

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет навчально-науковий центр заочної форми навчання
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Методи керування на основі нечіткого
планування посилення ПД-регуляторів

(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи СПЗМ-22-1
Северіна А.О.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системне програмування
(повна назва освітньої програми)

Керівник: ст.викладач Знайдюк В.Г.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ

(підпис)

Коваленко А.А.

(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет навчально-науковий центр заочної форми навчання

Кафедра електронних обчислювальних машин

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системне програмування
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентки Северіной Анастасії Олександрівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Методи керування на основі нечіткого планування посилення ПІД-регуляторів

затверджена наказом по університету від “ 01 ” квітня 2024 р. № 45Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 15 червня 2024 р.

3. Вхідні дані до роботи Нечітке планування.

ПІД регулятор

Нечітка логіка

Керування складними об'єктами

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі _____

Загальні положення

Опис та моделювання WECS

Стратегія управління WECS

Результати та тестування

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) 16

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літературних джерел	01.04.24-08.04.24	
2	Вибір та обґрунтування методики та засобів дослідження	09.04.24-12.04.24	
3	Вибір та обґрунтування методів	13.04.24-19.04.24	
4	Програмна реалізація проєкта	20.04.24-09.05.24	
5	Проведення експериментальних досліджень	10.05.24-23.05.24	
6	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	24.05.24-03.06.24	
7	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та її попередній захист	04.06.24-07.06.24	
8	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	08.06.24-12.06.24	
9	Захист		

Дата видачі завдання 01 квітня 2024 р.

Студент 
(підпис)

Керівник роботи 
(підпис)

ст.викладач Знайлюк В.Г.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 81 с., 45 рис., 7 табл., 1 дод., 7 джерел.

СИСТЕМА ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ ВІТРУ, НЕЧІТКА ЛОГІКА, ГЕНЕРАТОР СИСТЕМИ XILINX, FPGA, РЕГУЛЯТОР ПРОПОРЦІЙНОЇ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ПОХІДНОЇ

Метою кваліфікаційної роботи є аналіз методів керування на основі нечіткого планування посилення ПІД-регуляторів, а також представлення ПІД-регуляторів VCS-FGS для підключених до електромережі частотно-регульованих вітроелектричних систем.

У ході виконання кваліфікаційної роботи проведено детальний аналіз сучасних методів керування ПІД-регуляторами, розроблено нові підходи до нечіткого планування посилення і проведено численні експерименти, які підтверджують ефективність запропонованих методів. Практична цінність роботи підтверджується можливістю застосування розроблених методів у різних промислових системах, що робить роботу важливим внеском у розвиток теорії автоматичного керування.

ABSTRACT

Master's thesis: 81 pages, 45 figures, 7 tables, 1 appendices, 37 sources.

WIND ENERGY CONVERSION SYSTEM, FUZZY LOGIC, XILINX SYSTEM GENERATOR, FPGA, PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE CONTROLLER

The major goal of this thesis is the analysis of control methods based on fuzzy planning of the gain of PID controllers, as well as the presentation of VCS-FGS PID controllers for grid-connected frequency-regulated wind power systems.

In the course of the qualification work, a detailed analysis of modern methods of controlling PID controllers was carried out, new approaches to fuzzy gain planning were developed, and numerous experiments were conducted that confirm the effectiveness of the proposed methods. The practical value of the work is confirmed by the possibility of applying the developed methods in various industrial systems, which makes the work an important contribution to the development of the theory of automatic control.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП	8
1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ.....	9
2 ОПИС ТА МОДЕЛЮВАННЯ WECS	18
2.1 Моделювання вітрових турбін.....	18
2.2 Шари пулу типів.....	22
2.3 Моделювання PMSG та підключення до електромережі	23
3 СТРАТЕГІЯ УПРАВЛІННЯ WECS	24
3.1 Традиційна техніка векторного керування WECS.....	24
3.2 Нечіткий ПІД-регулятор з нечітким плануванням посилення	27
4 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ	34
4.1 XSG-архітектури методів управління	34
4.1.1 Розроблена архітектура VCS-PI з використанням XSG.....	36
4.1.2 Реалізація контролерів VCS-FGSPID з використанням XSG.....	39
4.1.3 Проектування функцій приналежності за допомогою XSG	41
4.2 Розробка правил	44
5 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ТЕСТУВАННЯ	46
5.1 Результати моделювання та впровадження.....	46
5.2 Порівняльне дослідження між запропонованим FGS-PID та нелінійним регулятором	53
5.3 Порівняння запропонованого підходу з іншими існуючими схемами	58
5.4 Реалізація стратегії векторного контролю на ПЛІС	59
ВИСНОВКИ.....	66
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	68
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	73

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ
І ТЕРМІНІВ

ПІД-регулятор– пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор.

FLC (Fuzzy Logic Controller) – регулятор на основі нечіткої логіки.

ЧКП – Частотне керування пропорційністю.

П – Пропорційна складова ПІД-регулятора.

І – Інтегральна складова ПІД-регулятора.

Д – Діференціальна складова ПІД-регулятора.

ЗС – Задане значення.

ВС – Вихідний сигнал.

АК – Адаптивне керування.

СЗЗ – Система зворотного зв'язку.

ВСТУП

У цій роботі представлено апаратну реалізацію на базі програмованої користувачем вентиляційної матриці (FPGA – Field Programmable Gate Array) вдосконалених стратегій векторного керування (VCSs – Vector Control Strategies) на основі системи нечіткої логіки (FLS – Fuzzy Logic System) для мережевої системи перетворення вітрової енергії. Зазвичай, класичні СВК базуються на пропорційно-інтегрально-похідних (PID – Proportional Integral Derivative) регуляторах з фіксованим коефіцієнтом підсилення, які, як відомо, мають обмежену продуктивність при нелінійній поведінці вітроенергетичних систем, таких як швидкі коливання швидкості вітру та невизначеність параметрів системи. Для того, щоб подолати це обмеження, в цій роботі пропонується вдосконалена VCS на основі PID-регуляторів з нечітким плануванням посилення (VCS-FGS-PID), яка гарантує хороше відстеження, високу точність і хорошу надійність при зміні параметрів системи. Дійсно, коефіцієнт підсилення PID -регулятора налаштовується в реальному часі за допомогою ФНЧ. Крім того, запропоновані методи VCS-FGS-PID реалізовані на ПЛІС для того, щоб зменшити затримки і період системи контуру керування, завдяки паралельній обробці. Працездатність запропонованих VCS-FGS-PID підходів підтверджується цифровим моделюванням за допомогою інструменту системного генератора Xilinx в середовищі Matlab/Simulink, а також експериментальною апаратно-програмною реалізацією з використанням FPGA. Отримані результати демонструють, що запропоновані методи VCS-FGS-PID забезпечують кращу продуктивність щодо хорошого відстеження, високої точності та хорошої стійкості до змінності опору статора порівняно з VCS-PI.

