використанням підходу лінійного керування на основі моделі.

Орієнтована на керування нелінійна динамічна модель, яка підходить для кожної проблеми керування, розроблена на основі принципів фізики. Вони не тільки легко масштабуються та розширюються, але й динамічні моделі системного рівня, створені з моделей компонентів на основі фізики, також дуже корисні для розуміння поведінки та взаємодії системи.

Ключові слова: КОНТРОЛЬ, АВТОМОБІЛЬ, ПАЛИВНИЙ ЕЛЕМЕНТ, МОДЕЛЮВАННЯ, АВТОМАТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	6
1.1 Будова та застосування паливних елементів	6
1.2 Система двигунів на паливних елементах для автомобілів	11
1.3 Системні взаємодії.....	14
2 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА	18
2.1 Модель системи паливних елементів та допоміжні компоненти	18
2.2 Зосереджена модель динаміки	25
2.3 Модель повітроохолоджувача (статична).	34
2.4 Модель зволожувача (статична).....	34
3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА	37
3.1 Контроль повітряного потоку для реагенту кисню катода паливного елемента.....	37
3.2 Динамічний зворотний зв'язок	48
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	52
4.1 Вимоги охорони праці під час роботи з електроустаткуванням	52
4.2 Вимоги безпеки під час виконання робіт	57
4.3 Вимоги безпеки після закінчення робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування	59
4.4 Розрахунок захисного заземлення	61
ОСНОВНІ ВИСНОВКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	67
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	68

ВСТУП

Паливні елементи — це електрохімічні пристрої, які перетворюють хімічну енергію газоподібного палива безпосередньо в електрику, і широко розглядаються як потенційне альтернативне стаціонарне та мобільне джерело енергії. Вони доповнюють теплові двигуни та зменшують всюдисущу залежність від викопного палива, а отже, мають значні наслідки для навколишнього середовища та національної безпеки. Таким чином, вони активно вивчаються для комерційного стаціонарного виробництва електроенергії, побутових застосувань і транспортних технологій. Нещодавні дослідження показали, що в Сполучених Штатах на вуглекислий газ (CO₂) припадає понад 80% викидів парникових газів, а на транспортний сектор припадає 32% загальних викидів CO₂. У цій роботі ми зосереджуємось на вимогах керування паливними елементами під час перехідних процесів. Особлива увага приділяється застосуванню паливних елементів в автомобільних силових агрегатах, частково тому, що умови руху наземних транспортних засобів є найскладнішою проблемою контролю, а частково через їх важливість у глобальному споживанні палива та викидах.

Системи паливних елементів інтенсивно розробляються кількома виробниками, зокрема Polymer Паливні елементи з електролітною мембраною (PEM) (також відомі як паливні елементи з протонообмінною мембраною), наразі, на думку багатьох, перебувають у відносно більш розвинутій стадії для застосувань наземних транспортних засобів. Паливні елементи PEM мають високу щільність потужності, твердий електроліт, тривалий термін служби елемента та пакета, а також низьку корозію. Вони мають більший ККД порівняно з тепловими двигунами, і їх використання в модульній генерації електроенергії та приводі електромобілів є перспективним.

1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Будова та застосування паливних елементів

ККД паливних елементів при застосуванні є високим при часткових навантаженнях, що відповідає більшості сценаріїв руху по місту та шосе. При номінальній швидкості руху (30 миль/год) ефективність електроприводу на паливних елементах, що використовує прямий водень із природного газу, в два рази вище, ніж у звичайного двигуна внутрішнього згорання. Використання чистого водню як палива може усунути локальні проблеми викидів у густонаселених містах. Інфраструктура виробництва та розподілу водню на основі відновлюваної енергії вітру, води та сонця або паливних процесорів допоможе зменшити нашу залежність від викопного палива.

Однак, щоб конкурувати з двигунами з ДВС, системи паливних елементів повинні працювати та функціонувати принаймні так само добре, як звичайний двигун. Перехідна поведінка є ключовою вимогою для успіху транспортних засобів на паливних елементах. Відповідь на потужність системи паливних елементів обмежена лише подачею повітря та водню, регулюванням потоку та тиску, а також керуванням теплом та водою. Оскільки струм миттєво відбирається від джерела навантаження, підключеного до блоку паливних елементів, утворюється тепло та вода, тоді як кисень виснажується. Під час цього перехідного процесу необхідна система контролю дихання паливних елементів, щоб підтримувати оптимальну температуру, гідратацію мембрани та парціальний тиск реагентів на мембрані, щоб уникнути шкідливого погіршення напруги паливних елементів і, таким чином, зниження ефективності. Ці критичні параметри паливних елементів можна контролювати для широкого діапазону струму, а отже, і потужності за допомогою ряду приводів, таких як клапани, насоси, двигуни компресорів, лопатки розширювача, двигуни вентиляторів, зволожувачі повітря та конденсатори. Отримана система допоміжного приводу необхідна для точного та швидкого регулювання, щоб задовольнити стандарти продуктивності, безпеки та надійності, які не залежать від віку та умов експлуатації. Динамічний аналіз на основі моделі та дизайн управління дають

уявлення про взаємодію підсистеми та обмеження дизайну керування. Він також містить вказівки щодо вибору датчика та координації керування між підсистемами. Створення орієнтованої на управління динамічної моделі всієї системи є важливим першим кроком не лише для розуміння поведінки системи, але й для розробки та проектування методологій керування на основі моделі. Метою цього дослідження є розробка фізичних динамічних моделей систем паливних елементів і систем паливних процесорів, а потім застосування методів багатопараметричного керування для вивчення їх поведінки. Аналіз дасть розуміння обмежень дизайну керування та надасть вказівки щодо необхідної структури контролера та перепроєктування системи.

Тут ми підсумовуємо принцип і потенційні переваги виробництва енергії на паливних елементах. Принцип роботи паливного елемента був відкритий у 1839 році британським фізиком Вільямом Р. Гроувом. Паливний елемент складається з електроліту, розміщеного між двома електродами. Електроліт має спеціальну властивість, яка дозволяє позитивним іонам (протонам) проходити, блокуючи електрони. Газоподібний водень проходить через один електрод, який називається анодом, і за допомогою каталізатора розділяється на електрони та протони водню (рис. 1.1).

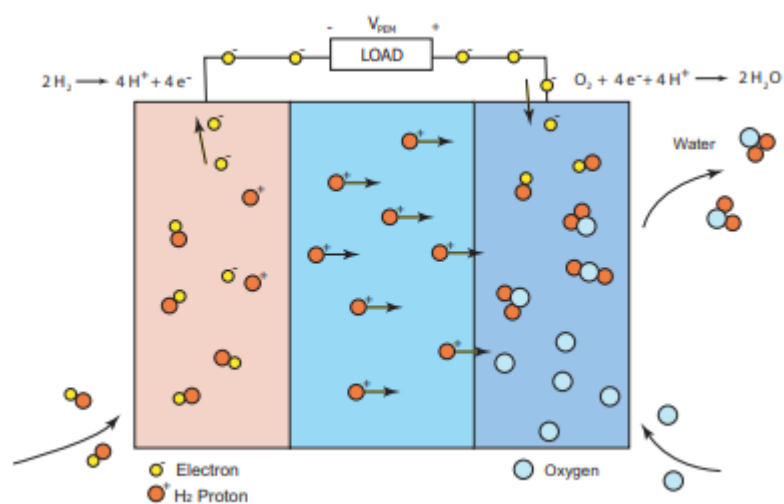
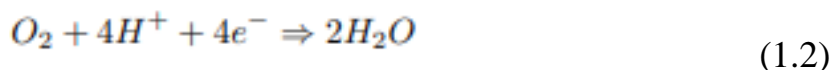


Рисунок 1.1 - Реакція паливного елемента



Протони течуть до іншого електрода, який називається катодом, через електроліт, а електрони течуть через зовнішній контур, таким чином створюючи електрику. Протони водню та електрони об'єднуються з потоком кисню через катод і утворенням води.



Таким чином, загальна реакція паливного елемента



Напруга, вироблена одним елементом, становить від 0 до 1 вольт залежно від умов роботи паливного елемента та величини навантаження, підключеного до паливного елемента. Типове значення напруги паливного елемента становить близько 0,7 вольт. Щоб отримати більш високу напругу, кілька елементів з'єднуються послідовно. Загальна напруга стека — це кількість комірок, помножена на середню напругу комірки. Як і в інших електричних пристроях, паливний елемент має електричний опір. Втрати, пов'язані з опором, розсіюються у вигляді тепла. Іншими словами, тепло виділяється в результаті реакції паливного елемента.

Паливні елементи мають ряд переваг перед двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) і акумуляторами. Щоб генерувати механічну енергію, ДВЗ спочатку перетворює енергію палива в теплову шляхом спалювання палива кисню при високій температурі. Потім теплова енергія використовується для генерації механічної енергії. Оскільки бере участь теплова енергія, ефективність процесу перетворення обмежена циклом Карно. На відміну від ДВС, паливні елементи безпосередньо перетворюють енергію палива в електричну енергію, а їх максимальна ефективність не підпадає під обмеження циклу Карно. Вищу ефективність перетворення енергії потенційно можна досягти за допомогою паливних елементів. Якщо водень використовується як паливо, результатом реакції паливного елемента є вода та тепло. Тому паливні елементи вважаються генератором електроенергії з нульовим рівнем викидів. Вони не створюють забруднювачів, таких як вуглеводень або оксид азоту. Акумулятор також є електрохімічним пристроєм, який перетворює хімічну енергію безпосередньо в

електрику. Проте реактиви батареї зберігаються всередині, і коли вона вичерпується, батарею потрібно зарядити або замінити. Реагенти паливного елемента зберігаються зовні. Кисень зазвичай отримують з атмосферного повітря, а водень зберігається в резервуарах високого тиску або криогенних резервуарах, які можна дозаправляти. Заправка паливних баків вимагає значно менше часу, ніж зарядка акумуляторів.

Існують різні типи паливних елементів, які відрізняються в основному типом використовуваного електроліту. Різниця в характеристиках елементів, таких як матеріал елемента, робоча температура та різноманітність палива, робить кожен тип паливного елемента придатним для різних застосувань. Відомо, що паливні елементи з полімерно-електролітною мембраною (PEMFC) підходять для застосування в автомобілях. Паливні елементи PEM мають високу питому потужність, твердий електроліт, довгий термін служби, а також низьку корозію. Паливні елементи PEM працюють в діапазоні температур 50 - 100 °C, що забезпечує більш безпечну роботу та усуває потребу в теплоізоляції. Полімерна електролітна мембрана є електронним ізолятором, але чудовим провідником іонів водню. Типовий матеріал мембрани складається з фторвуглецевого каркасу, до якого приєднані групи сульфокислоти (SO-H⁺). Коли мембрана стає гідратованою, іони водню (H⁺) у сульфонової групі є рухливими. Залежно від виробника мембрани та версії мембрани властивості мембран відрізняються. Товщина мембрани коливається від 50 до 175 мікрон, що приблизно дорівнює 2-7 паперам [106]. Мембрана затиснута між двома електродами (анодом і катодом), виготовленими з матеріалу з високою провідністю, такого як пористий графіт. Невелика кількість платини наноситься на поверхню анода і катода, щоб збільшити швидкість реакції. Три компоненти (анод, електроліт і катод) герметично з'єднані разом, утворюючи єдиний мембранний електролітний вузол (MEA), показаний на малюнку 1.2, товщина якого зазвичай менше міліметра.

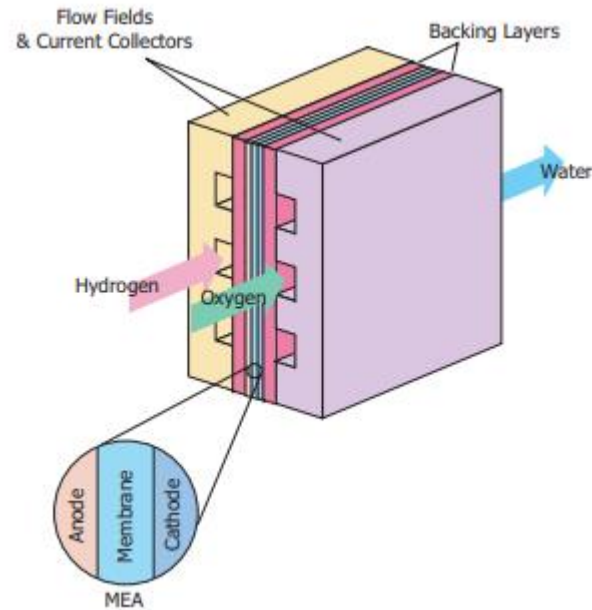


Рисунок 1.2 - Структура паливного елемента

MEA затиснутий двома опорними шарами з пористого вуглецю. Пориста природа підкладковий шар забезпечує ефективну дифузію кожного газу-реагенту до місця каталізатора на MEA. Зовнішня поверхня шару підкладки притиснута до пластин поля потоку, які служать і полем потоку реагенту, і струмоприймачем. Пластина виготовлена з легкого, міцного, газонепроникного матеріалу, що проводить електрони, наприклад графіту або композитних матеріалів. Інша сторона пластини поля потоку з'єднана з наступною коміркою. Кількість комірок, складених в одну комірку паливних комірок, залежить від потреби стека в потужності, яка залежить від різних застосувань.

Залежно від умов експлуатації один паливний елемент може забезпечувати напругу від 0 до 1,0 вольт з номінальним значенням 0,7 вольт. Типові характеристики паливних елементів зазвичай наводяться у вигляді поляризаційної кривої, показаної на малюнку 1.3, яка є графіком залежності напруги елемента від щільності струму елемента (струм на одиницю активної площі елемента). Різниця між фактичною напругою та ідеальною напругою паливного елемента відображає втрати в елементі. Як показано на малюнку 1.3, у міру того, як паливний елемент споживає більше струму, напруга зменшується через електричний опір паливного елемента, неефективне транспортування газу-реагенту та низьку швидкість реакції. Оскільки нижча напруга вказує на нижчу

ефективність паливного елемента, перевага віддається роботі з низьким навантаженням (низький струм). Однак це збільшить об'єм і вагу паливного елемента. Крім того, постійна робота при низькому навантаженні непрактична в автомобілях, де потрібні часті зміни навантаження. Полярizaційна крива, показана на рис. 1.3, призначена для конкретних робочих умов. Крива змінюється залежно від різних робочих умов, включаючи різний тиск, температуру, парціальний тиск реагенту та вологість мембрани. Приклад впливу тиску на полярizaційну криву показаний на малюнку 1.4. Дані, люб'язно надані нам Дослідницькою лабораторією Форда, взяті зі стандартного стека паливних елементів PEM, який використовується в прототипі автомобіля на паливних елементах.

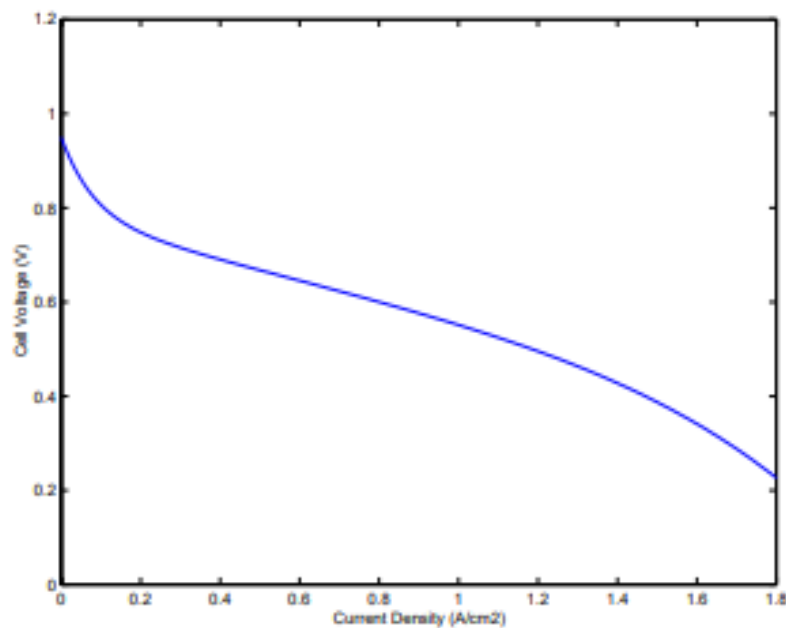


Рисунок 1.3 - Типова полярizaційна крива паливного елемента

1.2 Система двигунів на паливних елементах для автомобілів

Для того, щоб використовувати для живлення автомобіля, батарею паливних елементів потрібно об'єднати з іншими компонентами, щоб утворити систему паливних елементів. Діаграма на рис. 1.5 показує мінімальні компоненти, необхідні для двигуна на паливних елементах під тиском. Батарея паливних елементів потребує чотирьох систем потоку: (1) система подачі водню до анода (2) система подачі повітря до катода (3) деіонізована вода, яка служить

охолоджувачем у каналі охолодження палива, та (4) деіонізована вода подача до зволожувача для зволоження потоків водню та повітря. Ці чотири підсистеми позначені керуючими входами від u_1 до u_4 на рис. 1.5.