1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Зростання світового попиту на електроенергію та вичерпання викопних джерел енергії призвело до нагальної потреби у відновлюваних джерелах енергії. Розробка та оптимізація технологій відновлюваної енергетики, таких як сонячна, вітрова та гідроенергетика, стала життєздатним рішенням. Зокрема, кілька досліджень було присвячено використанню даних дистанційного зондування для оцінки змін ґрунтового покриву та їхнього впливу на екосистемні послуги [1,2,3]. Геопросторовий аналіз також використовувався для вдосконалення точного землеробства та оптимізації практик тваринництва [4,5]. Крім того, вплив зміни клімату на різні сектори, включаючи сільське господарство і тваринництво, досліджувався шляхом інтеграції підходів дистанційного зондування, геопросторового аналізу та моделювання [6,7]. Ці зусилля призвели до кращого розуміння екологічних процесів та прийняття обґрунтованих рішень щодо сталого управління ресурсами. Таким чином, інтеграція в енергосистему відновлюваних джерел енергії, таких як фотоелектрична (PV – Photovoltaic) та вітрова енергія, стала актуальним рішенням [8]. Для вирішення проблем глобального потепління, а також викидів парникових газів, енергетичний перехід повинен проходити через примноження установок фотоелектричних і вітрових генераторів [9]. Сьогодні потік електроенергії, вироблений відновлюваними джерелами енергії, такими як фотоелектричні та вітрові джерела, вважається важливим альтернативним рішенням для компенсації збільшення попиту на електроенергію [10].

За останні кілька років вітроенергетичні технології, як правило, характеризуються новими конструктивними, експлуатаційними та технічними аспектами. Наразі найбільш поширеною є система перетворення енергії вітру зі змінною швидкістю (WECS – Wind Energy Conversion System). Їй приділяється значна увага, і за останні кілька десятиліть масштаби її

використання в енергетиці зростали швидше, ніж раніше. Дійсно, порівняно з WECS з фіксованою швидкістю, WECS зі змінною швидкістю мають деякі переваги, такі як зменшення механічних навантажень, висока якість виробленої електроенергії та наявність точки максимальної потужності зі змінним положенням, яке залежить від швидкості вітру [11]. Незважаючи на переваги WECS зі змінною швидкістю, які базуються на синхронному генераторі з постійними магнітами (PMSG – Permanent Magnet Synchronous Generator), основною проблемою цієї вітроенергетичної системи є коливання швидкості вітру. Потужність, що генерується WECS, прямо пропорційна профілю вітру. Як наслідок, невелика зміна швидкості вітру має великий вплив на видобуту потужність. Фактично, остання є неузгодженою з електромережею з тієї причини, що напруга в мережі повинна мати прийнятно стабільну амплітуду і частоту. Вітрова турбіна – це переривчасте джерело енергії, яке може спричинити коливання, такі як затримки зв'язку та кібератаки, у попиті на електроенергію та частоті енергосистеми. Будь-яка зміна вимог до потужності мережі може спричинити відхилення від номінальної частоти, що призводить до потенційного пошкодження пристроїв, підключених до мережі. Однак, з метою підвищення стабільності та надійності енергосистем, їх вивченню було присвячено багато зусиль [12,13,14].

Останнім часом PMSG все частіше використовуються для вітрогенераторів зі змінною швидкістю, враховуючи їх хороші робочі характеристики, високий ККД (кофіцієнт корисної дії), високу питому потужність, низьке тепловиділення і невеликі розміри. Вітрогенератор підключається до електромережі за допомогою одного силового електронного інтерфейсу і одного резистивно-індукторного (RI – Resistor-Inductor) фільтра. Силовий електронний інтерфейс складається з випрямляча змінного/постійного струму, інвертора постійного/змінного струму та загальної шини постійного струму, які керуються двома стратегіями векторного керування. Таким чином, визначення адекватних стратегій

керування є дуже важливим аспектом цієї системи. Загалом, найбільш відомим методом керування є традиційна стратегія векторного керування, що інтегрує контур керування на основі пропорційно-інтегральних (VCS-PI – Vector Control Strategy on Proportional Integral) регуляторів або пропорційно-інтегральних похідних (ПІД) регуляторів [15]. ПІД-регулятор можна використовувати для керування деякими аспектами нелінійної системи, особливо якщо нелінійність невелика або може бути апроксимована лінійною моделлю в певному робочому діапазоні [16,17]. У цьому випадку для керування системою в цьому діапазоні можна використовувати ПІД-регулятор, і якість керування буде прийнятною. Дійсно, ПІ- та ПІД-регулятори більше підходять для лінійних систем, але ці регулятори можуть бути використані для керування нелінійними системами, такими як електричні машини, вітрові турбіни тощо [18,19,20,21]. Однак, WECSs на основі ПІ- або ПІД-регуляторів забезпечують низьку продуктивність з точки зору відстеження, точності та робастності, оскільки вони піддаються впливу різних внутрішніх та зовнішніх збурень, таких як коливання швидкості вітру, зміни кута повороту лопатей турбіни, зміни швидкості генератора та зміни опору статора через коливання температури або інші фактори [22,23]. Отже, лінійність регуляторів VCS-PI не розрахована на те, щоб протистояти складній нелінійній поведінці WECSs, оскільки неадекватний вибір коефіцієнта підсилення регулятора може призвести до нестабільності системи [24].

Тому VCS WECSs зазвичай базується на пропорційно-інтегральному (ПІ) регуляторі для керування струмами генератора, мережевими струмами та напругою постійного струму [25]. Крім того, лінійний ПІ-регулятор не може бути адекватним до варіацій параметрів та зовнішніх збурень [26], які, як наслідок, впливають на точність стеження, стабільність та динаміку керованої системи [27]. Таким чином, негативний вплив цих збурень не може бути пом'якшений за допомогою VCS-PI-регуляторів з фіксованим коефіцієнтом підсилення [27].

Оскільки WECS є нелінійною системою, добре розроблений нелінійний регулятор може подолати обмеження ПІ- та ПІД-регуляторів і досягти чудових характеристик керування в умовах невизначеності та зовнішніх збурень [28]. В останні роки дослідники запропонували різні передові методи нелінійного керування для WECSs зі змінною швидкістю, включаючи керування на основі зворотного кроку [29], адаптивне керування [30], прогностичне керування [31], інтелектуальне керування на основі штучних нейронних мереж і систем нечіткої логіки [32,33,34,35,36] та керування в ковзному режимі (SMC – Sliding Mode Control) [25,37,38]. SMC вважається найбільш придатним методом керування для ВЕК завдяки його високій робастності. Однак, основним недоліком SMC першого порядку є явище бовтанки, яке викликає високі коливання навколо точки рівноваги і вібрації в електричних машинах і механічних частинах системи через переривчастий характер керуючої дії [39,40]. Ця проблема призвела до того, що розробники відмовляються від SMC для певних промислових застосувань. Тому різні дослідження з удосконалення були зосереджені на зменшенні дребезгу, який вважається основною проблемою SMC. Замість переривчастої керуючої дії можна використовувати функції насичення або сигмоїдальні функції, щоб послабити бовтанку, забезпечуючи безперервне керування. Однак цей закон керування спрямовує траєкторії стану системи до околу поверхні ковзання, а не до самої поверхні ковзання, що впливає на стійкість керування при збуреннях [41,42]. Крім того, алгоритм режиму ковзання вищого порядку використовується для зменшення явища блукання. Однак цей метод вимагає похідних вищих порядків у реальному часі [43]. У роботі [25] автори запропонували SMC для мережі, підключеної до WECS, на основі PMSG. Дійсно, SMC було запропоновано для заміни ПІ-регуляторів, що використовуються в стратегіях керування вітрогенераторами. SMC запропонував би хороші показники стабільності, хорошу динаміку і швидку реакцію, але це спричинило б високі коливання електромагнітного моменту, квадратичного струму статора, постійного струму мережі та інжектованої

активної і реактивної потужності. У роботі [30] автори запропонували метод класичного співвідношення швидкості вітроколеса з ПІ-регулятором (CTSR-PI – Classical Tip Speed Ratio technique with PI) для вітрогенератора. Ефективність CTSR-PI контролера була перевірена за допомогою імітаційного моделювання, і він показав хороші результати з точки зору динамічного відгуку і при зміні вітру, але мав обмеження, такі як низька точність відстеження. У тому ж контексті автори запропонували адаптивний регулятор з інтегральним зворотним зв'язком (AC-TSR-IBS – Adaptive Control Tip Speed Ratio Integral Backstepping) для подолання обмежень регулятора CTSR-PI, але його продуктивність не була оцінена при зміні параметрів. У роботі [44] автори запропонували метод нейронного керування другого порядку (NSOSMC – Neuro Second-Order SMC) на основі штучних нейромережових контролерів з нечіткою просторовою векторною модуляцією (NSOSMC-FSVM – Fuzzy Space Vector Modulation) для керування реактивною та активною потужністю асинхронного генератора з подвійним живленням. Ці контролери порівнювалися з традиційною просторово-векторною технікою керування на основі SOSMC, а продуктивність обох контролерів перевірялася за допомогою імітаційного моделювання. NSOSMC-FSVM пропонувала хороші показники порівняно з SOSMC з точки зору стійкості до змін вітру та точності відстеження, але вона мала обмеження, такі як складність реалізації алгоритму. Крім того, реалізація великих нейронних мереж вимагала значного часу на обробку даних. Крім того, SOSMC потребувала інформації про поверхню ковзання та її похідну [45]. У роботі [46] автори запропонували дві нейронні мережі для автоматизації налаштування параметрів ПІД-регулятора; створення даних зайняло приблизно 120 годин для генерації мільйона вибірок даних. Значний час витрачався на навчання, що ускладнювало реалізацію в реальному часі.

Більше того, поєднання технології нечіткої логіки з ПІ-регулятором може гарантувати якість відстеження навіть при високих невизначеностях моделі. У роботі [47] автори порівняли ПІ-регулятори з лінійною та нечіткою

логікою для активного інвертора, що підключається до мережі, з метою компенсації гармонік, що генеруються нелінійною системою. Гармоніки, індуковані ПІ-регулятором, були високими порівняно з регулятором на основі FLC. Насправді, фазифікація може допомогти пом'якшити вплив нелінійностей і збурень кількома способами [48]. По-перше, вона дозволяє представити складні нелінійні зв'язки між вхідними та вихідними змінними. Це означає, що система управління може впоратися з нелінійностями, які може бути важко змоделювати за допомогою традиційних методів управління. По-друге, фазифікація дозволяє працювати з невизначеностями та неточною інформацією. У традиційних системах управління невизначеності та збурення можуть призвести до непередбачуваної поведінки системи. Нечітка логіка може впоратися з невизначеністю, представляючи вхідні та вихідні змінні як нечіткі множини, що дозволяє міркувати зі ступенями приналежності. Нарешті, FLC може динамічно налаштовувати параметри регулятора на основі змін вхідних сигналів. Нечіткі правила можуть бути розроблені для модифікації виходу регулятора в залежності від величини та напрямку збурення, що може зменшити чутливість системи керування до зовнішніх збурень. Нечітке планування підсилення (FGS – Fuzzy Gain Scheduling) у поєднанні з ПІД-регулюванням є потужним методом керування складними та нелінійними системами, такими як WECS. Нечітка логіка дозволяє контролеру адаптуватися в режимі реального часу до мінливих умов експлуатації, що є критично важливим для забезпечення оптимальної продуктивності та стабільності системи [48].

У цьому контексті перший внесок цієї роботи полягає у поєднанні стратегій векторного керування з FGS на основі ПІД (VCS-FGS-PID) для керування вищою продуктивністю підключеної до мережі ВЕС. Система керування складається з трьох частин:

- VCS-FGS-PID для перетворювача на стороні PMSG;
- VCS-FGS-PID для перетворювача на стороні мережі;
- FGS-PID для регулювання напруги на шині постійного струму.

Регулятор VCS-FGS-PID для перетворювача на стороні PMSG контролює електромагнітний момент, частоту обертання PMSG, квадратичний струм статора і постійний струм статора. Він використовує опорний електромагнітний момент як вхідний сигнал, який генерується алгоритмом відстеження точки максимальної потужності (MPPT – Maximum Power Point Tracking). Крім того, VCS-FGS-PID мережевого перетворювача використовується для керування активною та реактивною потужністю, що видається в мережу. Він також використовується для регулювання напруги та частоти з метою досягнення задовільного рівня безпеки енергосистеми. У цій роботі пропонується FGS-PID завдяки його стійкості до зовнішніх збурень, таких як раптові зміни швидкості вітру та внутрішні збурення. Як передовий підхід, підхід VCS-FGS-PID вирізняється своїми хорошими характеристиками при вищезгаданих збуреннях. Це здійснюється в реальному часі шляхом налаштування коефіцієнтів підсилення ПІД-регуляторів [47]. Вищезгадані три частини системи керування, які розроблені та реалізовані апаратно з використанням програмованої користувачем вентиляльної матриці (FPGA), відрізняються від інших опублікованих робіт.