Робота під високим тиском значно покращує швидкість реакції, і, таким чином, для стиснення повітря до потрібного рівня потрібні ефективність і питома потужність паливних елементів, компресор і електродвигун. рівень тиску. Через високу температуру повітря, що виходить із компресора, потрібен повітроохолоджувач, щоб знизити температуру повітря перед тим, як воно потрапить у трубу.

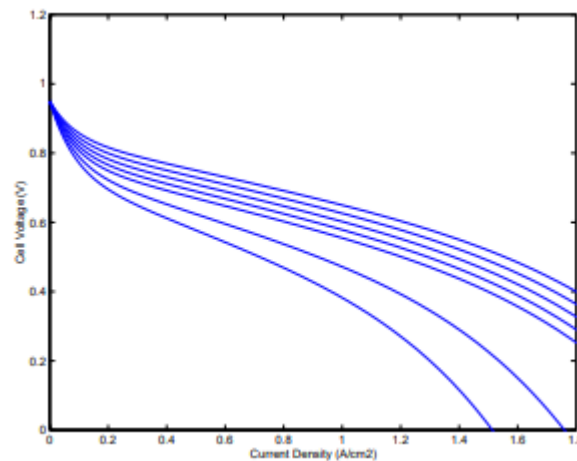


Рисунок 1.4 - Поляризація паливного елемента для різних робочих тисків

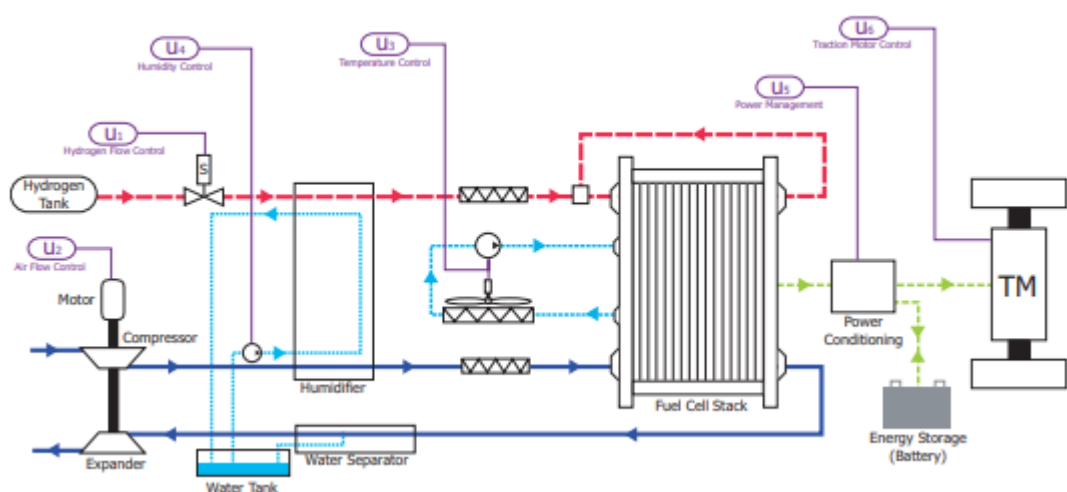


Рисунок 1.5 - Силова система автомобільних паливних елементів

Для додавання пари всередину використовується зволожувач потік повітря, як показано на рис. 1.5, щоб запобігти зневодненню мембрани. Коли

повітря виходить із труби, воно переносить пару, що утворюється в паливному елементі. Для автомобільної системи паливних елементів потрібен водовіддільник для відновлення води. З боку анода водень подається з контейнера, який може зберігати водень під тиском або рідкий водень. Для контролю витрати водню використовується клапан. Для зволоження потоку водню також використовується зволожувач. Оскільки температура пакета повинна підтримуватися нижче 100 °C для належного зволоження мембрани, надмірне тепло, що виділяється під час реакції паливного елемента, видаляється деіонізованою водою. Як показано на рис. 1.5, теплоносій, що виходить із труби, проходить через теплообмінник або радіатор, щоб відвести тепло від системи. Стаціонар живлення, позначений як керуючий вхід u5 на малюнку 1.5, часто потрібен, оскільки напруга блоку паливних елементів значно змінюється і не підходить для типових електронних компонентів або тягових двигунів. Умовне живлення подається на тяговий двигун, підключений до трансмісії автомобіля. Керуючий вхід u6 на рис. 1.5 представляє керування приводом тягового двигуна.

Швидкість потоку реагенту, загальний тиск, парціальний тиск реагенту, температура та вологість мембрани є основними параметрами, які необхідно регулювати, щоб забезпечити (1) швидку реакцію на перехідні процеси, постійний розігрів і безпечне відключення та (2) надійність і адаптацію до зміни потужності. Основними пристроями керування є двигун компресора для регулювання потоку повітря та тиску, клапан для регулювання витрати водню та тиску, водяний насос або швидкість вентилятора радіатора для регулювання температури та зволожувач для контролю вологості. Однак зміни параметрів не є незалежними. Зміни одного параметра впливають на інші. Наприклад, розглянемо наступне: збільшення швидкості повітряного потоку може спричинити збільшення тиску повітря, але також може змінювати кількість пари та тепла, що надходить у трубу та виходить із неї, таким чином впливаючи на вологість мембрани та температуру труби. Температура стека також впливає на вологість повітря та водень усередині стека, оскільки тиск насичення парів сильно залежить від температури.

Під час експлуатації автомобіля можливі різні рівні навантаження, а також раптові зміни навантаження. Для комерціалізації транспортних засобів на паливних елементах необхідно добре керувати цими операціями. Під час цього перехідного процесу система управління повинна підтримувати оптимальну температуру, гідратацію мембрани та парціальний тиск реагентів, щоб уникнути шкідливого зниження напруги паливного елемента, а отже, зниження ефективності та скорочення терміну служби паливного елемента.

1.3 Системні взаємодії

Точне керування потоком і тиском реагентів, температурою труби та вологістю мембрани має вирішальне значення для життєздатності, ефективності та надійності силових систем паливних елементів. Отримане завдання є складним через взаємодію підсистем і суперечливі цілі. Загальну систему можна розділити на чотири підсистеми. Кожна система має відповідну мету управління, а також взаємодію з іншими підсистемами. Підсистемами є потік реагентів, підсистеми тепла та температури, управління водою та підсистеми керування електроенергією.

Підсистема потоку реагентів

Підсистема потоку реагентів складається з контурів подачі водню та подачі повітря. Коли тяговий двигун транспортного засобу споживає струм, водень і кисень зменшуються в паливних елементах. Потік водню в аноді та потік повітря в катоді регулюються за допомогою команд клапана та двигуна компресора відповідно. Мета управління полягає в тому, щоб забезпечити достатні потоки реагентів (щоб підтримувати бажане співвідношення надлишку), щоб забезпечити швидкі перехідні реакції та мінімізувати споживання допоміжної енергії. Немінімальна фазова поведінка вихідної потужності паливного елемента до змін у вхідній потужності двигуна компресора обмежує пропускну здатність замкнутого циклу цього контуру. Кілька ранніх патентів визнають цю складність і уникають повільної реакції, покладаючись на карту прямого зв'язку, яка повинна бути налаштована на різні

умови навколишнього середовища. Кілька експериментальних систем використовують двигун із фіксованою швидкістю, який забезпечує потік повітря, що задовольняє максимальні вимоги до тяги. Це призводить до непотрібного допоміжного споживання електроенергії під час роботи з низьким навантаженням, де потрібен менший потік.

Теплова і температурна підсистема

Тепло-температурна підсистема включає систему охолодження комірки паливних елементів і систему температури реагентів. Коли струм споживається тяговим двигуном, у паливному елементі виділяється тепло. Керування теплом паливних елементів складніше, ніж у двигуні внутрішнього згорання. По-перше, деіонізована вода використовується як охолоджувач у трубі замість ефективної охолоджувальної рідини. По-друге, паливний елемент PEM призначений для роботи при температурі близько 80 °C. Таким чином, відпрацьоване повітря, що виходить із труби, яке має температуру близько 80 °C, має меншу здатність відводити тепло, ніж вихлопний газ ICE, який має температуру понад 500 °C. Таким чином, система охолодження відповідає за відведення тепла від паливних елементів. Крім того, низька різниця температур між трубою та водяним теплоносієм обмежує ефективність передачі тепла від труби до теплоносія. З розміром стека, який необхідний для пасажирських транспортних засобів, вироблене тепло не може пасивно розсіюватися конвекцією повітря та випромінюванням через зовнішню поверхню стека. Це вимагає активного охолодження через швидкість потоку реагентів і систему охолодження. Окрім швидкості потоку водяного теплоносія та його температури, температура повітря, що входить до реагенту, також впливає на температуру труби. Система управління теплом може змінювати швидкість охолоджуючого вентилятора та рециркуляційного насоса в координації з регулюванням перепускного клапана. Метою керування температурою є швидкий прогрів без перевищення температури труби та низької потужності допоміжного вентилятора та насоса.

Підсистема водного господарства

Завдання системи управління водою полягає в підтримці гідrataції полімерної мембрани та збалансуванні використання/споживання води в

системі. Величина потоку реагентів і води, що вводяться в потоки анода і катода, впливають на вологість мембрани. Сухі мембрани та залиті паливні елементи викликають високі поляризаційні втрати. Коли струм витягується з паливного елемента, молекули води утворюються на катоді та перетягуються від анода до катода протонами водню. Коли концентрація води в катоді збільшується, градієнт концентрації змушує воду дифундувати від катода до анода. Збурення вологості паливних елементів може бути спричинене різними механізмами: вода, що утворюється під час збільшення навантаження, зміни абсолютного та відносного тиску реагентів на мембрані, зміни швидкості повітряного потоку та зміни температури труби, які змінюють тиск насичення парів. Ці механізми вказують на сильну та нелінійну взаємодію між завданнями контролю вологості, контуром керування потоком реагентів, контуром керування теплом та контуром керування живленням. Зниження напруги на 20-40% може статися, якщо немає належного контролю зволоження.

Підсистема управління живленням

Підсистема управління живленням контролює потужність, що надходить від паливних елементів. Без урахування управління живленням струм навантаження можна розглядати як перешкоду для системи паливних елементів. Однак, як показано вище, споживаний струм безпосередньо впливає на інші підсистеми. Якщо акумулятор використовується як інше джерело живлення в системі, керування живленням між двома джерелами живлення може бути застосоване з метою забезпечення задовільного реагування транспортного засобу на перехідні процеси та допомоги системі паливних елементів.

Підсистема паливного процесора

Невідповідна інфраструктура для заправки, розподілу та зберігання водню робить технологію паливного процесора важливою частиною системи паливних елементів. Метанол, бензин і природний газ є прикладами палива, яке розглядається як джерела енергії паливних елементів. Рис. 1.6 ілюструє різні процеси, пов'язані з перетворенням вуглецевого палива на водень. Взаємодія між компонентами та багатьма додатковими приводами керування в паливному процесорі вносить додаткову складність у проблему керування. На додаток до

змінних паливних елементів, змінні паливного процесора, які потребують точного контролю, включають температуру реакторів і концентрацію водню та монооксиду вуглецю в газовому потоці.

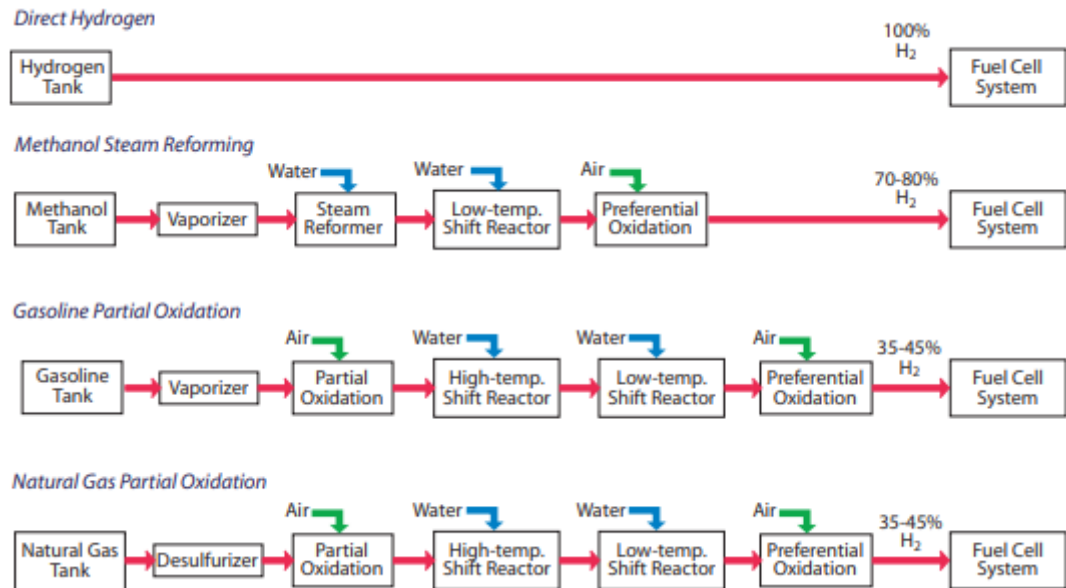


Рисунок 1.6 - Джерела палива для систем паливних елементів

2 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА

2.1 Модель системи паливних елементів та допоміжні компоненти

Моделі, розроблені спеціально для контрольних досліджень, мають певні характеристики. Важливі характеристики, такі як динамічні (перехідні) ефекти, включені, тоді як деякі інші ефекти, такі як просторова зміна параметрів, зосереджені та включені у форми звичайного диференціалу або різницевого рівняння. Крім того, в моделі інтегровані лише динамічні ефекти, пов'язані з роботою автомобіля. Відповідні постійні часу для системи паливних елементів PEM розміру автомобільної силової установки підсумовані в [1]

- Електрохімія $O(10-19\text{секунда})$
- Водневі та повітряні колектори $O(10-1\text{секунда})$
- Вміст води в мембрані O (неясно)
- Пристрої контролю потоку/наддуву $O(100\text{секунда})$
- Інерційна динаміка автомобіля $O(10^1\text{секунда})$
- Температура комірки та стека $O(10^2\text{секунда})$

де O означає порядок величини. Надзвичайно швидкі перехідні явища як електрохімічних реакцій, так і електричної динаміки електродів мають мінімальний вплив на застосування в автомобілях і ними можна ігнорувати. Перехідні процеси через динаміку наповнення колектора, вміст води в мембрані, пристрої наддуву та температуру можуть впливати на поведінку транспортного засобу, тому їх необхідно включити в модель. Взаємодії між процесами, якщо це необхідно, також включені. Однак, з відносно повільними відгуками, температуру комірки та стека можна розглядати як окрему систему керування, яка оснащена окремим контролером. Тоді температуру можна вважати константою для інших швидших підсистем.

Блок-схема системи, що показує блоки підсистеми разом із вхідними/вихідними сигналами, зображена на рис. 2.1. У цьому розділі пояснюються моделі кількох компонентів, зображених на малюнку. У цьому дослідженні ми зосереджуємося на підсистемі подачі реагентів і, таким чином, розроблені моделі компонентів, пов'язаних з цією підсистемою. Компонентні моделі для підсистеми управління теплом залишаються для подальшого вивчення. Рис. 2.2 ілюструє компоненти та потоки, пов'язані з підсистемою подачі реагентів.