В даний час алгоритми управління електричними системами реалізуються, як правило, на двох типах програмованих технологій: FPGAs та цифрова обробка сигналів (DSP – Digital Signal Processing). Обмежуючим фактором DSP є малий час виконання, що пов'язано з послідовною обробкою алгоритму керування. Для того, щоб подолати обмеження DSP, FPGAs можна вважати кращим рішенням. Переваги використання апаратних ПЛІС численні:

- швидке створення прототипів;
- скорочення часу виконання завдяки паралельній обробці;
- можливість використовувати надто важкі методи управління з точки зору обчислювального часу [49].

Таким чином, FPGAs були використані в різноманітних дослідницьких роботах [49,50,51,52]. Для реалізації алгоритмів керування на FPGAs

використовувалися два основні методи, а саме: системний генератор Xilinx System Generator (XSG) та програмування на мові опису апаратного забезпечення надшвидкісних інтегральних схем (VHDL) [53,54,55,56]. Для запропонованого алгоритму керування за допомогою інструменту XSG генерується VHDL-код. Інструмент XSG обрано через його гнучкість, простоту та швидкість.

У цьому контексті другий внесок цієї роботи полягає у розробці за допомогою XSG та реалізації на платі FPGA запропонованого алгоритму VCS-FGS-PID для перетворювача на стороні PMSG, запропонованого алгоритму VCS-FGS-PID для перетворювача на стороні мережі та FGS-PID для регулювання напруги на шині постійного струму. Щодо WECS, то вона складається з вітрогенератора, яка виробляє вітроенергію і підключена до електромережі через RL-фільтр та інтерфейсу силової електроніки, що містить два перетворювачі, з'єднані між собою однією загальною шиною постійного струму. Новизна та основний внесок цієї роботи полягає в наступному: теоретично, за допомогою моделювання та за допомогою апаратного забезпечення в контурному співімітаційному моделюванні:

- запропоновано надійні підходи VCS-FGS-PID для керування електромагнітним моментом, квадратичною складовою струму статора, постійним струмом, що вводиться в мережу, активною та реактивною потужністю, що вводиться в мережу, а також напругою на шині постійного струму. Запропонований підхід може забезпечити хорошу продуктивність з точки зору відстеження і точності, а також високу надійність при зміні опору статора. Запропоновані стратегії керування гарантують відмінну стійкість до змін опору статора і хорошу точність відстеження контрольованих змінних навіть при високих коливаннях швидкості вітру;

- алгоритми запропонованих FGS-PID VCS та FGS-PID напруги на шинах постійного струму розроблені з використанням інструменту XSG для перевірки поведінки WECS за допомогою моделювання та автоматичної генерації VHDL-коду;

- реальна апаратна ко-симуляція запропонованих алгоритмів VCS-FGS-PID з використанням ПЛІС Zed-Board AES-Z7EV-7Z020-G була проведена до завершального етапу експериментальної перевірки, щоб уникнути ризиків пошкодження та гарантувати експериментальну експлуатацію. Це також скорочує загальний час, відведений на експерименти, час створення прототипу, час виходу на ринок і вартість розробленої системи.

2 ОПИС ТА МОДЕЛЮВАННЯ WECS

У цій роботі представлено мережеву WECS зі змінною швидкістю, підключену до мережі. Вона складається з вітрової турбіни як основного джерела, що виробляє електроенергію для PMSG. Електромережа з'єднана з ВЕС через режекторний фільтр та силовий електронний інтерфейс. Силовий електронний інтерфейс складається з трифазного випрямляча (перетворювач 1 AC/DC) та інвертора (перетворювач 2 DC/AC), з'єднаних між собою загальною шиною постійного струму, як показано на рисунку 2.1. RL-фільтр використовується для зменшення гармонік у вихідній потужності інвертора.

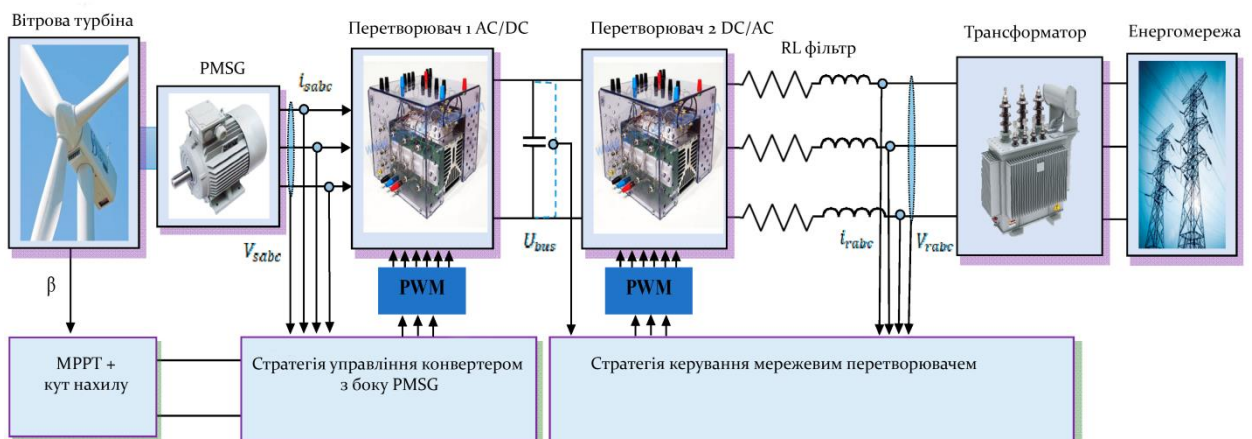


Рисунок 2.1 – Архітектура WECS

2.1 Моделювання вітрових турбін

Вітрогенератор уловлює аеродинамічну потужність P_{aer} , як описано в [57]:

$$P_{aer} = C_p P_w = \frac{1}{2} C_p (\lambda, \beta) \rho A V_v^3, \quad (2.1)$$

де ρ позначає густину повітря (кг/м³), $A = \pi R^2$ – площу, яку охоплюють

лопаті вітрової турбіни (m^2), V_v швидкість вітру (м/с), β – кут нахилу лопатей ($^\circ$), λ – відношення швидкостей, а C_p – коефіцієнт потужності.

Як функція аеродинамічної потужності, T_{aer} є аеродинамічним моментом вітрової турбіни, який виражається наступним чином [23]:

$$T_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{mec}}, \quad (2.2)$$

де Ω_{mec} швидкість обертання вітрової турбіни (рад/с).

Коефіцієнт потужності C_p вказує на характеристики вітрової турбіни, а її ефективність може бути виражена через кут орієнтації λ та співвідношення швидкостей лопатей β наступним чином [23]:

$$C_p = 0,5 \left(\frac{151}{\lambda_i} - 0,58\beta - 0,002\beta^{2,14} - 10 \right) e^{-\frac{18,4}{\lambda_i}}, \quad (2.3)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - 0,02\beta} \frac{0,003}{\beta^2 + 1}}. \quad (2.4)$$

Співвідношення між швидкістю вітру і швидкістю лопаті визначає коефіцієнт швидкості наконечника λ наступним чином:

$$\lambda = \frac{\Omega_{mec} R}{V_v}. \quad (2.5)$$

Керування вітровою турбіною здійснюється з метою отримання максимальної доступної потужності вітру. Виходячи з теорії Беца, коефіцієнт потужності не повинен перевищувати 0,593 (експериментально) [57].

Нарешті, діаграма на рисунку 2.2 підсумовує модель вітрової турбіни. Вхідними параметрами є кут нахилу β , швидкість вітру V та електромагнітний момент. Вихід – механічна швидкість.

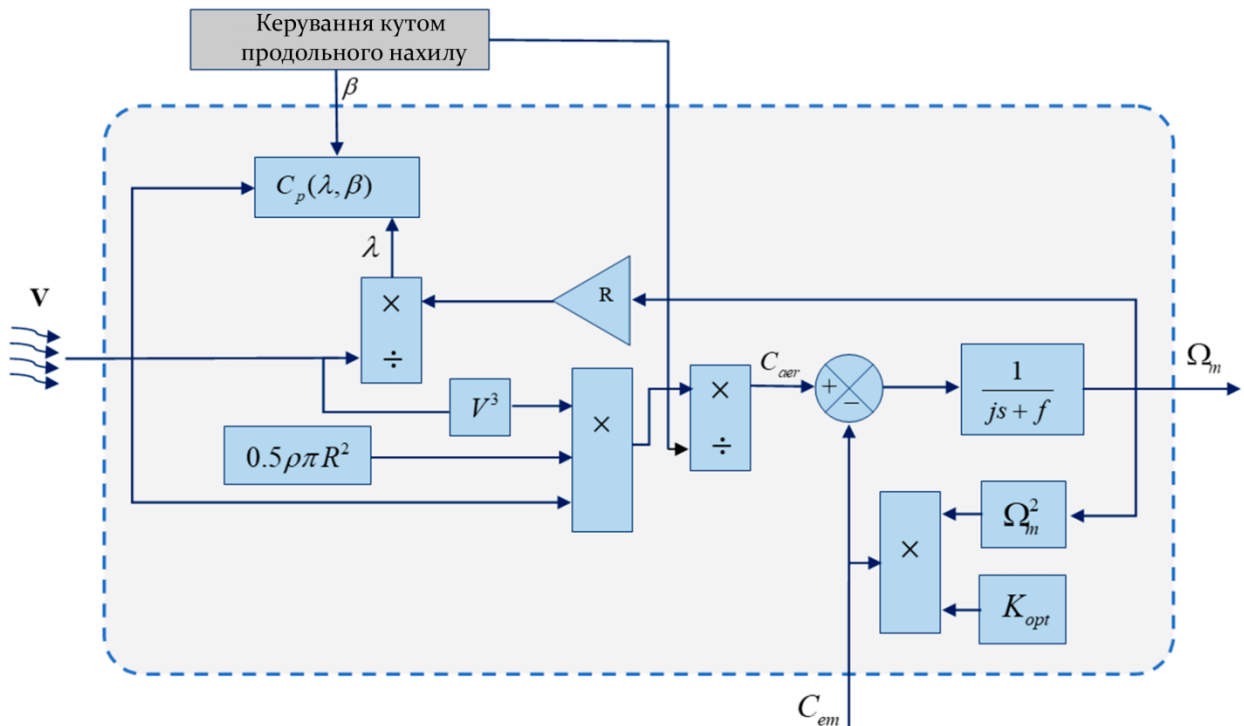
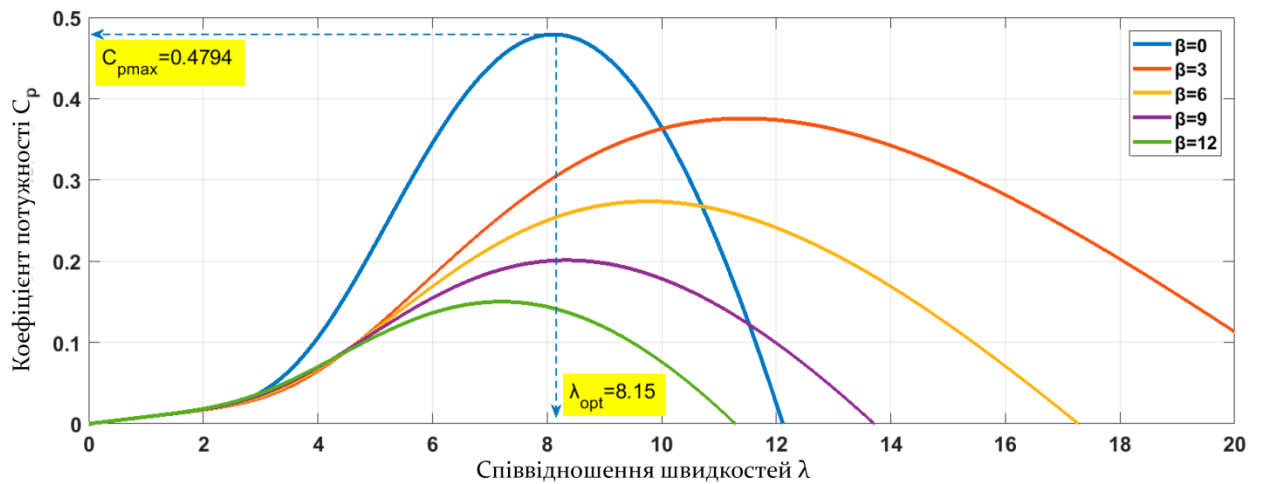