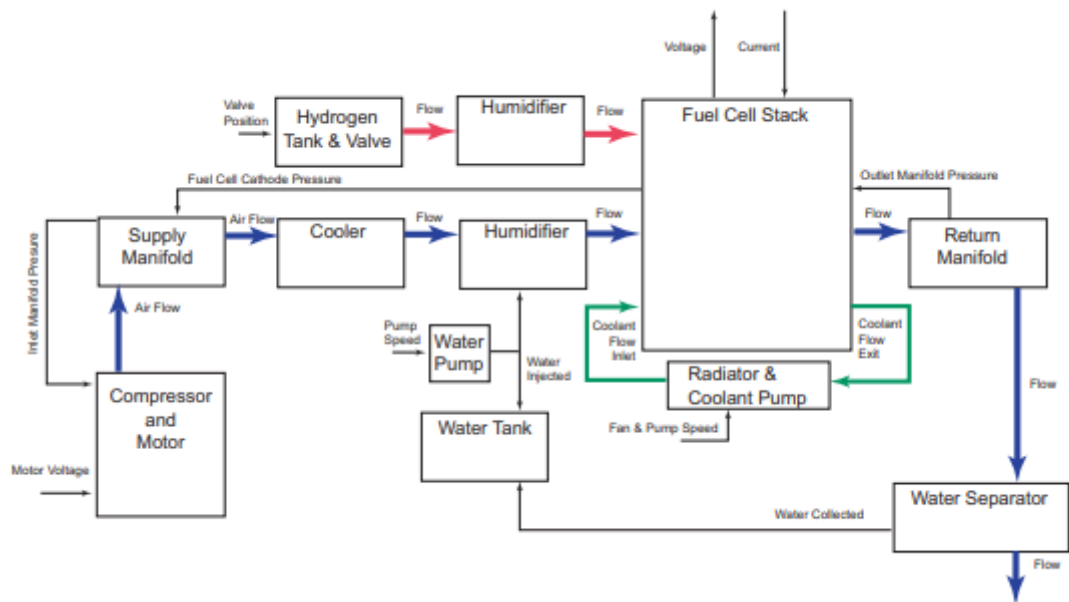


Рисунок 2.1 - Блок-схема системи

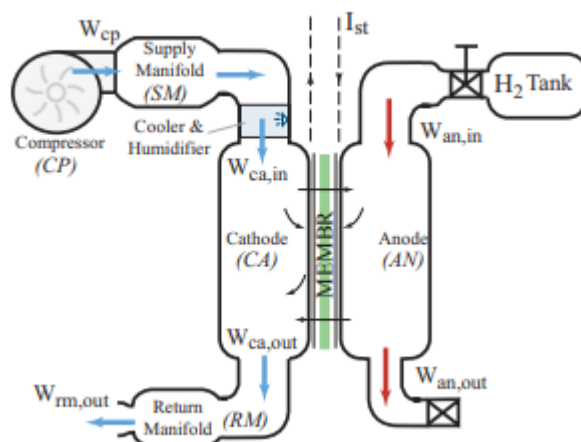


Рисунок 2.2 - Модель підсистеми подачі реагентів

Модель компресора

Модель компресора розділена на дві частини, як показано на рис. 2.3. Перша частина — це статична карта компресора, яка визначає швидкість потоку повітря через компресор. Термодинамічні рівняння потім використовуються для розрахунку температури повітря на виході та необхідної потужності компресора. Друга частина представляє інерцію компресора та двигуна та визначає швидкість компресора. Тому швидкість використовується в карті компресора для визначення масової витрати повітря.

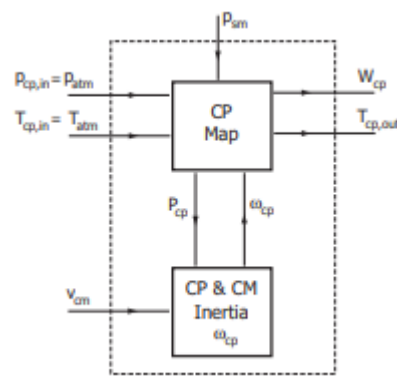


Рисунок 2.3 - Блок-схема компресора

Єдиним динамічним станом у моделі є швидкість компресора, ω_{cp} . Вхідні дані для моделі включають тиск повітря на вході, $p_{cp,in}$, його температуру, $T_{cp,in}$, команду напруги для двигуна компресора, v_{cm} , і тиск за потоком, який є тиском у колекторі подачі, $p_{cp,out} = p_{sm}$. Вхідне повітря, як правило, атмосферне, його тиск і температура вважаються фіксованими на рівні $p_{atm} = 1$ атм і $T_{atm} = 25$ °C відповідно. Команда двигуна є одним із входів системи паливних елементів. Тиск після потоку визначається моделлю колектора подачі.

Масова витрата повітря компресора, W_{cp} (кг/с), визначається за допомогою карти витрати компресора на основі співвідношення тиску в компресорі та швидкості компресора. Однак надання карти потоку компресора у формі таблиці пошуку не дуже підходить для моделювання

динамічної системи. Стандартні процедури інтерполяції не є безперервно диференційованими, а екстраполяція ненадійна. Тому для моделювання характеристик компресора використовується метод підгонки нелінійної кривої. У нашій моделі використовується метод Jensen & Kristensen.

Для відображення коливань умов входу компресора, якими є тиск потоку на вході та температура, «виправлені» значення масової витрати і швидкості компресора використовуються в компресорній карті. Виправлені значення – це скоригована швидкість компресора (об/хв) $N_{cr} = N_{cp}/\sqrt{\theta}$, скоригована масова витрата $W_{cr} = W_{cp}\sqrt{\theta}/\delta$, де скоригована температура $\theta = T_{cp,in}/288\text{ K}$ і скоригований тиск $\delta = p_{cp,in}/1\text{ atm}$. Використовуючи метод Єнсена та Крістенсена, спочатку визначається безрозмірний параметр напору Ψ :

$$\Psi = \frac{C_p T_{cp,in} \left[\left(\frac{p_{cp,out}}{p_{cp,in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}{\frac{1}{2} U_c^2} \quad (2.1)$$

де температура повітря на вході, $T_{cp,in}$, виражена в Кельвінах, а U_c — швидкість кінця лопаті компресора (м/с).

$$U_c = \frac{\pi}{60} d_c N_{cr} \quad (2.2)$$

d_c – діаметр компресора (м), γ – відношення питомих теплоємностей газу при постійному тиску, C_p/C_v , яке у випадку повітря дорівнює 1,4. Нормована швидкість потоку компресора, Φ , визначається як

$$\Phi = \frac{W_{cr}}{\rho_a \frac{\pi}{4} d_c^2 U_c} \quad (2.3)$$

де ρ_a – густина повітря (кг/м³). Нормована швидкість потоку компресора, Φ , потім корелюється з параметром напору, Ψ , за рівнянням

$$\Phi = \Phi_{max} \left(1 - \exp \left(-\beta \left(\frac{\Psi}{\Psi_{max}} - 1 \right) \right) \right) \quad (2.4)$$

де Φ_{max} , β і Ψ_{max} – поліноміальні функції від числа Маха M

$$\begin{aligned}
 \Phi_{max} &= a_4 M^4 + a_3 M^3 + a_2 M^2 + a_1 M + a_0 \\
 \beta &= b_2 M^2 + b_1 M + b_0 \\
 \Psi_{max} &= c_5 M^5 + c_4 M^4 + c_3 M^3 + c_2 M^2 + c_1 M + c_0
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

Число Маха на вході, M , визначається за допомогою

$$M = \frac{U_c}{\sqrt{\gamma R_a T_{cp,in}}}
 \tag{2.6}$$

де R_a – газова константа повітря. У рівнянні (2.5) a_i , b_i та c_i є коефіцієнтами регресії, отриманими підгонкою кривої даних компресора. Тоді масова витрата повітря в кг/с обчислюється за рівнянням (2.3):

$$W_{cr} = \Phi \rho_a \frac{\pi}{4} d_c^2 U_c
 \tag{2.7}$$

Параметри, які використовуються в моделі, наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Параметри карти компресора

Параметр	Значення	Одиниці
R_a	$2,869 \times 10^2$	Дж/(кг·К)
ρ_a	1.23	кг/м ³
d_c	0,2286	м

Модель компресора, яка використовується тут, для Компресор Allied Signal. Дані були отримані шляхом оцифрування карти компресора. Коефіцієнти регресії, отримані підгонкою кривої, наведені в таблиці 2.2. На рис. 2.4 показано, що схема підгонки кривої дуже добре відображає дані компресора.

Таблиця 2.2 - Коефіцієнти регресії карти компресора

Параметр	Значення
a_4	$-3,69906 \times 10^{-5}$
a_3a_2	$2,70399 \times 10^{-4}$
a_1a_0	$-5,36235 \times 10^{-4}$
b_2b_1	$-4,63685 \times 10^{-5}$
b_0b_5	$2,21195 \times 10^{-3}$
b_4b_3	1,76567
b_2b_1	-1,34837
b_0	2,44419
	$-9,78755 \times 10^{-3}$
	0,10581
	-0,42937
	0,80121
	-0,68344
	0,43331

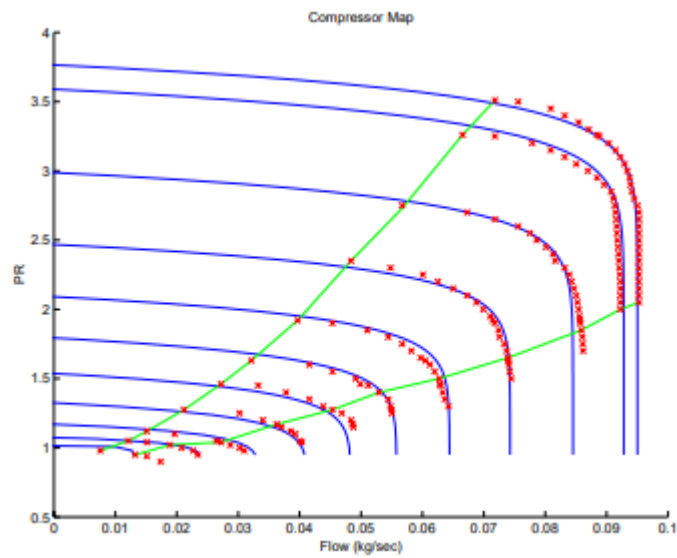


Рисунок 2.4- Карта компресора

Пошукова таблиця ефективності компресора, η_{cp} , використовується для визначення ефективності компресора за масовою витратою та коефіцієнтом тиску в компресорі. Максимальний ККД компресора 80%. Температура повітря, що виходить з компресора, розраховується за рівнянням:

$$T_{cp,out} = T_{cp,in} + \frac{T_{cp,in}}{\eta_{cp}} \left[\left(\frac{p_{cp,out}}{p_{cp,in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] = T_{atm} + \frac{T_{atm}}{\eta_{cp}} \left[\left(\frac{p_{sm}}{p_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (2.8)$$

Крутний момент, необхідний для приводу компресора, розраховується за допомогою термодинамічних рівнянь:

$$\tau_{cp} = \frac{C_p T_{atm}}{\omega_{cp} \eta_{cp}} \left[\left(\frac{p_{sm}}{p_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] W_{cp} \quad (2.9)$$

де τ_{cp} крутний момент, необхідний для приводу компресора в Нм
 C_p питома теплоємність повітря = 1004 Дж кг⁻¹ К⁻¹ γ відношення питомої теплоємності повітря = 1,4

Виведення рівнянь (2.8) і (2.9) є стандартними і їх можна знайти в літературі з термодинаміки або турбін.

Для представлення динамічної поведінки швидкості компресора використовується модель зосереджених параметрів обертання з інерцією:

$$J_{cp} \frac{d\omega_{cp}}{dt} = (\tau_{cm} - \tau_{cp}) \quad (2.10)$$

де J_{cp} - сумарна інерція компресора та двигуна (кг м²);

ω_{cp} швидкість компресора (рад/с);

τ_{cm} вхідний крутний момент двигуна компресора (Нм);

τ_{cp} крутний момент, необхідний для приводу компресора (Нм), розрахований у (2.9).

Крутний момент двигуна компресора розраховується за допомогою статичного рівняння двигуна:

$$\tau_{cm} = \eta_{cm} \frac{k_t}{R_{cm}} (v_{cm} - k_v \omega_{cp}) \quad (2.11)$$

де k_t , R_{cm} і k_v — константи двигуна, а η_{cm} — механічний ККД двигуна. Значення наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3: Компресорні параметри

Параметр	Значення
k_v	0,0153В/(рад/с)
k_t	0,0153 Нм/ампер
R_{cm}	0,82Ω
η_{cm}	98%

2.2 Зосереджена модель динаміки

Модель колектора представляє зосереджений об'єм, пов'язаний із трубами та з'єднаннями між кожним пристроєм. Об'єм колектора подачі включає об'єм труб між компресором і коміркою паливних елементів, включаючи об'єм охолоджувача та зволожувача (рис. 1.5). Зворотний колектор являє собою трубопровід на вихлопі паливних елементів.

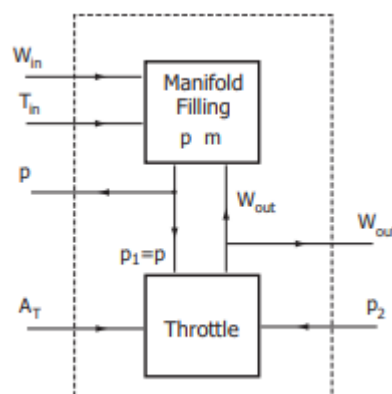


Рисунок 2.5 - Блок-схема колектора

Блок-схема моделі колектора показана на рис. 2.5. Для розробки моделі різноманіття використовується принцип збереження маси. Для будь-якого колектора,

$$\frac{dm}{dt} = W_{in} - W_{out} \quad (2.12)$$

де m – маса газу, накопиченого в об'ємі колектора, а W_{in} і W_{out} – масова швидкість потоку в колектор і з нього. Якщо ми припустимо, що температура повітря в колекторі постійна, T і дорівнює температурі потоку на вході, $T = T_{in}$, динаміка наповнення колектора відповідає ізотермічному співвідношенню:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{R_a T}{V} (W_{in} - W_{out}) \quad (2.13)$$

де R_a — газова постійна повітря, а V — об'єм колектора. Якщо очікується, що температура повітря зміниться в колекторі, динамічне рівняння тиску, яке виходить із закону збереження енергії та ідеального газу,

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\gamma R_a}{V} (W_{in} T_{in} - W_{out} T) \quad (2.14)$$

використовується на додаток до рівняння балансу маси (2.12). Температура повітря T у (2.14) обчислюється з m у (2.12) та p у (2.14) із застосуванням закону ідеального газу. Таким чином, якщо температура повітря в колекторі вважається постійною, рівняння (2.13) використовується для моделювання динаміки колектора. Якщо очікується зміна температури повітря, використовуються рівняння (2.12) і (2.14).

Рівняння потоку через сопло, використовується для розрахунку потоку на виході з колектора. Швидкість потоку через сопло є функцією тиску перед потоком, p_1 , і тиску внизу, p_2 , насадки. Характеристика потоку ділиться на дві області за критичним відношенням тиску:

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{crit} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (2.15)$$

де γ – відношення питомих теплоємностей газу, C_p/C_v . У випадку повітря $\gamma = 1,4$, а коефіцієнт критичного тиску дорівнює 0,528. Для докритичного потоку $\frac{p_2}{p_1} > \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$, де падіння тиску менше ніж

$$W = \frac{C_D A_T p_1}{\sqrt{RT_1}} \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \text{for } \frac{p_2}{p_1} > \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2.16)$$

Параметр C_D – коефіцієнт розряду сопла, A_T – площа розкриття сопла (m^2), R – універсальна газова стала. Для критичного потоку (або потоку з обмеженнями) масова швидкість потоку визначається як

$$W_{choked} = \frac{C_D A_T p_1}{\sqrt{RT_1}} \gamma^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad \text{for } \frac{p_2}{p_1} \leq \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2.17)$$

Графік W/W_{choked} показано пунктирною лінією на рис. 2.6.

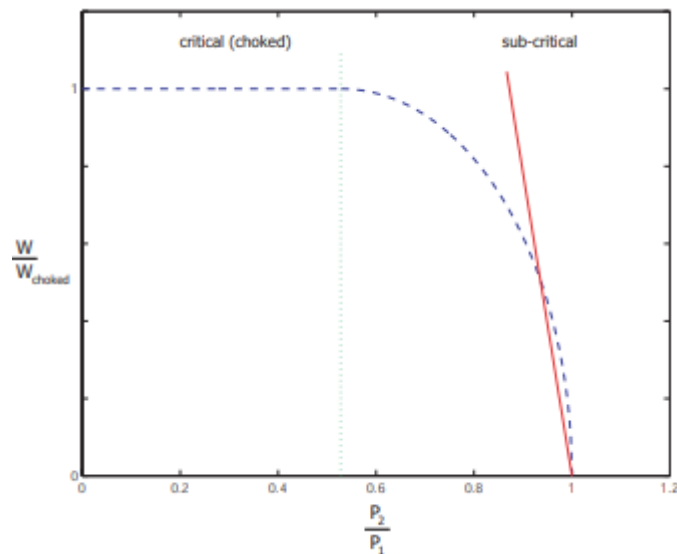


Рисунок 2.6 - Пунктирна лінія - відносна масова витрата як функція коефіцієнта тиску на форсунці. (2.16)-(2.17), Суцільна лінія - лінеаризована масова витрата при низькій різниці тиску (2.18)

Якщо різниця тиску між колектором і об'єм нижнього потоку невеликий і завжди потрапляє в докритичну область потоку, швидкість потоку можна розрахувати за допомогою лінеаризованої форми рівняння субкритичного потоку сопла (2.16)

$$W = k(p_1 - p_2) \quad (2.18)$$

де k – константа сопла. Графік лінеаризованого рівняння (2.18) для різних тисків у колекторі показано на рисунку 2.7 суцільною лінією в порівнянні з графіком рівняння (2.16), показаним пунктирною лінією.

Колектор подачі

Для колектора подачі масова витрата на вході – це витрата компресора, W_{cp} , а масова витрата на виході – $W_{sm,out}$. Оскільки різниця тиску між живильним колектором і катодом відносна маленька

$$W_{sm,out} = k_{sm,out}(p_{sm} - p_{ca}) \quad (2.19)$$

де $k_{sm,out}$ — константа потоку на виході з колектора подачі. Оскільки температура повітря в колекторі подачі висока, очікується, що температура повітря в колекторі зміниться. Таким чином, рівняння (2.12) і (2.14) використовуються для моделювання колектора подачі

$$\frac{dm_{sm}}{dt} = W_{cp} - W_{sm,out} \quad (2.20)$$

$$\frac{dp_{sm}}{dt} = \frac{\gamma R_a}{V_{sm}} (W_{cp} T_{cp,out} - W_{sm,out} T_{sm}) \quad (2.21)$$

де V_{sm} — об'єм подавального колектора, а T_{sm} — температура повітря в подавальному колекторі, яка розраховується з m_{sm} і p_{sm} із застосуванням закону ідеального газу. Показано блок-схему живильного колектора сопла на рис. 2.8.

Зворотний колектор

Температура повітря, що виходить із труби, відносно низька порівняно з повітрям, що виходить із компресора.

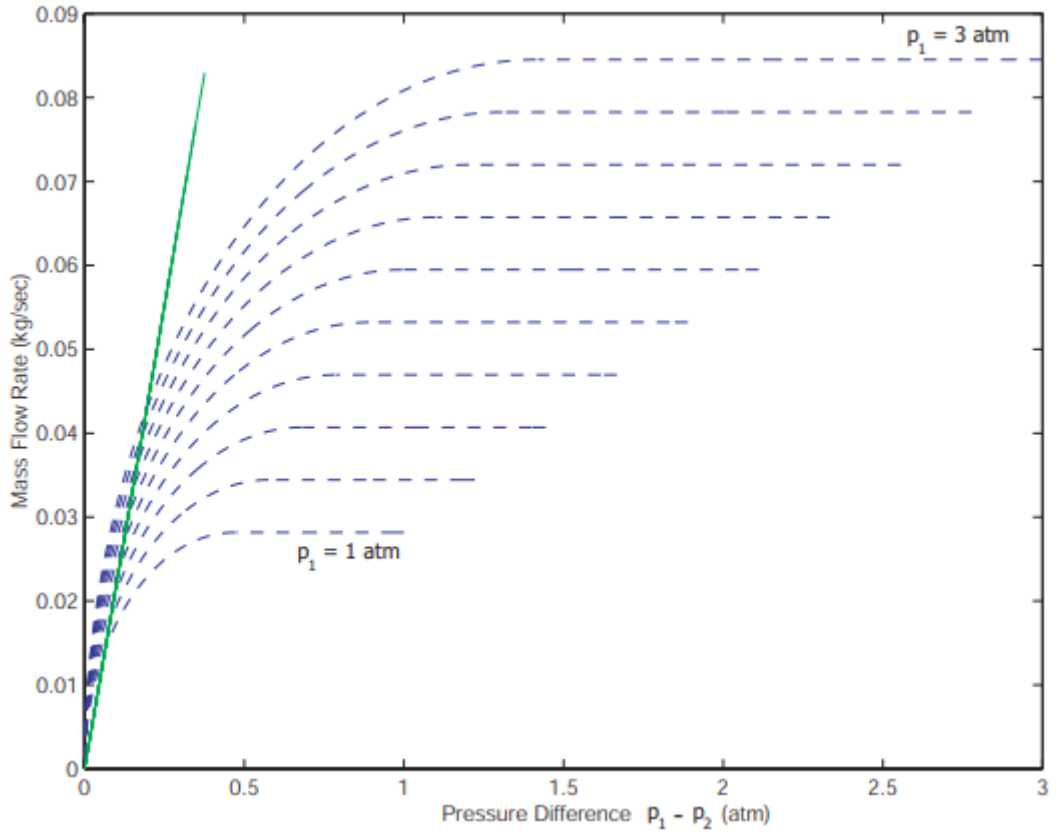


Рисунок 2.7 - Порівняння швидкості потоку сопла за нелінійним і лінійним рівняннями.

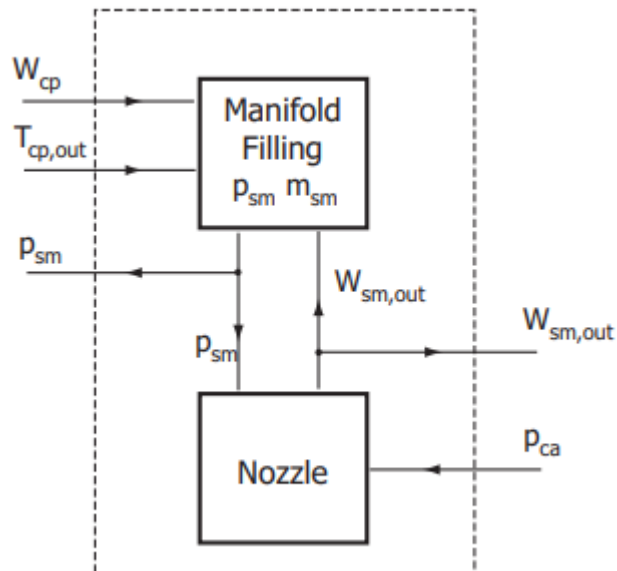


Рисунок 2.8: Блок-схема колектора подачі

Таким чином, зміни температури повітря у зворотному колекторі є незначними, а тиск у зворотному колекторі моделюється за

$$\frac{dp_{rm}}{dt} = \frac{R_a T_{rm}}{V_{rm}} (W_{ca,out} - W_{rm,out}) \quad (2.22)$$

де V_{rm} - об'єм зворотного колектора, а T_{rm} - температура газу в зворотному колекторі. Потік, що надходить у зворотний колектор, $W_{ca,out}$, обчислюється за рівнянням (3.47), яке має таку саму форму, що й рівняння (2.19). Масовий потік на виході зворотного колектора регулюється рівняннями для сопла (дроселя) (2.16)-(2.17). Масова витрата на виході є функцією тиску в колекторі, p_{rm} , і тиску за потоком від колектора, який вважається фіксованим на p_{atm} . Оскільки перепад тиску між зворотним колектором і атмосферою є відносно великим, рівняння потоку на виході зворотного колектора є

$$W_{rm,out} = \frac{C_{D,rm} A_{T,rm} p_{rm}}{\sqrt{R T_{rm}}} \left(\frac{p_{atm}}{p_{rm}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p_{atm}}{p_{rm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \text{for} \quad \frac{p_{atm}}{p_{rm}} > \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2.23)$$

Площа відкриття дросельної заслінки $A_{T,rm}$ може бути встановлена постійною або може використовуватися як додаткова керуюча змінна для регулювання тиску в зворотному колекторі, а отже, тиску на катоді. Значення $C_{D,rm}$ і номінальне значення $A_{T,rm}$, що використовуються в моделі, наведені в таблиці 4.1. Блок-схема моделі зворотного колектора показана на рисунку 2.9.

Тиск, розрахований у моделі подавального колектора, використовується для визначення в моделі компресорного коефіцієнта тиску в компресорі. Тиск у зворотному колекторі, розрахований у моделі зворотного колектора, використовується для визначення швидкості потоку, що виходить з катода паливного елемента. Модель катода разом з іншими частинами блоку паливних елементів буде описано в наступному розділі.

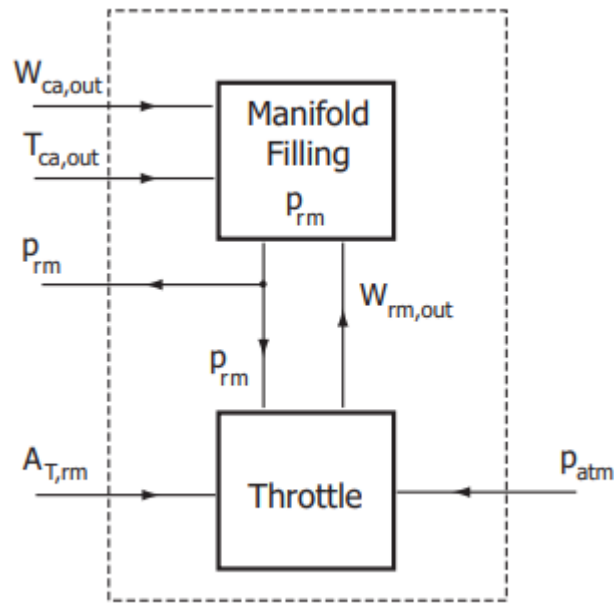


Рисунок 2.9 - Блок-схема зворотного колектора

Огляд термодинаміки газових сумішей

У цьому підрозділі ми розглядаємо основні термодинамічні властивості газових сумішей, які ми широко використовуємо в моделі. Ми також зосереджуємося на суміші газів і водяної пари.

Тут ми розглянемо властивості ідеальних газів. Зокрема, кожен компонент суміші не залежить від присутності інших компонентів, і кожен компонент можна розглядати як ідеальний газ.

Розглянемо суміш газу А і газу В. З закону ідеального газу ми маємо

$$pV = n\bar{R}T = mRT \quad (2.25)$$

де p — тиск газу, V — об'єм газу, n — кількість молей газу, m — маса газу, \bar{R} — універсальна газова стала, R — газова стала, T — газ температура. Загальна кількість молей суміші дорівнює сумі кількості молей кожного компонента:

Якщо розглядати кожен компонент як ідеальний газ, то для кожного компонента виконується закон у рівнянні (2.25):

$$n = n_A + n_B. \quad (2.26)$$

де p_A і p_B — парціальні тиски. Підставляючи рівняння (2.25) і (2.27) у рівняння (2.26), отримуємо

$$\begin{aligned} p_A V &= n_A \bar{R} T \\ p_B V &= n_B \bar{R} T \end{aligned} \quad (2.27)$$

Таким чином, для суміші ідеальних газів тиск суміші є сумою парціальних тисків окремих компонентів.

Розглянемо тепер суміш повітря і водяної пари. Коефіцієнт вологості ω визначається як відношення маси водяної пари m_v до маси сухого повітря m_a :

$$p = p_A + p_B \quad (2.28)$$

Загальна маса суміші $m_a + m_v$. Коефіцієнт вологості не дає належного уявлення про вологість суміші, оскільки максимальна кількість водяної пари, яку може утримувати повітря (насичення), залежить від температури та тиску повітря. Тому відносна вологість, яка представляє кількість води в повітрі відносно максимально можливої кількості, використовується більш широко. Відносна вологість, ϕ , визначається як відношення молярної частки водяної пари в суміші до молярної частки пари в насиченій суміші при тій самій температурі та тиску. У припущенні ідеальних газів визначення зводиться до відношення парціального тиску водяної пари, p_v , у суміші до тиску насичення пари при температурі суміші

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (2.29)$$

Тиск насичення, p_{sat} , залежить від температури і легко отримати з термодинамічної таблиці пари. У моделі тиск насичення розраховується з рівняння форми. Дані про тиск насичення використовуються для отримання коефіцієнтів у рівнянні:

$$\phi = \frac{p_v}{p_{sat}} \quad (2.30)$$

де тиск насичення, p_{sat} , у кПа, а температура, T , у Кельвінах.

Співвідношення між відношенням вологості та відносною вологістю можна вивести із закону ідеального газу:

$$\log_{10}(p_{sat}) = -1.69 \times 10^{-10} T^4 + 3.85 \times 10^{-7} T^3 - 3.39 \times 10^{-4} T^2 + 0.143 T - 20.92 \quad (2.31)$$

де M_u і M_a , обидва в кг/моль, є молярною масою пари та сухого повітря відповідно. Використовуючи рівняння (2.28) і (2.30), відносну вологість можна розрахувати за тиском сухого повітря та співвідношенням вологості

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{p_v V / R_v T}{p_a V / R_a T} = \frac{R_a p_v}{R_v p_a} = \frac{M_v p_v}{M_a p_a} \quad (2.32)$$

Є дві проблеми, на які слід звернути увагу. По-перше, відносна вологість, що дорівнює одиниці, означає, що суміш насичена або повністю зволожена. Якщо в суміші буде більше води, додаткова кількість води конденсуватиметься в рідку форму. По-друге, з припущенням ідеального газу різні компоненти в суміші можна розглядати окремо під час виконання розрахунків внутрішньої енергії та ентальпії.

2.3 Модель повітроохолоджувача (статична).

Температура повітря в колекторі подачі зазвичай висока через високу температуру повітря, що виходить із компресора. Щоб запобігти будь-якому пошкодженню мембрани паливного елемента, повітря потрібно охолодити до робочої температури бака. У цьому дослідженні ми не розглядаємо ефекти теплопередачі, тому ми припускаємо, що ідеальний повітроохолоджувач підтримує температуру повітря, що надходить у трубу, на рівні $T_{cl} = 80$ °C. Припускається, що в охолоджувачі немає падіння тиску, $p_{cl} = p_{sm}$. Оскільки зміна температури впливає на вологість газу, розраховується вологість газу, що виходить з охолоджувача.

$$\phi_{cl} = \frac{p_{v,cl}}{p_{sat}(T_{cl})} = \frac{p_{cl}p_{v,atm}}{p_{atm}p_{sat}(T_{cl})} = \frac{p_{cl}\phi_{atm}p_{sat}(T_{atm})}{p_{atm}p_{sat}(T_{cl})} \quad (2.33)$$

де $\phi_{atm} = 0,5$ – середня відносна вологість навколишнього повітря, а $p_{sat}(T_i)$ – тиск насичення паром, який є функцією температури, T_i .

2.4 Модель зволожувача (статична).

Повітряний потік із охолоджувача зволожується перед входом у трубу шляхом упорскування води в повітряний потік у зволожувачі. Тут об'єм зволожувача невеликий, тому його можна розглядати як частину об'єму колектора подачі. Статична модель зволожувача використовується для розрахунку зміни вологості повітря за рахунок додатково введеної води. Температура потоку вважається постійною, тому $T_{hm} = T_{cl}$. Припускається, що вода, що вводиться, знаходиться у формі пари або прихована теплота випаровування враховується в повітроохолоджувачі. Виходячи з умов потоку, що виходить з охолоджувача ($W_{cl} = W_{sm,out}$, p_{cl} , T_{cl} , ϕ_{cl}), масової витрати сухого повітря, $W_{a,cl}$, масової витрати пари, $W_{y,cl}$, і тиску сухого

повітря, $p_{a,cl}$, можна розрахувати, використовуючи термодинамічні властивості. Тиск насичення паром розраховується з температури потоку за допомогою рівняння 2.31. Потім тиск пари визначається за допомогою рівняння (2.30):

$$p_{v,cl} = \phi_{cl} p_{sat}(T_{cl}) \quad (2.35)$$

Оскільки вологе повітря є сумішшю сухого повітря та пари, парціальний тиск сухого повітря є різницею між загальним тиском і тиском пари:

$$p_{a,cl} = p_{cl} - p_{v,cl} \quad (2.36)$$

Потім можна розрахувати коефіцієнт вологості

$$\omega_{cl} = \frac{M_v p_{v,cl}}{M_a p_{a,cl}} \quad (2.37)$$

де M_a - молярна маса сухого повітря (28.8410 - 3кг/моль). Масова витрата сухого повітря і пари з охолоджувача становить

$$W_{a,cl} = \frac{1}{(1 + \omega_{cl})} W_{cl} \quad (2.38)$$

$$W_{v,cl} = W_{cl} - W_{a,cl} \quad (2.39)$$

Масова витрата сухого повітря залишається незмінною на вході та виході зволожувача, $W_{a,hm} = W_{a,cl}$. Швидкість потоку пари збільшується на кількість введеної води

$$W_{v,hm} = W_{v,cl} + W_{v,inj} \quad (2.40)$$

Тиск пари також змінюється і може бути розрахований за допомогою рівняння (2.32):

$$p_{v,hm} = \omega_{cl} \frac{M_a}{M_v} p_{a,cl} = \frac{W_{v,hm}}{W_{a,cl}} \frac{M_a}{M_v} p_{a,cl} \quad (2.41)$$

Потім тиск пари, $p_{v,hm}$, можна використовувати для визначення відносної вологості вихідного потоку

$$\phi_{hm} = \frac{p_{v,hm}}{p_{sat}(T_{hm})} = \frac{p_{v,hm}}{p_{sat}(T_{cl})}. \quad (2.42)$$

Оскільки тиск пари зростає, загальний тиск також зростає. Таким чином,

$$p_{hm} = p_{a,cl} + p_{v,hm} \quad (2.43)$$

Швидкість потоку на виході зволожувача визначається безперервністю маси

$$W_{hm} = W_{a,cl} + W_{v,hm} = W_{a,cl} + W_{v,cl} + W_{v,inj} \quad (2.44)$$

Потік, що виходить із зволожувача, потрапляє на катод паливного елемента, і, таким чином, у наступному розділі зволожувачвихідний потік називається потоком на вході катода (ca, in), наприклад, $W_{ca,in} = W_{hm}$ і $\phi_{ca,in} = \phi_{hm}$.