Рисунок 2.2 – Схема моделі вітрової турбіни

На рисунку 2.3 зображено варіацію C_p відносно λ та β , на якому представлено оптимальне значення співвідношення швидкостей $\lambda_{opt} = 8,15$, що відповідає максимальному значенню $C_{pmax} = 0,4794$ при $\beta = 0$. З огляду на цей факт, рівняння (2.6) дає максимальну потужність, яку ми можемо отримати за допомогою алгоритму МРРТ [25]:

$$P_{MRPT} = \frac{1}{2} \frac{\rho C_{pmax} R^5 \Omega_{mec}^3}{\lambda_{opt}^3}, \quad (2.6)$$

$$T_{em MRPT} = \frac{1}{2} \frac{\rho C_{pmax} R^5 \Omega_{mec}^2}{\lambda_{opt}^3}, \quad (2.7)$$

Рисунок 2.3 – C_p в порівнянні з λ

Для рекуперації максимальної кількості доступної кінетичної енергії вітру кут нахилу лопатей дорівнює нулю, що відповідає оптимальним значенням C_p і λ для роботи в режимі МРРТ. Однак важливо обмежити швидкість обертання турбіни у випадку, якщо швидкість вітру перевищує номінальну, щоб захистити систему від механічних проблем. У цій роботі слід додати систему управління, яка називається «контроль кроку», щоб спільно контролювати швидкість, а також потужність вітрової турбіни і обов'язково обмежувати їх при перевищенні номінального значення швидкості вітру. На рисунку 3.4 показано роботу системи керування кроком вітрогенератора.

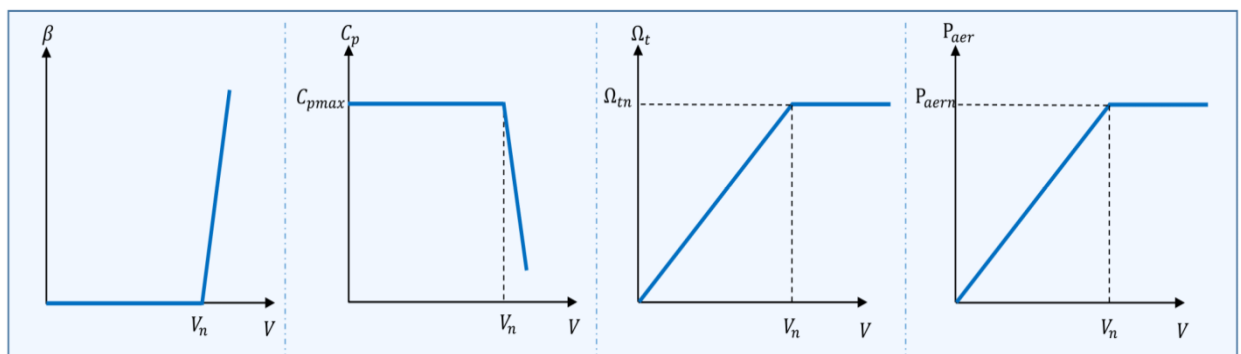


Рисунок 2.4 – Еволюція різних характеристик вітрових турбін

2.2 Шари пулу типів

Змінна швидкість вітрогенератора WECS можлива завдяки інтерфейсу силових електронних перетворювачів, який дозволяє частково або повністю від'єднати вітрогенератори від електромережі. Доступна потужність визначається всіма характеристиками, які стосуються швидкості обертання генератора. Рисунок 3.5 ілюструє зміну швидкості вітру. Відповідно, коли ми рухали генератор з фіксованою швидкістю, ми не могли використовувати жодну теоретичну криву максимальної потужності. Тому для оптимізації робочої точки швидкість обертання валу генератора повинна регулюватися залежно від швидкості вітру. Нехай точка А для швидкості вітру V_2 відповідає аеродинамічному піку потужності з координатами (P_1, Ω_1) . Якщо швидкість турбіни практично не змінюється, а швидкість вітру змінюється від V_2 до V_3 , потужність P_2 стає в іншій точці В, відмінній від піку другої характеристики. Для отримання максимальної потужності швидкість обертання генератора повинна відрізнятись від іншої швидкості обертання, яка є більшою порівняно з попередньою, що вимагає зміни цієї швидкості обертання в залежності від вітру для досягнення максимальної потужності (точка С).

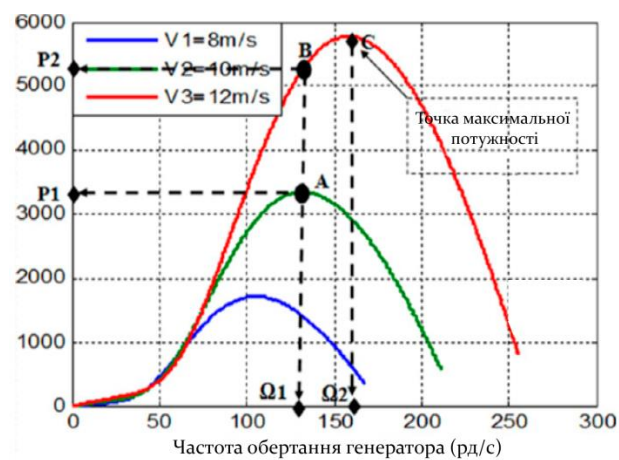


Рисунок 2.5 – Аеродинамічна потужність для різних значень швидкості вітру як функція механічної швидкості

2.3 Моделювання PMSG та підключення до електромережі

Ми підключили вітрову турбіну до PMSG для перетворення механічної енергії в електричну. Цей PMSG моделюється в d-q фреймі наступним чином [58]:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + L_{sd} \frac{d}{dt} i_{sd} - \omega L_{sd} i_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + L_{sq} \frac{d}{dt} i_{sq} - \omega (L_{sd} i_{sq} + \varphi_m) \\ T_{em} = p \varphi_m i_{sq} \end{cases}, \quad (2.8)$$

де R_s – опір статора, L_s – індуктивність статора, p – число пар полюсів, φ_m позначає потік постійного магніту (Wb), а ω – електричну швидкість.

Для підключення вітрогенератора до електромережі перед трансформатором використовувався трифазний RL. Вирази в d-q рамковій моделі мають вигляд (2.9) [23]:

$$\begin{cases} L_r \frac{d}{dt} i_{rd} = V_{id} - R_r i_{rd} + L_r \omega_R i_{rq} - V_{rd} \\ L_r \frac{d}{dt} i_{rq} = V_{iq} - R_r i_{rq} + L_r \omega_R i_{rd} - V_{rq} \end{cases}, \quad (2.9)$$

де ω_R частота мережі, R_r опір сітки, а L_r індуктивність сітки.

3 СТРАТЕГІЯ УПРАВЛІННЯ WECS

Метою цієї роботи є представлення ПІД-регуляторів VCS-FGS для підключених до електромережі частотно-регульованих вітроелектричних систем. Конструкція системи керування VCS-FGS-PID в основному фокусується на налаштуванні коефіцієнтів підсилення ПІД-регуляторів з використанням технології нечіткої логіки як рішення для подолання проблем невизначеності параметрів системи.

3.1 Традиційна техніка векторного керування WECS

У цій частині для керування WECS пропонуються звичайні ПІ-регулятори VCS-PI. Основна мета цих контролерів – довести їхню чутливість до дуже великих діапазонів зміни швидкості вітру та внутрішніх нелінійностей системи. Дійсно, класична техніка векторного керування розроблена для оцінки основного внеску цієї роботи.

Опорні струми цієї стратегії векторного керування, застосовані до PMSG, визначаються як [25]:

$$\begin{cases} i_{sd-ref} = 0 \\ i_{sq-ref} = \frac{C_{emMPPT}}{\omega\varphi} \end{cases} \quad (3.1)$$

Вітрова турбіна управляється за допомогою звичайної техніки управління, що застосовується для PMSG, для отримання максимальної доступної потужності. Ми навчили контролер керувати напругою на шині постійного струму, щоб підтримувати напругу на фіксованому значенні, яке

абсолютно не залежить від зміни швидкості вітру.

Стратегія векторного керування застосовується до перетворювача 2 (DC/AC) як функція керування активною та реактивною потужністю, де обидві обмінюються з виробничою системою та електромережею. Для керування обома елементами струмів i_{rd-ref} побудовано два контури керування: i_{rd-ref} та i_{rq-ref} . Як наслідок, вони можуть регулювати активну та реактивну потужність приєднання до мережі відповідно. Струми i_{rd-ref} та i_{rq-ref} визначаються активною та реактивною потужністю джерел P_r^* та Q_r^* відповідно:

$$\begin{cases} i_{rd-ref} = \frac{P_r^* V_{rd} + Q_r^* V_{rq}}{V_{rd}^2 + V_{rq}^2} \\ i_{rq-ref} = \frac{P_r^* V_{rq} + Q_r^* V_{rd}}{V_{rd}^2 + V_{rq}^2} \end{cases} \quad (3.2)$$

Для забезпечення роботи з одиничним коефіцієнтом потужності WECS, опорна реактивна потужність може бути зафіксована на нулі ($Q_r^*=0$). В результаті, як активна потужність P_r , так і реактивна потужність Q_r будуть функціонувати на основі прямої та квадратичної складових струму мережі. Проблема в цьому випадку полягає в тому, як керувати активною та реактивною потужністю окремо. Для цього достатньо орієнтувального завдання (d, q) для відміни квадратичної ($V_{rq} = 0$) складової напруги. Відповідно до цього, $V_r = V_{rd}$. Таким чином, модель зв'язку з електромережею, задана рівнянням (3.1), та співвідношення постійної та квадратичної складових струму електромережі набувають вигляду [25]:

$$\begin{cases} L_r \frac{d}{dt} i_{rd} = V_{od} - R_r i_{rd} + L_r \omega_r i_{rq} - V_r \\ L_r \frac{d}{dt} i_{rq} = V_{oq} - R_r i_{rq} + L_r \omega_r i_{rd} \end{cases}, \quad (3.3)$$

$$\begin{cases} i_{rd-ref} = \frac{P_r^*}{V_{rd}} \\ i_{rq-ref} = 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

Вихідна напруга перетворювача повинна мати однакові характеристичні змінні для кожної фази, щоб гарантувати правильне підключення генераторів відновлюваної енергії до електромережі. Цей ефект досягається, якщо правильно відрегулювати кут зсуву фаз напруги. Петля фазового автопідстроювання (PLL – Phase Locked Loop) є найбільш типовим підходом, що використовується для синхронізації основного джерела енергії з виходами мережевих перетворювачів. Таким чином, у цьому дослідженні важливо побудувати один PLL (рисунок 3.1), здатний правильно аналізувати кут зсуву фаз напруги однієї ідеальної електромережі.

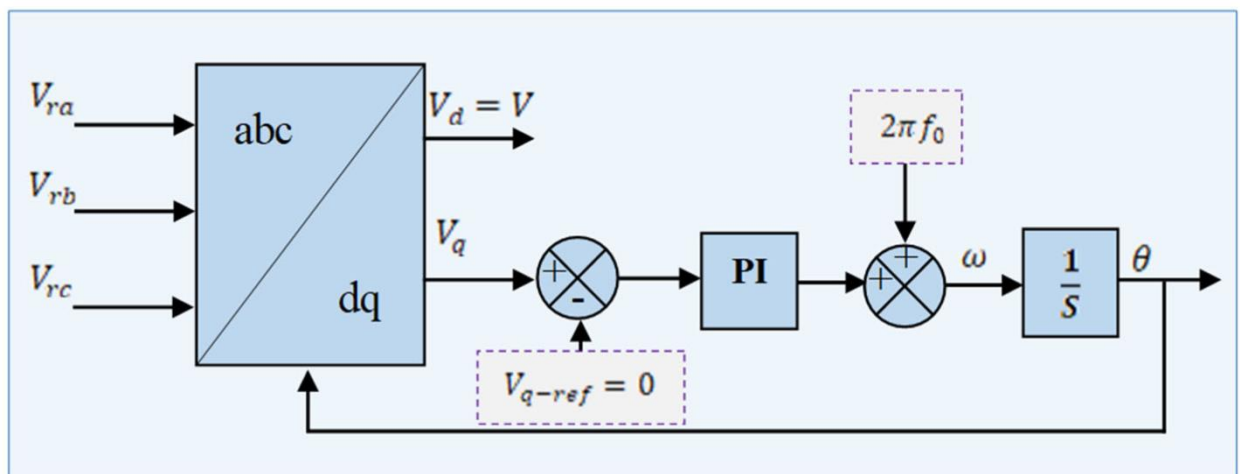


Рисунок 3.1 – Алгоритм PLL

Традиційні векторні закони керування ПІ дають кращі результати для лінійних систем з постійними параметрами. З іншого боку, ці закони для нелінійних систем, таких як вітрові системи, є недостатньо адекватними, особливо коли потрібна точність системи, а інші динамічні характеристики

буде важко отримати під час зміни швидкості вітру [59]. Для подолання цього недоліку в даній роботі пропонується підхід з використанням ПД-регулятора VCS-FGS.