3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Контроль повітряного потоку для реагенту кисню катода паливного елемента

У системі паливних елементів (FCS) є три основні контури підсистеми керування, які регулюють подачу повітря/палива, управління водою та управління теплом. Тут ми припускаємо ідеальний зволожувач потоку повітря/палива, а також охолоджувач вхідного повітря та труби. Ці ідеальні умови реалізуються в імітаційній моделі шляхом фіксації деяких змінних або використання простих статичних контролерів, описаних у попередньому розділі. Крім того, швидкий пропорційний регулятор зворотного зв'язку щодо потоку палива гарантує, що тиск на аноді дорівнює тиску на катоді майже миттєво після будь-якої зміни тиску на боці катода. Усі ці контролери та припущення, які аж ніяк не є тривіальними для реалізації в реальній системі, дозволяють нам зосередитися на контролі надходження кисню до катода.

У цій главі ми зосереджуємося на підсистемі подачі повітря паливного елемента (FC), щоб регулювати (і поповнювати) кисень, який виснажується з катода FC під час виробництва електроенергії, і, зокрема, на поточних вимогах системи управління живленням автомобіля. Це завдання має бути досягнуто швидко та ефективно, щоб уникнути кисневого голодування та продовжити термін служби стека. Кисневе голодування є складним явищем, яке виникає, коли парціальний тиск кисню падає нижче критичного рівня в будь-якому можливому місці в межах меандру повітряного потоку в катоді. Це можна спостерігати за швидким зниженням напруги клітини, що у важких випадках може спричинити коротке замикання та гарячу точку на поверхні клітини мембрани. Перед тим, як станеться ця катастрофічна подія, система

діагностики стека, яка контролює напругу окремої комірки, видаляє струм із стека або запускає «відключення».

Незважаючи на те, що це явище є просторовим варіантом, багато хто вважає, що його можна уникнути, регулювання коефіцієнта надлишку кисню в катоді, λ_{O_2} , яка є зосередженою (просторово незмінною) змінною.

Цього можна досягти, керуючи двигуном компресора для забезпечення повітрям і, отже, киснем, який виснажується через струм, що витягується з паливного елемента. Як показано в попередньому розділі, існує коефіцієнт надлишку кисню, який максимізує чисту потужність від системи FC (генерована потужність FC мінус споживана потужність двигуна компресора) для кожного споживаного струму, $\lambda_{O_2des} = \lambda_{O_2des}(Ist) O_2 O_2$.

Для спрощення ми припускаємо поки що фіксоване $\lambda_{O_2des} = 2$. У майбутньому пошук екстремуму або інші методи визначення максимуму можна буде використовувати для пошуку в режимі онлайн оптимального рівня надлишкового кисню. Зверніть увагу, що в системі подачі повітря низького тиску, наприклад, за допомогою повітродувки, тиск відсутній варіації, регулювання λ_{O_2} відповідає регулюванню парціального тиску кисню.

Проблема керування є складною через обмеження приводу та датчика. Змінні, якими маніпулює за допомогою приводу, знаходяться вище за течією, де збурення впливає на змінну продуктивності (рис. 3.1), обмежуючи реалістичні можливості системи подавлення збурень. Враховуючи, що екзогенний вхід (струм стека) вимірюється, контролер прямого зв'язку, який скасовує вплив співвідношення струму до надлишку кисню, теоретично можливий. Конструкція такого ідеального контролера, який відтепер називається контролером «скасування», базується на інвертуванні лінеаризованої моделі заводу. Також представлено продуктивність і обмеження контролера прямого зв'язку скасування.

Контролер із двома ступенями свободи (2DOF) розроблено на основі статичного попереднього компенсатора і вбудованого контролера вихідного зворотного зв'язку на основі спостерігача.

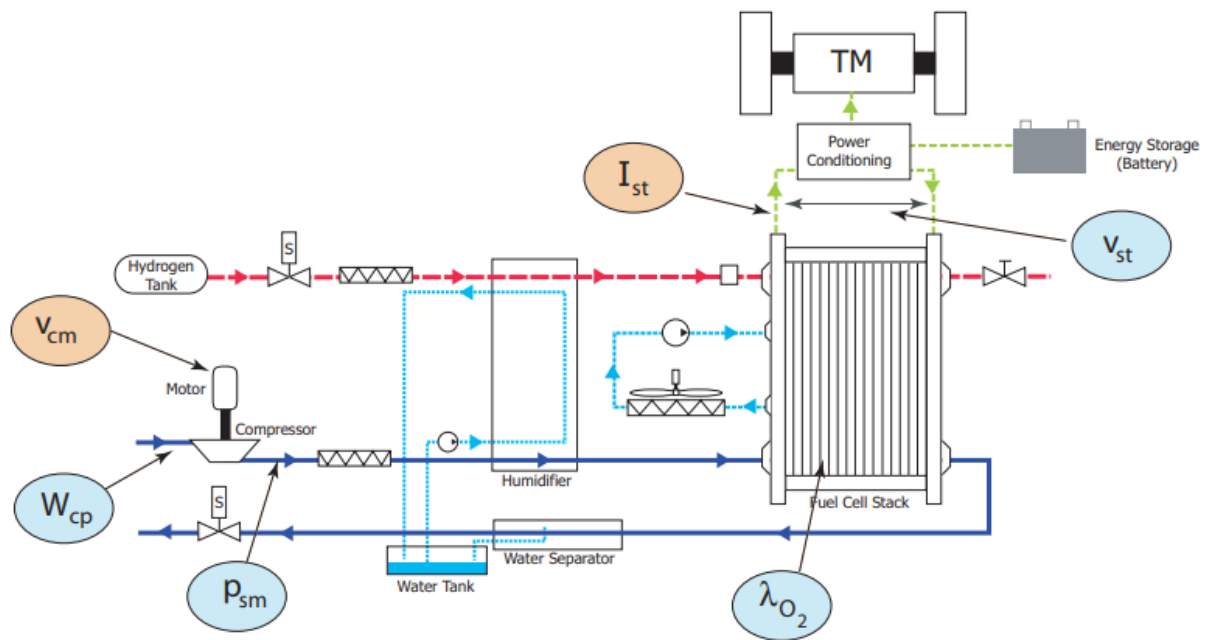


Рисунок 3.1 - Система паливних елементів, що показує входи та виходи керування

Тут виникає проблема тому, що не всі стани, ані змінна продуктивності λ_{O_2} , вимірюються. Крім того, традиційно використовувані вимірювання для λ_{O_2} регулювання вище за змінною продуктивності через труднощі з визначенням у потоці, насиченому паром. Напруга FCS збільшує спостережуваність системи і, таким чином, забезпечує більш високий регулятор посилення що покращує перехідний λ_{O_2} регулювання та міцність значно. В даний час використовується напруга в діагностичних і аварійних процедур відключення через його швидку реакцію на кисневе голодування, але ми чітко визначаємо його корисність і використання в дизайні зворотного зв'язку.

Напруга FCS є природним вимірюванням зворотного зв'язку для повітряного контролера FCS, і, оглядаючи наші результати, можна

розглядати його як одну зі змінних продуктивності FCS. Швидке регулювання напруги FCS до бажаного значення може бути непрямим показником хорошого рівня концентрації кисню в катоді FCS. Однак регулювання напруги FC під час поточних вимог може створити нездійсненні задані значення потужності та призвести до нестабільності.

Окрім ознаки кисневого голодування, напруга FCS є важливою змінною продуктивності FCS. Зокрема, FCS розглядається як джерело живлення від перетворювача DC/DC або іншої силової електроніки, підключеної до нього, як показано на рис. 3.1. Його функція передачі струм-напруга визначає «якість електроенергії» FC як джерела живлення. Повітряний контролер, розроблений у цьому розділі, впливає на функцію передачі струму на напругу в замкнутому контурі. У цій главі ми показуємо, що контролер зворотного зв'язку на основі спостерігача з вимірюванням напруги нагадує пасивне резистивне джерело живлення, тобто для всіх кроків струму до 0,3 рад/с напруга FCS поводить себе як $V_{st} = R_{st}I_{st}$ з невеликим $R_{st} = 0,05$ Ом. Тепер цей результат може бути використаний дослідниками, які проектують силову електроніку для підключення FCS до двигуна/генератора постійного струму або змінного струму для передачі енергії. Існує також великий інтерес з боку генеруючої спільноти до динаміки системи FCS при підключенні до мережі гетерогенних джерел електроенергії. Багато досліджень дотепер використовували статичну поляризаційну криву для відношення струму до напруги, яка передбачає ідеальний або неіснуючий регулятор потоку реагенту FC.

Аналізуємо компроміс між коефіцієнтом надлишку кисню та паразитними втратами системи FCS під час перехідних умов. А саме, потужність, яка використовується нагнітачем, є паразитною втратою для стека FC. Ми показуємо, що є мінімізація цих паразитних втрат і забезпечення швидкого регулювання потоку повітря суперечливі цілі. Конфлікт виникає через те, що нагнітач використовує частину потужності

стека для прискорення. Одним із способів вирішення цього конфлікту є доповнення системи FC допоміжною батареєю або ультраконденсатором, який може керувати допоміжними пристроями або може потенційно буферизувати FC від перехідних вимог струму. Ці додаткові компоненти, однак, створять складність і додаткова вага, яка може не знадобитися. Щоб зважено прийняти рішення щодо архітектури системи та розміру компонентів, ми аналізуємо компроміс між двома цілями за допомогою методів лінійного керування. Потім ми показуємо, що необхідно знайти компроміс між кисневим голодуванням і чистою потужністю FC для перехідних процесів, швидших за 0,7 рад/с (рис. 3.3). Іншими словами, якщо необхідна чиста характеристика потужності, яка є швидшою за 1,4 секунди постійної часу, наш аналіз пропонує використовувати допоміжне джерело живлення, наприклад акумулятор або конденсатор. Хоча ця відповідь є специфічною для нашої системи, наша процедура аналізу є загальною та може бути застосована до інших систем паливних елементів.

Постановка задачі контролю

Як обговорювалося в попередній главі, метою проектування комбінованого керування є визначення компресоравхідна напруга двигуна, v_{cm} , для того, щоб підтримувати $\lambda_{O_2} = 2$ і досягати бажаного нетто системи паливних елементів потужність, P_{ref} . Бажана корисна потужність може бути

переведена в необхідний струм стека $I_{st} = f_{I_{st} P_{net}^{ref}}(P_{net}^{ref})$. Тоді струм розглядається як зовнішній вхідний сигнал або збурення системи.

Результуюча задача керування визначається наступним чином (рис. 5.2):

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u, w) && \text{State Equations} \\ x &= [m_{O_2} \quad m_{H_2} \quad m_{N_2} \quad \omega_{cp} \quad p_{sm} \quad m_{sm} \quad m_{w,an} \quad m_{w,ca} \quad p_{rm}]^T \\ u &= v_{cm} \\ w &= I_{st} \end{aligned}$$

(3.1)

Потенційні вимірювання включають швидкість потоку повітря через компресор, W_{cp} , тиск у живильному колекторі, p_{sm} , і напругу в трубі, v_{st} .

$$y = [W_{cp} p_{sm} v_{st}]^T = h_y(x, u, w) \quad (3.2)$$

$$z = [e_{P_{net}} \lambda_{O_2}]^T = h_z(x, u, w) \quad (3.3)$$

де $e_{P_{net}}$ визначається як різниця між бажаною та фактичною чистою потужністю системи, тобто $e_{P_{net}} = P_{net}^{ref} - P_{net}$. Рис. 5.1 ілюструє розташування змінних у (5.2).

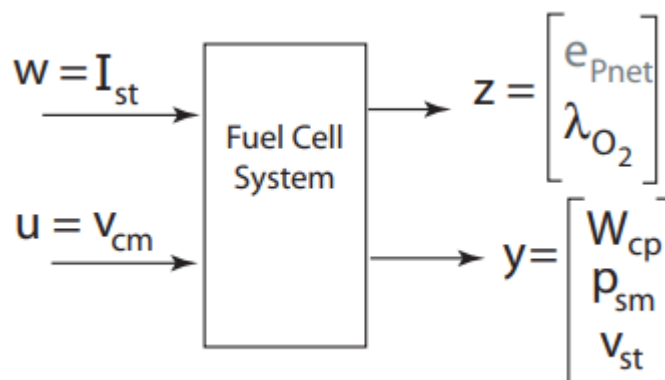


Рисунок 3.2 - Формулювання задачі керування

Ми визначаємо дві цілі керування $e_{P_{net}} = 0$ і $\lambda_{O_2} = 2$, але зосереджуємося на проблемі використання напруги двигуна компресора, v_{st} , для регулювання коефіцієнта надлишку кисню для перших розділів цієї глави. Зауважте, що обидві цілі можна досягти в усталеному стані, але їхні перехідні процеси значно відрізняються, і, отже, не можуть бути досягнуті одночасно за допомогою одного керуючого приводу. Мета досягнення бажаної перехідної чистої потужності системи ігнорується в першій частині розділу, яка представляє випадок, коли система керування живленням може покладатися на вторинне джерело живлення, таке як батарея. Компроміс між двома змінними продуктивності, тобто $e_{P_{net}}$ і λ_{O_2} , обговорюється в нижче.

Конфігурації керування

Різні схеми керування для системи паливних елементів показано на малюнку 5.3. Тому що струм, який діє як збурення для λ можна виміряти статичну функцію, яка корелює значення стану між керуючим входом, v_{cm} , і збуренням, I_{st} , можна використовувати в прямому шляху. Цю статичну передачу даних легко реалізувати за допомогою таблиці пошуку (показано на рис. 5.3(a)).

Розрахунок статичного прямого зв'язку базується на знаходженні команди напруги компресора, v^* , який забезпечує потік повітря, який поповнює потік кисню, який, у свою чергу, виснажується реакцією протонів водню з молекулами кисню під час поточної команди, I_{st} . Для конкретних умов навколишнього середовища (тиск, температура та вологість) необхідний потік повітря можна розрахувати аналітично від струму стека, $W^* = f_{cp}(I_{st})$, на основі електрохімічних і термодинамічних принципів. Інверсія компресора та карт двигуна компресора, щоб знайти $v^* = f_{cm}(I_{st})$, що дає бажане значення потоку повітря, W^* , не є тривіальним. Нелінійне моделювання або тестування в експериментальній установці може визначити статичний контролер прямого зв'язку від «w до u», який скасовує ефект «w до z2» у стаціонарному стані (нульова частота).

На рис. 5.4 показана реакція на перешкоди на одиничний крок системи з прямим керуванням порівняно з системою без керування. Змінні, зображені на графіку, являють собою відхилення від номінального змінних продуктивності. Оскільки ми не маємо особливих вимог до $z_2 = \lambda_{O_2}$ ми шукаємо найкраще можливе придушення завад, якого можна досягти за допомогою контролера «w до u», який скасовує завади від «w до z2» на всіх частотах. Це скасування контролера може бути реалізований як динамічний упереджений канал, як показано на малюнку 5.3(b). Конструкція контролера динамічного прямого зв'язку представлена нижче. Він заснований на інверсії

лінійної системи з входом і виходом навколо пунктирної області на малюнку 5.3(b).

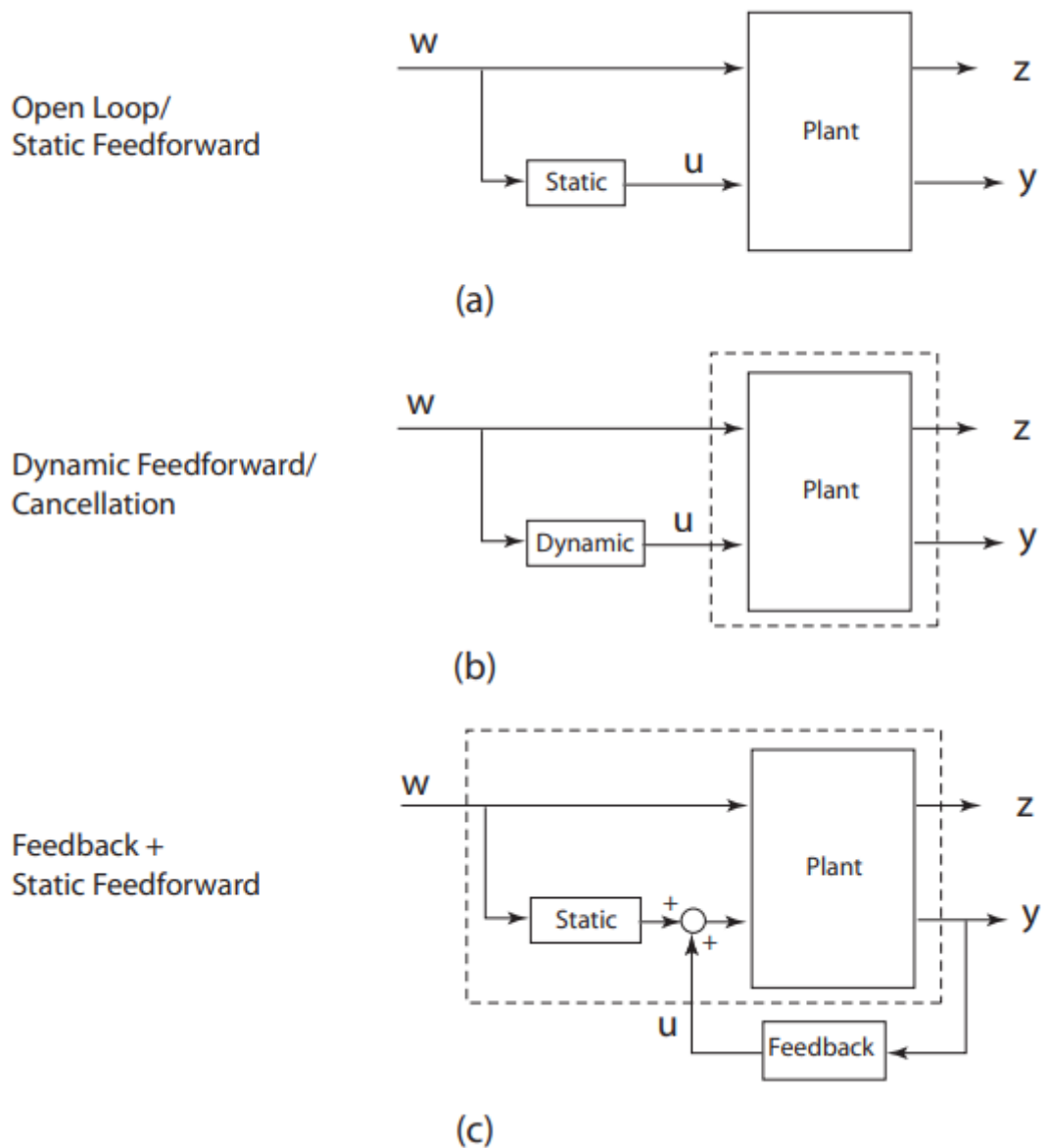


Рисунок 3.3 - Різні конфігурації керування

І статичні, і динамічні контролери прямого зв'язку страждають від чутливості до помилок моделювання, старіння пристрою та коливань навколишніх умов. Це погіршує стійкість системи, тобто продуктивність в умовах невизначеності. Для підвищення надійності системи додано контроль зворотного зв'язку. Рис. 5.3(c) показує конфігурація управління зворотним

зв'язком. Лише вимірювані змінні, u , повертаються до контролера. Статичний прямий зв'язок вважається частиною установки. Таким чином, для дизайну керування зворотним зв'язком лінеаризація виконується для входів і виходів навколо пунктирної рамки на малюнку 5.3(с), яка охоплює статичну карту прямого зв'язку. Зауважте, що замість динамічного прямого передавання використовується статичне. Якщо використовується динамічний прямий зв'язок, лінеаризація дасть установку вищого порядку, оскільки існує додаткова динаміка, внесена динамічним прямим зв'язком.

Простота статичного прямого зв'язку (керування з відкритим контуром) з повільним пропорційно-інтегральним (PI) контролером є дуже бажаною, і, таким чином, створює основу для порівняння продуктивності різних контролерів у наступних розділах. Завдяки повільному ПІ-регулятору поведінку системи з замкнутим контуром визначає тільки статична пряма подача. Звідси реакція системи статикою

упередження (керування з відкритим контуром), показане на малюнку 5.4, відтепер вважається базовим контролером. Зверніть увагу, що перевищення в z_2 є несприятливим, оскільки для створення цього непотрібного перевищення використовується надлишкова потужність. Більше того, перевищення коефіцієнта надлишку O_2 еквівалентно голодуванню O_2 , коли система піддається збуренню, що знижується.

Лінеаризація

Аналіз системи LTI в наборі інструментів системи управління MATLAB/Simulink використовується для лінеаризації нелінійної системи, розробленої вище. Номінальна робоча точка вибирається, коли чиста потужність системи становить $z_0 = 40$ кВт, а коефіцієнт надлишку кисню становить $z_0 = 2$. Вхідні дані, які відповідають цьому робочою точкою є струм стека при $w_0 = 191$ А та напруга двигуна компресора при $u_0 = f_{cm}(191) = 164$ В на основі статичної конструкції контролера прямого зв'язку, розглянутої в попередньому розділі.

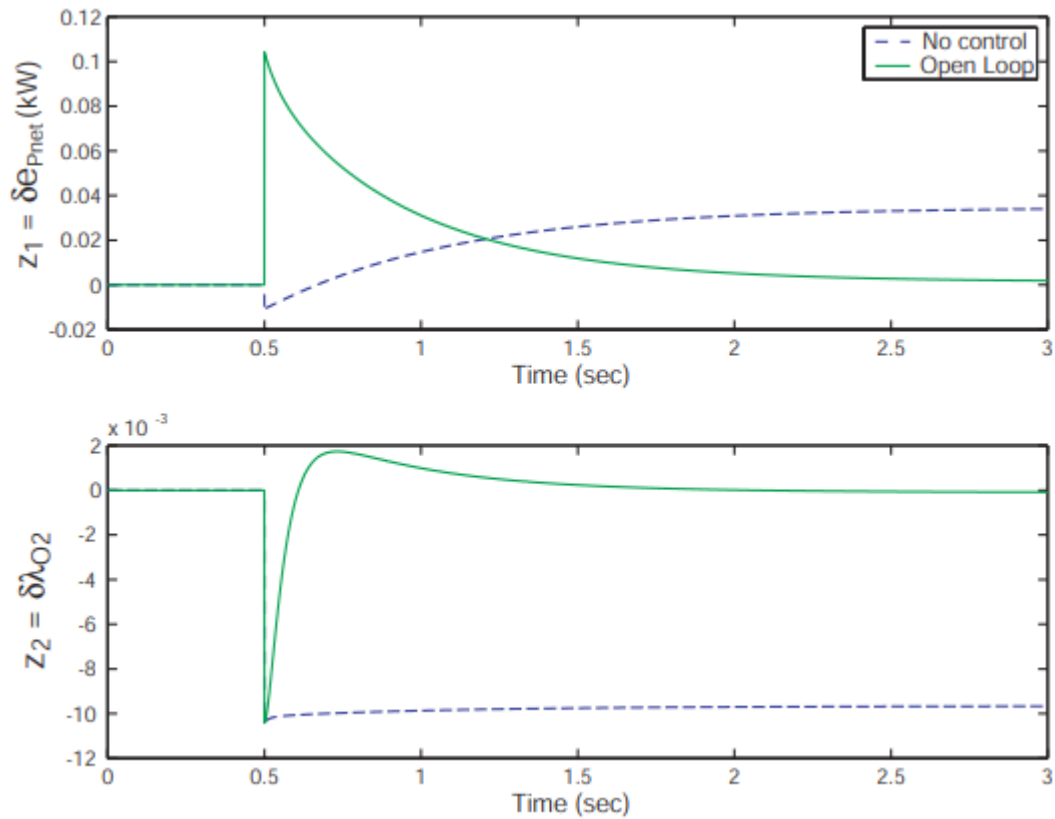


Рисунок 5.4 - Порівняння між системою без контролю та системою зі статичним прямим зв'язком

Позначимо також номінальні стани рівноваги системи для номінальних входів w_0 і u_0 . Лінійна модель є

$$\begin{aligned}
 \delta \dot{x} &= A\delta x + B_u\delta u + B_w\delta w \\
 \delta z &= C_z\delta x + D_{zu}\delta u + D_{zw}\delta w \\
 \delta y &= C_y\delta x + D_{yu}\delta u + D_{yw}\delta w
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

де $\delta(\cdot) = (\cdot) - (\cdot)_0$ представляє відхилення від номінального значення.

Стан, x , вимірювання, p , змінні продуктивності, z , вхід, u , і збурення, w , є

$$x = \left[m_{O_2} \quad m_{H_2} \quad m_{N_2} \quad \omega_{cp} \quad p_{sm} \quad m_{sm} \quad m_{w,an} \quad p_{rm} \right]^T
 \tag{3.5}$$

$$y = [W_{cp}, p_{sm}, v_{st}]^T$$

$$z = [e_{P_{net}}, \lambda_{O_2}]^T$$

$$u = v_{cm}$$

$$w = I_{st}$$

Тут одиниці станів і виходів масштабуються таким чином, що кожна змінна має порівнянну величину. Одиниці: маса в грамах, тиск в барах, швидкість обертання в кіло/хв, масова швидкість потоку в г/с, потужність в кВт, напруга в В і струм в А.

Зауважте, що отримана лінійна модель має вісім станів, тоді як нелінійна модель має дев'ять станів. Станом, який видаляється, оскільки його неможливо спостерігати під час лінеаризації, є маса води в катоді. Причина полягає в тому, що з параметрами мембранного потоку води, які ми використовували, завжди існує надмірний потік води від анода до катода, що для всіх номінальних умов призводить до повністю зволоженого (насиченого парою) катодного газу. Таким чином, при постійній температурі тиск пари постійний і дорівнює тиску насиченої пари. Наша нелінійна модель не включає вплив конденсації рідини, також відомий як «повінь», на характеристику напруги FCS. Як наслідок, катодна маса води не спостерігається з точки зору лінеаризації. З іншого боку, тиск парів на аноді можна спостерігати, і він включається в лінеаризацію, оскільки коливання струму FCS впливають на парціальний тиск пари в аноді, який завжди менший за його значення насичення. Зміна тиску пари впливає на парціальний тиск водню завдяки швидкому P-контролеру, який регулює тиск на аноді, щоб він був рівним тиску на катоді. Тиск водню, у свою чергу, впливає на напругу FCS і робить $m_{w,an}$ спостережуваним.

3.2 Динамічний зворотний зв'язок

Давайте почнемо розробку динамічного контролера прямого зв'язку, заявивши добре відомий факт: «контролер прямого зв'язку не може змінити динаміку системи з відкритим контуром, якщо він не скасовує її». належний

для топології керуючої змінної, $u = v_{cm}$, і збурення, $w = I_{st}$, по відношенню до змінної продуктивності, $z_2 = \lambda O_2$, можливості подавлення завад системи з відкритим контуром є помірними. Наприклад, вихідна характеристика статичного прямого контролера $u = f_{cm}(I_{st})$,

залежить від динаміки інерції компресора, наповнення подаючого колектора і, в решті-решт, динаміки наповнення катодного колектора. Зрозуміло, що для досягнення хорошого подавлення завад контрольна змінна, u , повинна бути провідним фільтром вимірних завад, w (див. [42]). Фільтр відведення заснований на інверсії динаміки відкритого контуру від « u до z_2 ».

Використовуючи лінійну модель, наведену в таблиці А.1, систему можна організувати у вигляді функції передачі

$$\Delta Z_2 = G_{z_2u} \Delta U + G_{z_2w} \Delta W \quad (3.6)$$

де $G_{z_2u} = C_{z_2} (sI - A)^{-1} B_u$ і $G_{z_2w} = C_{z_2} (sI - A)^{-1} B_w + D_{z_2}$, а всі змінні капіталу знаходяться в області Лапласа. Для простоти змінна Лапласа “ s ” явно не показана. Нехай адинамічний упереджений регулятор буде $\Delta U = K_{uw} \Delta W$, як показано на рис. 3.5. Передатну функцію від W до Z_2 можна записати як

$$T_{z_2w} = \frac{\Delta Z_2(s)}{\Delta W(s)} = (G_{z_2w} + G_{z_2u} K_{uw}) \quad (3.7)$$

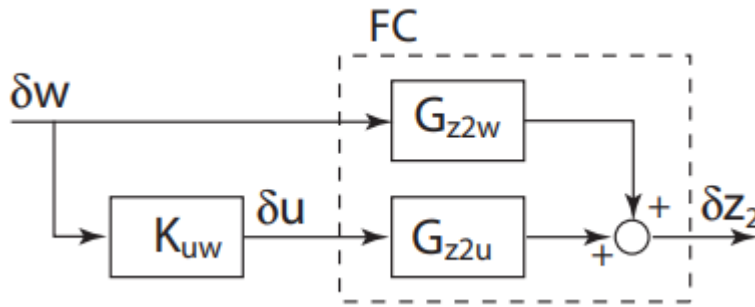


Рисунок 3.5 - Динамічне керування прямою передачею

На рис. 5.6 показано порівняння між Кідеалем і строго власне K_{uw} . Реакція лінійної системи, що піддається одиничному кроку збурення, w , показана на рис. 3.6. Відгук $z2$ дорівнює нулю, за винятком високих частот, тобто початкового перехідного процесу. Збільшуючи значення α , відповідь $z2$ може бути швидшою за рахунок великої керуючої дії, яка відображається на $z1$ через витрачену потужність компресора.

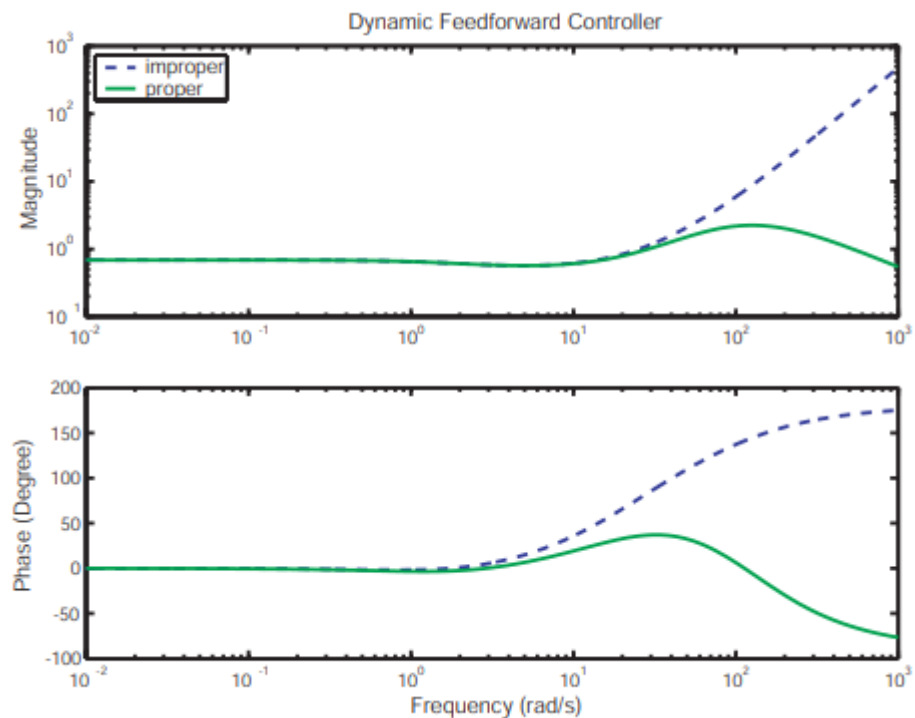


Рисунок 3.6: Частотний графік динамічного прямого контролера

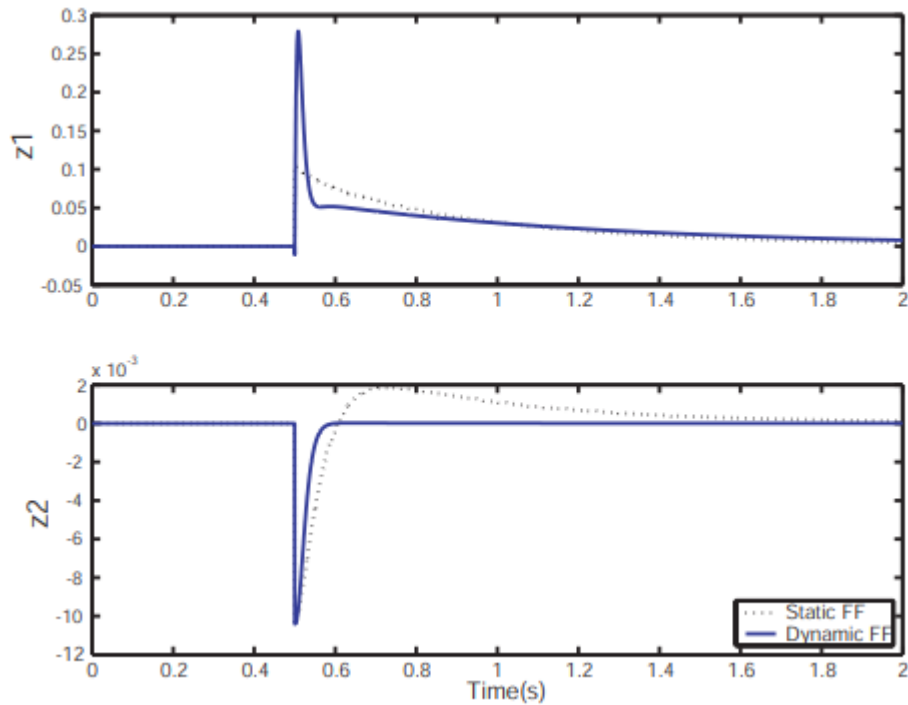


Рисунок 3.7 - Відповідь на крок системи з динамічним упередженням у лінійному моделюванні

Незважаючи на те, що динамічна пряма подача скасовує вплив w на $z2$ у широкому діапазоні частот, інверсія на основі моделі може негативно вплинути на здатність подавлення збурень у присутності невідомих збурень, помилок моделювання та зміни параметрів. Через відсутність зворотного зв'язку функція чутливості системи щодо невідомих збурень дорівнює одиниці на всіх частотах. Модифікації частотної області в можуть бути використані для зменшення чутливості контролера скасування, якщо можна знайти межі розміру невизначеності установки. Реакція нелінійної системи з динамічним прямим зв'язком, піддана серії кроків струму (рис. 5.8), представлена на рис. 5.9, показує один із ефектів помилки моделювання, який є помилкою стаціонарного стану.

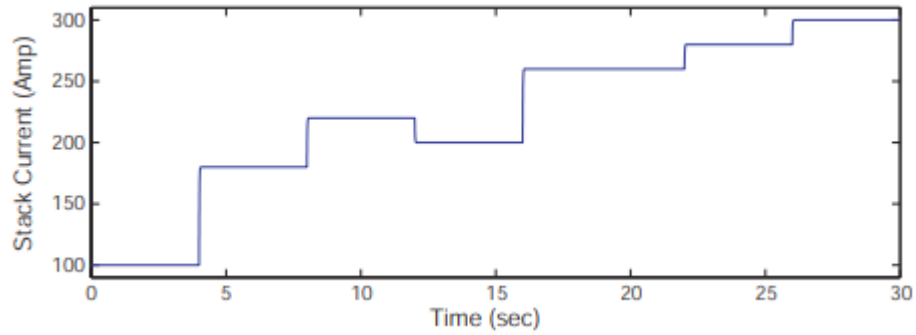


Рисунок 5.8 - Струмівий вхід, що використовується в нелінійному моделюванні

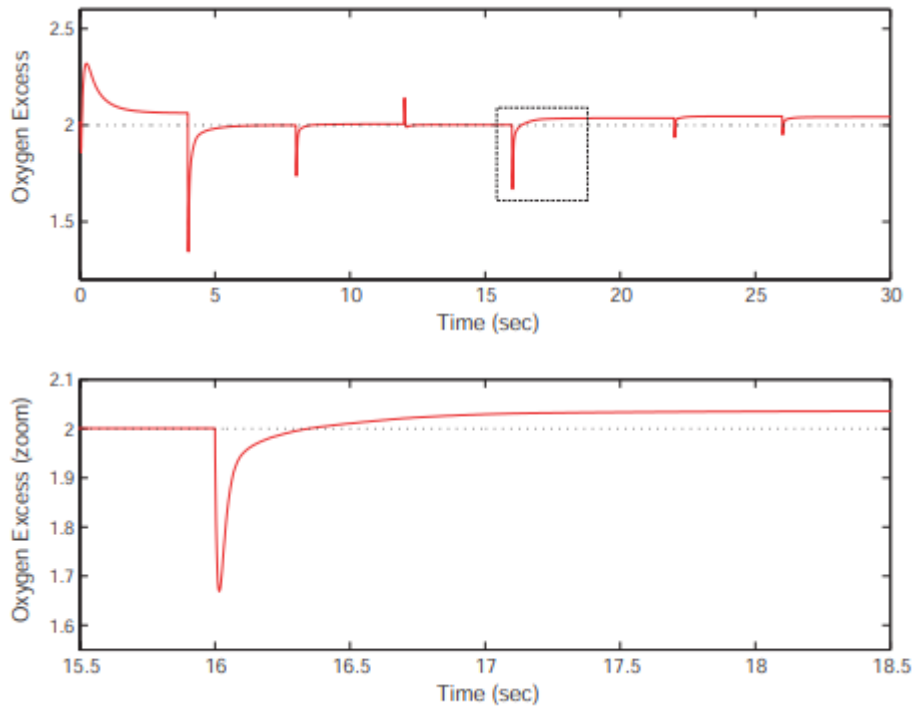


Рисунок 5.9 – Відповідь системи з динамічним упередженням у нелінійному моделюванні

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Вимоги охорони праці під час роботи з електроустаткуванням

Загальні положення

Інструкція з охорони праці для електрика при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування розроблена відповідно до Закону України «Про охорону праці» (Постанова ВР України від 14.10.1992 № 2694-ХІІ) в редакції від 20.01.2018 р, на основі «Положення про розробку інструкцій з охорони праці», затвердженого Наказом Комітету по нагляду за охороною праці Міністерства праці та соціальної політики України від 29 січня 1998 року № 9 в редакції від 01 вересня 2017 року, з урахуванням «Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів», затвердженими наказом Міністерства палива та енергетики 25.07.2006 р. № 258 (у редакції наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості України 13.02.2012 р. №91, «Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів», затверджених наказом Держнаглядохоронпраці України 09.01.1998 р. № 4.

Всі положення даної інструкції з охорони праці поширюються на електриків освітньої установи, які виконують роботи з ремонту та обслуговування електроустаткування.

До самостійного виконання робіт з ремонту та обслуговування електричного обладнання допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли навчання за фахом, а також:

медичний огляд і не мають протипоказань за станом здоров'я до виконання даної роботи;

вступний і первинний на робочому місці інструктажі з охорони праці;

навчання безпечним методам і прийомам праці;

перевірку знань правил улаштування електроустановок, правил безпеки при експлуатації електроустановок, вимог охорони праці;

при ремонті і обслуговуванні електрообладнання напругою до 1000В мають групу з електробезпеки не нижче III, а понад 1000В - не нижче IV.

Електрику необхідно знати і виконувати вимоги інструкції з охорони праці при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування, інструкцій по роботі з ручним інструментом, електричним інструментом і драбинами.

Електрику при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування слід дотримуватися вимог Правил безпечної експлуатації електричних установок споживачів і Правил технічної експлуатації електричних установок споживачів, і мати відповідну групу з електробезпеки згідно з вимогами цих Правил.

Виконуючи роботи з ремонту та обслуговування електричного обладнання, може спостерігатися вплив нижчеперелічених шкідливих і небезпечних виробничих факторів:

- падіння з висоти;
- ураження електричним струмом;
- підвищена напруженість електричного поля;
- підвищена запиленість повітря робочої зони;
- підвищений рівень вібрації;
- недостатня освітленість робочої зони;
- фізичні перевантаження;
- нервово-психічні перевантаження.

Електрику при виконанні ремонту і обслуговування електроустаткування необхідно використовувати наведені нижче ЗІЗ:

- напівкомбінезон бавовняний - на 12 місяців;
- рукавички на - 3 місяці;

черевики шкіряні на - 24 місяці;
калоші діелектричні - чергові;
рукавиці діелектричні - чергові;
килимки діелектричні - чергові.

Електрик при ремонті і обслуговуванні електрообладнання зобов'язаний:

тримати у чистоті і порядку своє робоче місце;
дотримуватися Правил внутрішнього трудового розпорядку;
вміти застосовувати засоби індивідуального, колективного захисту, засоби пожежогасіння;

вміти надавати першу допомогу потерпілим від нещасних випадків;

знати і виконувати всі вимоги нормативних актів з охорони праці, правил протипожежного захисту та виробничої санітарії.

негайно повідомляти своєму безпосередньому керівнику про будь-який нещасний випадок, що трапився на виробництві, про ознаки професійного захворювання, а також про ситуацію, яка створює загрозу життю і здоров'ю людей;

знати терміни випробування захисних засобів і пристосувань, правила експлуатації, догляду та користування ними. Не дозволяється використовувати захисні засоби і пристосування з простроченим терміном перевірки;

виконувати тільки доручену роботу;

дотримуватися вимог інструкцій з експлуатації обладнання;

знати, де знаходяться засоби надання допомоги, первинні засоби пожежогасіння, головний і запасні виходи, шляхи евакуації в разі аварії або пожежі;

знати номери телефонів медичної установи (103) і пожежної охорони (101).

Електрик може відмовитися від виконання дорученої йому роботи, якщо виникла виробнича ситуація, яка становить загрозу для його життя і здоров'я оточуючих, або для навколишнього середовища, і доповісти про це своєму прямому керівнику.

На робочому місці заборонено курити, вживати алкогольні напої та інші речовини, які надають наркотичну дію на організм людини.

З метою запобігання отримання травм і виникнення травмонебезпечних ситуацій слід дотримуватися нижчеперелічених вимог: не можна залучати до роботи сторонніх осіб;

не починати роботу в разі відсутності умов для її безпечного виконання;

виконувати роботу тільки на справному обладнанні, зі справними пристроями та інструментом;

виявивши несправність терміново доповісти безпосередньому керівнику або усунути їх власними силами, якщо це відноситься до посадових обов'язків;

не торкатися неізольованих або пошкоджених проводів;

не виконувати роботу, яка не входить до професійних обов'язків.

Вміти надавати першу допомогу при кровотечах, переломах, опіках, ураженнях електричним струмом, раптовому захворюванні або отруєнні.

Дотримуватися правил особистої гігієни:

верхній одяг, головний убір і інші особисті речі слід залишати в гардеробі;

працювати в чистому спецодязі;

приймати їжу в призначеному для цього місці.

Вміти правильно користуватися ЗІЗ та засобами колективного захисту, первинними засобами пожежогасіння, протипожежним інвентарем, знати, де вони знаходяться.

Особи, які порушили цю інструкцію з охорони праці для електрика при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування, несуть дисциплінарну, адміністративну, матеріальну і кримінальну відповідальність відповідно до чинного законодавства України.

Вимоги безпеки перед початком роботи

Одягти спецодяг, провести огляд і підготовку робочого місця, прибрати зайві предмети.

Видалити із зони проведення робіт сторонніх осіб і звільнити робоче місце від сторонніх матеріалів та інших предметів, обгородити робочу зону і встановити знаки безпеки.

Переконатися в достатньому освітленні робочого місця, відсутність електричної напруги на відремонтованому обладнанні.

Оглянути на справність вимикачі, розетки електричної мережі, електровілок, електричних проводів, з'єднувальних кабелів, переконатися в наявності і справності ЗІЗ (засобів індивідуального захисту) і попереджувальних пристроїв (рукавичок діелектричних, окулярів захисних, калош, килимків і т. п.).

Виконуючи роботи з інструментом необхідно упевнитися в його справності, в відсутності механічних пошкоджень ізоляційного покриття і в своєчасності проходження випробувань інструменту.

Провести перевірку робочого місця на відповідність вимогам пожежної безпеки, на достатність освітлення робочого місця.

Виявивши недоліки і порушення з питань електричної і пожежної безпеки, негайно доповісти своєму безпосередньому керівнику.

4.2 Вимоги безпеки під час виконання робіт

Виконуючи посадові обов'язки, електрик зобов'язаний мати при собі посвідчення перевірки знань з питань охорони праці. За відсутності посвідчення або наявності посвідчення з терміном перевірки, працівник не отримує допуск до роботи.

Роботи в електричних установках щодо заходів безпеки поділяються на 3 категорії:

- зі зняттям напруги;

- без зняття напруги на струмопровідних частинах або біля них;

- без зняття напруги віддалік від струмопровідних частин, що перебувають під напругою.

Працівники, які виконують спеціальні види робіт, до яких висуваються додаткові вимоги безпеки, повинні бути навчені безпечному проведенню таких робіт і мати про це відповідний запис в посвідченні про перевірку знань.

Працівникові, який обслуговує закріплені за ним електричні установки напругою до 1000 В одноосібно, необхідно мати III групу з електробезпеки.

Виконуючи роботи в електричних установках потрібно проводити організаційні заходи, що забезпечують безпеку робіт:

- оформляти роботи нарядом-допуском, розпорядженням відповідно до переліку робіт, що виконуються в порядку поточної експлуатації;

- проводити підготовку робочих місць;

- допуск до роботи;

- здійснювати контроль над виконанням робіт;

- переводити на інше робоче місце;

- установлювати перерви в роботі та її закінчення.

Для підготовки робочого місця до роботи, яка вимагає зняття напруги, необхідно застосувати, в певному порядку, наведені нижче технічні заходи:

виконати необхідні відключення і вжити всіх заходів, що виключають помилкове або самовільне включення комутаційної апаратури;

розвісити заборонні плакати на приводах ручного і на ключах дистанційного керування комутаційною апаратурою;

провести перевірку на відсутність напруги на струмопровідних частинах, які повинні бути заземлені для захисту людей від ураження електричним струмом;

встановити заземлення (включити заземлюючі ножі, застосувати переносні заземлення);

встановити огорожі, якщо необхідно, близько робочих місць або струмоведучих частин, що залишилися під напругою, а також вивісити на даних огорожах плакати безпеки.

в залежності від місцевих умов, струмовідні частини обгородити до чи після їх заземлення.

Працювати без зняття напруги на струмопровідних частинах або поблизу них слід як мінімум двом працівникам, одному з них, керівнику робіт, необхідно мати групу IV; іншим групу III з обов'язковим оформленням роботи нарядам-допуском або розпорядженням.

При знятті і встановленні запобіжників під напругою в електроустановках напругою до 1000 В слід заздалегідь відключити всі навантаження, які підключені до зазначених запобіжників; використовувати при цьому ізолюючі кліщі або діелектричні рукавички, а якщо є відкриті плавкі вставки, то і захисні окуляри.

Роботу з використанням драбин потрібно проводити вдвох, один з працівників повинен перебувати знизу. Стояти на ящиках або інших предметах забороняється. При установці приставних драбин на балках,

елементах металевих конструкцій і т. п. слід надійно закріпити верхню і нижню частину драбини на конструкціях.

Під час обслуговування та ремонту електричних установок користуватися металевими драбинами забороняється.

4.3 Вимоги безпеки після закінчення робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування

Відключити (від'єднати) необхідне електрообладнання, електроінструмент від мережі.

Навести порядок на робочому місці, прибрати в спеціальні місця деталі, матеріал, сміття і відходи.

Прибрати у відведене місце весь інструмент і пристосування.

Зняти і прибрати спецодяг, ЗІЗ, ретельно помити руки.

Провести огляд робочого місця на відповідність його всім вимогам протипожежного захисту.

Повідомити своєму безпосередньому керівнику про недоліки і несправності, які були під час виконання роботи. Зафіксувати це в оперативному журналі.

Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

У випадку пожежі:

вимкнути електричне обладнання, припливно-витяжну вентиляцію, якщо вона є;

повідомити в пожежну частину за телефоном 101 і доповісти про це своєму керівнику, а при його відсутності іншій посадовій особі;

приступити до ліквідації осередка загоряння, застосовуючи передбачені для цього засоби пожежогасіння. Виконувати гасіння електричного обладнання, що знаходиться під напругою, можна тільки

вуглекислотними вогнегасниками типу ОУ або піском. Гасити їх водою або пінним вогнегасником забороняється.

Електрик повинен пам'ятати, що при раптовому відключенні напруги, вона може бути подана знову без попередження.

Слід швидко відключити механізми і пристрої:

в разі раптового відключення електроенергії,;

якщо подальша їх робота загрожує безпеці працівників;

в разі відчуття дії електричного струму при торканні металевих частин пускової апаратури;

в разі іскріння;

при найменших ознаках загоряння, появи диму, запаху гару;

якщо з'явився незнайомий шум.

У разі короткого замикання в мережі електроживлення необхідно знеструмити обладнання і повідомити своєму прямому керівнику.

Якщо сталося ураження електричним струмом, слід звільнити потерпілого від дії електричного струму, для чого відключити електричну мережу або від'єднати потерпілого від струмопровідних частин за допомогою діелектричних захисних засобів та інших ізолюючих речей і предметів (сухий одяг, суха жердина, прогумований матеріал і т. п.), або перерізати (перерубати) провід будь-яким інструментом з ізолюючою рукояткою, обережно, без додаткового нанесення травм потерпілому. До прибуття медпрацівника необхідно надати потерпілому першу допомогу.

При нещасних випадках (травмуванні людини) негайно повідомити про це безпосереднього керівника.

4.4 Розрахунок захисного заземлення

Захисне заземлення забезпечує зниження напруги дотику при замиканні на корпус до відносно безпечних значень шляхом зменшення потенціалу заземленого обладнання, вирівнювання потенціалів підвищенням потенціалів місця, на якому стоїть людина, до значень, що близькі до потенціалу заземлених конструктивних частин обладнання.

Розрахунок захисного заземлення має на меті визначення основних параметрів заземлення – кількість, розміри та порядок розміщення одиночних заземлювачів та заземлюючих провідників, при яких напруга дотику та кроку в період замикання фази на заземлений корпус не перевищує допустимих значень.

Розрахунок захисного заземлення здійснюється для випадку розташування заземлювача в однорідній землі. При цьому враховується опір верхнього шару землі (шар сезонних змін), який обумовлений замерзанням або засухою ґрунту. Розрахунок, який заснований на коефіцієнтах використання провідності заземлювача називається способом коефіцієнтів використання. Його виконують, як при простих, так і при складних конструкціях групових заземлювачів.

Загальні вимоги електробезпеки повинні відповідати ДСТУ 7237:2011. Для захисту від уражень електричним струмом використовують захисне заземлення. Воно повинно захищати людей від уражень електричним струмом у випадку дотику до металевих неструмопровідних частин, які можуть опинитись під напругою внаслідок пошкодження ізоляції, це досягається з'єднанням металевих частин електроустановок з землею, або її еквівалентом.

Згідно з класифікацією приміщень за ступенем небезпеки ураження електричним струмом (ПУЕ 1.1.6.), приміщення в якому проводяться всі роботи відноситься до першого класу (без підвищеної небезпеки). Під час

роботи використовуються електроустановки з напругою живлення 36 В, 220 В, та 360 В. Опір контура заземлення повинен мати не більше 4 Ом.

Розрахунок проводять за допомогою методу коефіцієнта використання (екранування) електродів. Коефіцієнт використання групового заземлювача η – це відношення діючої провідності цього заземлювача до найбільш можливої його провідності за нескінченно великих відстаней між його електродами.

При розрахунку заземлювачів в однорідній землі способом коефіцієнтів використання значення опору R захисного заземлення визначаємо в наступному порядку:

обчислюємо опір пристрою заземлення R_3 . Згідно правил улаштування електроустановок (ПУЕ) найбільш припустимі значення R_3 , складають для установок до 1000 В:

10 Ом при сумарній потужності генераторів або трансформаторів, що живлять дану мережу, не більше 100 кВА;

4 Ом у всіх інших випадках.

- визначаємо необхідний опір штучного заземлювача $R_{ш}$:

$$R_{ш} = \frac{R_e \cdot R_3}{R_e - R_3}, \quad (4.1)$$

де R_e – опір розтікання природного заземлювача, Ом; R_3 – необхідний опір заземлюючого пристрою, Ом.

- обчислюємо кількість вертикальних і довжину горизонтальних електродів:

$$n = \frac{4 \cdot \sqrt{S}}{a'}, \quad (4.2)$$

де n – кількість вертикальних електродів, штук; S – площа цеху, m^2 ; a' – задана відстань між електродами, м.

$$l_r = 2a + 2b, \quad (4.3)$$

де l_2 – сумарна довжина горизонтальних електродів, м; a – ширина сторони цеху, м; b – довжина сторони цеху, м.

- розраховуємо опори розтікання вертикального R_v та горизонтального R_g електродів:

$$R_v = \frac{\rho_{роз.в}}{2 \cdot \pi \cdot l_v} \left(\ln \frac{2l_v}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t + l_v}{4t - l_v} \right), \quad (4.4)$$

де $\rho_{роз.в}$ – розрахунковий питомий опір землі для вертикального електрода, Ом·м;

l_v – довжина вертикальних стрижневих електродів, м; d – діаметр електрода, мм;

t – глибина занурення в землю верхнього кінця електрода, м;

$$R_g = \frac{\rho_{роз.г}}{2 \cdot \pi \cdot l_g} \cdot \ln \frac{2l_g}{0,5 \cdot b' \cdot t}, \quad (4.5)$$

де $\rho_{роз.г}$ – розрахунковий питомий опір для горизонтального електрода, Ом·м;

l_g – довжина горизонтальних електродів, м; b' – товщина горизонтального електрода, м.

- за даними таблиці 4.1 та таблиці 4.2 визначаємо коефіцієнти використання для вертикальних та горизонтальних електродів η_v та η_g та з їх врахуванням обчислюємо розрахунковий опір заземлювача за виразом:

$$R_z = \frac{R_v \cdot R_g}{R_v \cdot \eta_g + R_g \cdot \eta_v \cdot n}, \quad (4.6)$$

Для розрахунку заземлювача задаємось такими вихідними даними: виробничий цех площею $S=5000$ м² і з понижуючою підстанцією 10/0,4 кВ. Заземлювач передбачається виконати з вертикальних стрижневих електродів довжиною $l_v=5$ м, діаметром $d=12$ мм і відстанню між ними $a'=5$ м та горизонтальних електродів (сталева смуга перетином 440 мм) на глибині $t=0,8$ м. Розрахункова величина питомого опору ґрунту у місці спорудження захисного заземлення береться з таблиці 6.3 (для чорнозема $c=20$ Ом/м). Коефіцієнти вертикальної прокладки K_v і горизонтальної прокладки K_g приймаються з таблиці 6.4 (для третього кліматичного району $K_v=1,3$, $K_g=2,5$).

Талиця 4.1 – Коефіцієнт використання горизонтального стрічкового електрода, що з'єднує вертикальні електроди (труби, кутики і ін.) групового заземлювача

Відношення відстані між вертикальним і електродами до їх довжин	Число вертикальних електродів							
	2	4	6	10	20	40	60	100
Вертикальні електроди розміщені в ряд								
1.	0,8 5	0,7 7	0,7 2	0,6 2	0,4 2	-	-	-
2.	0,9 4	0,8 0	0,8 4	0,7 5	0,5	-	-	-
3.	0,9 6	0,9 2	0,8 8	0,8 2	0,6 8	-	-	-
Вертикальні електроди розміщені по контуру								
1.	-	0,4 5	0,4 0	0,3 4	0,2 7	0,2 2	0,2 0	0,1 9
2.	-	0,5 5	0,4 8	0,4 0	0,3 2	0,2 9	0,2 7	0,2 3
3.	-	0,7 0	0,6 4	0,5 6	0,4 5	0,3 9	0,3 6	0,3 3

Талиця 4.2 – Коефіцієнт використання вертикальних електродів групового заземлювача (труб, кутиків, і т. ін.) без урахування впливу стрічки зв'язку

Число заземлювачів	Число вертикальних електродів					
	1.	2.	3.	1.	2.	3.
	Електроди, розміщені в ряд			Електроди, розміщені по контуру		
2	0,85	0,91	0,94	-	-	-
4	0,73	0,83	0,89	0,69	0,78	0,85
6	0,65	0,77	0,85	0,61	0,73	0,80
10	0,59	0,74	0,81	0,56	0,68	0,76
20	0,48	0,67	0,76	0,47	0,63	0,71
40	-	-	-	0,41	0,58	0,66
60	-	-	-	0,39	0,55	0,64
100	-	-	-	0,36	0,52	0,62

Таблиця 4.3 – Розрахункові значення питомих електричних опорів ґрунтів

Ґрунт	Значення, які рекомендуються для розрахунків, Ом/м
Пісок	700
Супісок	300
Суглинок	100
Глина	40
Чорнозем	20
Торф	20

Таблиця 4.4 – Значення підвищувальних коефіцієнтів K_r , K_v за кліматичними зонами

Кліматична зона	Тип заземлювачів	
	Горизонтально прокладені заземлювачі (смугові та ін.) при глибині від поверхні ґрунту $t=0,8$ м, K_r	Стрижневі вертикально встановлені заземлювачі при глибині від поверхні землі $t=0,5-0,8$ м, K_v
I	4,5–7	1,8–2
II	3,5–4,5	1,6–1,8
III	2,5–4	1,4–1,6
IV	1,5–2	1,2–1,4

Розрахункові питомі опори ґрунту для вертикальних і горизонтальних заземлювачів визначаються відповідно так:

$$\rho_{роз.в} = K_v \cdot \rho, \text{ Ом/м}, \quad (6.7)$$

$$\rho_{роз.г} = K_r \cdot \rho, \text{ Ом/м} \quad (6.8)$$

Таким чином за формулами (6.7), (6.8), для чорнозему:

$$\rho_{роз.в} = 1,3 \cdot 20 = 26, \text{ Ом/м};$$

$$\rho_{роз.г} = 2,5 \cdot 20 = 50, \text{ Ом/м}.$$

У якості природного заземлювача використовуємо металеву технологічну конструкцію з опором розтікання природного заземлювача

$$R_e = 15 \text{ Ом}.$$

Здійснюємо розрахунок у відповідності з зазначеною послідовністю:

- згідно ПУЕ необхідний опір заземлюючого пристрою складає:

$$R_3 = 4 \text{ Ом};$$

за формулою (6.1) визначимо необхідний опір штучного заземлювача $R_{ш}$:

$$R_{ш} = \frac{15 \cdot 4}{15 - 4} = 5,5 \text{ Ом};$$

за формулами (4.2), (4.3) обчислюємо кількість вертикальних та довжин горизонтальних електродів:

$$n = \frac{4 \cdot \sqrt{5000}}{5} = 5 \text{ штук},$$

$$l_r = 2 \cdot 50 + 2 \cdot 100 = 300 \text{ м};$$

за формулами (4.4), (4.5) розраховуємо опори розтікання вертикального R_B та горизонтального R_r електродів:

$$R_B = \frac{26}{2 \cdot \pi \cdot 5} \left(\ln \frac{2 \cdot 5}{0,012} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 3,3 + 5}{4 \cdot 3,3 - 5} \right) = 5,7 \text{ Ом},$$

$$R_r = \frac{50}{2 \cdot \pi \cdot 300} \cdot \ln \frac{2 \cdot 300}{0,5 \cdot 0,04 \cdot 0,8} = 0,3 \text{ Ом};$$

за даними таблиць (4.10, (4.11) обираємо коефіцієнти використання для вертикальних та горизонтальних електродів $K_B=0,4$ та $K_r=0,21$;

обчислюємо розрахунковий опір заземлювача R за формулою (4.6):

$$R = \frac{5,7 \cdot 0,3}{5,7 \cdot 0,21 + 0,3 \cdot 0,4 \cdot 56} = 0,22 \text{ Ом}.$$

Таким чином, проєктований заземлювач є контурним, складається з 56 вертикальних стрижневих електродів довжиною 5 м і діаметром 12 мм та горизонтального електрода у вигляді сталевий смуги довжиною 300 м, перетином 440 мм^2 , занурених у землю на 0,8.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Задовільна перехідна поведінка є однією з критичних вимог до системи паливних елементів як для автомобільного, так і для побутового застосування. Необхідна добре спроектована система керування, щоб забезпечити швидку та послідовну перехідну поведінку системи паливних елементів. Система складається з чотирьох основних підсистем, а саме, підсистеми постачання реагентів, тепла та температури, управління водою та підсистеми керування електроенергією. Додаткові складності виникають для системи з водневим паливним процесором, який перетворює паливо на основі вуглецю на водень. Взаємодії між підсистемами призводять до складної проблеми керування.

У цій роботі представлені дві проблеми керування, пов'язані з системою паливних елементів. Перша проблема контроль катодного кисневого реагенту для системи прямого водневого паливного елемента високого тиску (FCS). Мета контролю полягає в тому, щоб ефективно регулювати концентрацію кисню в катоді шляхом швидкого і точного поповнення кисню, що виснажується під час виробництва електроенергії. Друга проблема полягає в управлінні з кількома входами та кількома виходами паливної системи (FPS) низького тиску на основі часткового окислення природного газу. Метою контролю є регулювання як температури каталітичного часткового окислення (CPOX), так і концентрації водню на аноді. Динамічний аналіз системи та проектування керування здійснюються з використанням підходу лінійного керування на основі моделі.

Орієнтована на керування нелінійна динамічна модель, яка підходить для кожної проблеми керування, розроблена на основі принципів фізики. Вони не тільки легко масштабуються та розширюються, але й динамічні моделі системного рівня, створені з моделей компонентів на основі фізики, також дуже корисні для розуміння поведінки та взаємодії системи.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. L. Guzzella. Control oriented modelling of fuel-cell based vehicles. Presentation in NSF Work- shop on the Integration of Modeling and Control for Automotive Systems, 1999. p. URL : https://folk.ntnu.no/skoge/publications/2006/zenith_polymer_fuel_cell_model+exp_jps/Zenith_dynamic_fuel_cell.pdf.
2. С. Ахмед і М. Крумпельт. Водень з вуглеводневого палива для паливних елементів. Міжнародний журнал водневої енергії, 2001. 26. с. 291–301.
3. J.C. Amphlett, R.M. Baumert, R.F. Mann, B.A. Peppley та P.R. Roberge. Моделювання продуктивності паливного елемента з твердим полімерним електролітом Ballard Mark IV. Journal of Electrochemical Society, 1995. 142(1). с. 9–15.
4. R. Jiang and D. Chu. Stack design and performance of polymer electrolyte membrane fuel cells. Journal of Power Sources. 93, 2001. p. 25–31.
5. A.L. Larentis, N.S. de Resende, V.M.M. Salim, and J.C. Pinto. Modeling and optimization of the combined carbon dioxide reforming and partial oxidation of natural gas. Applied Catalysis. 215, 2001. p. 211–224.
6. K. Ledjeff-Hey, J. Roses, and R. Wolters. CO₂-scrubbing and methanation as purification system for PEFC. Journal of Power Sources, 86, 2000. p. 556–561.
7. G. Maggio, V. Recupero, and L. Pino. Modeling polymer electrolyte fuel cells: an innovative approach. Journal of Power Sources. 101, 2001. p. 275–286.
8. R.F. Mann, J.C. Amphlett, M. Hooper, H.M. Jensen, B.A. Peppley, and P.R. Roberge. Development and application of a generalized steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell. Journal of Power Sources. 86, 2000. p. 173–180.
9. А.Г. Микитишин, М.М. Митник, П.Д. Стухляк, В.В. Пасічник Комп'ютерні мережі. Книга 1. [навчальний посібник] (Лист МОНУ №1/11-8052 від 28.05.12р.) - Львів, "Магнолія 2006", 2013. – 256 с.

10. А.Г. Микитишин, М.М. Митник, П.Д. Стухляк, В.В. Пасічник Комп'ютерні мережі. Книга 2. [навчальний посібник] (Лист МОНУ №1/11-11650 від 16.07.12р.) - Львів, "Магнолія 2006", 2014. – 312 с.
11. Микитишин А.Г., Митник, П.Д. Стухляк. Комплексна безпека інформаційних мережевих систем: навчальний посібник – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2016. – 256 с.
12. Микитишин А.Г., Митник М.М., Стухляк П.Д. Телекомунікаційні системи та мережі : навчальний посібник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017 – 384 с.
13. Введення в комп'ютерну графіку та дизайн: Навчальний посібник для студентів спеціальності 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка"/Укладачі: О.В. Тотосько, П.Д. Стухляк, А.Г. Микитишин, В.В. Левицький, Р.З. Золотий - Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023 - 304с. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/41166>.
14. Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42995>.