3.2 Нечіткий ПД-регулятор з нечітким плануванням посилення

Звичайний VCS-PI не може визначити варіацію збільшення та зменшення помилок, оскільки здатен реагувати лише на миттєве значення помилки. Отже, він не підходить для нелінійних систем, таких як вітрогенератори. Для подолання цієї проблеми пропонується ПД-регулятор VCS-FGS. Структура цієї стратегії керування детально показана на рисунку 3.2.

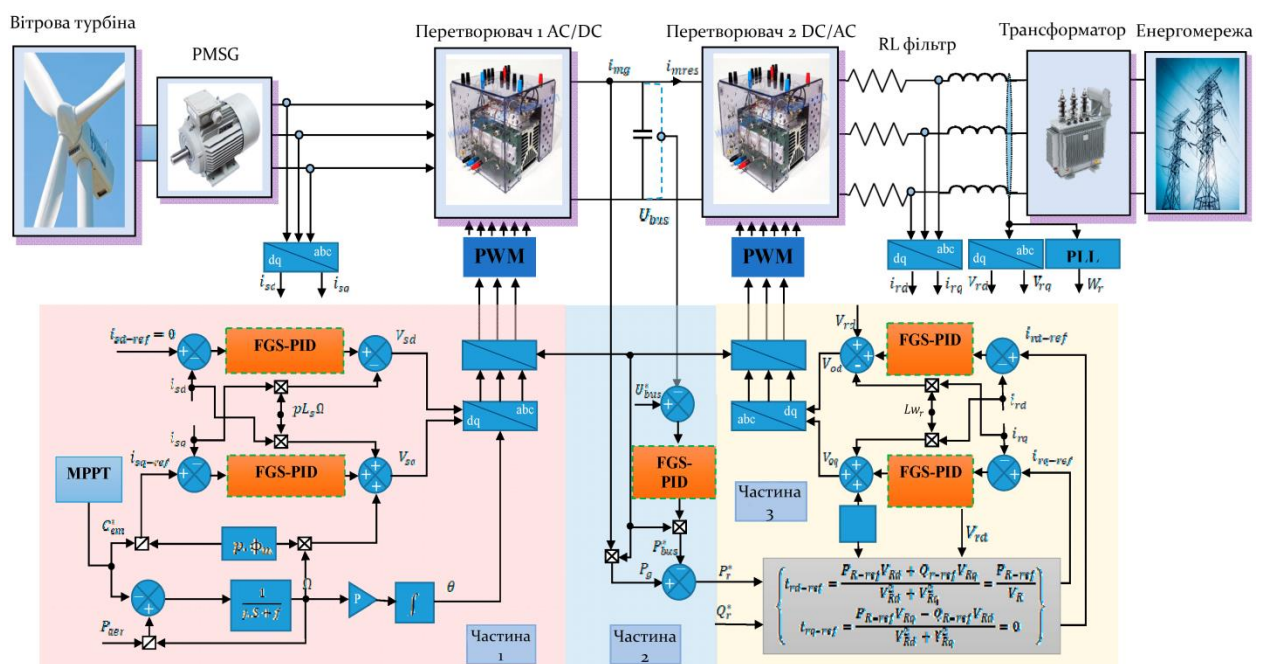


Рисунок 3.2 – Схема ПД-регулятора WECS VCS-FGS-PID

Як показано на рисунку 3.3, VCS-FGS-PID базується на трьох етапах: фазифікація, виведення та дефазифікація [60]. Фазифікація є важливим аспектом FGS-PID-регуляторів, оскільки вона дозволяє їм справлятися з

нелінійностями та невизначеностями в системі. Фаззифікація передбачає представлення входів і виходів системи у вигляді нечітких множин, що дозволяє контролеру міркувати про систему більш гнучко і надійно. Однак FGS-PID-регулятори можуть коригувати свої параметри в режимі реального часу на основі поточного стану системи, що дозволяє їм більш ефективно справлятися з цими нелінійностями та невизначеностями [48].

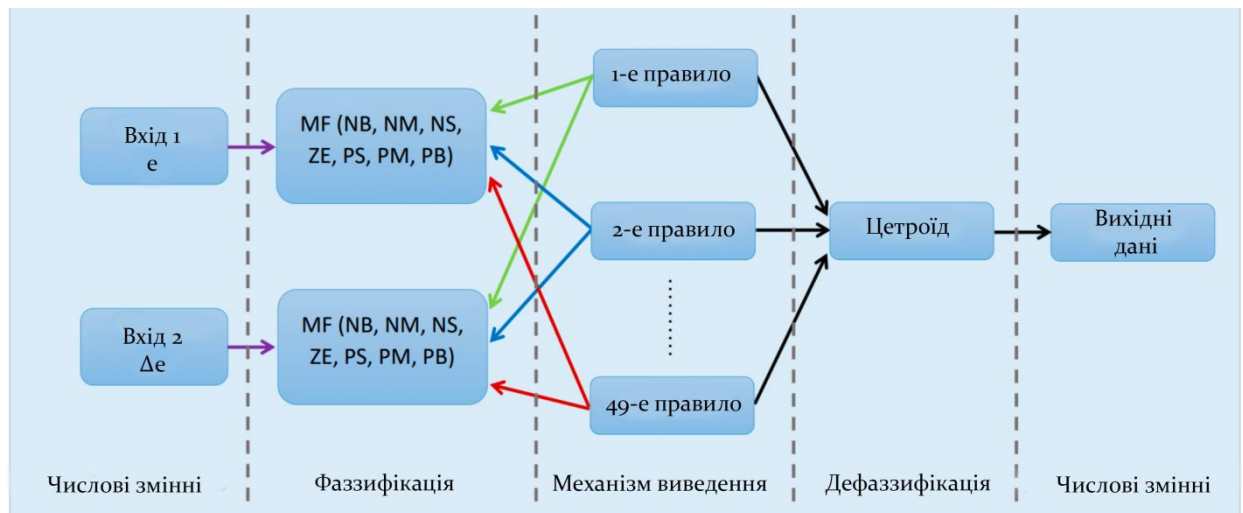


Рисунок 3.3 – Структурна схема контролера нечіткої логіки

На відміну від звичайних методів налаштування, нечітке логічне налаштування не залежить від чітко визначених або точних математичних формул. Однак він маніпулює висновками за допомогою декількох нечітких правил, заснованих на нечітких операторах: AND, OR, THEN тощо, що застосовуються до лінгвістичних змінних. Цей регулятор VCS-FGS-PID складається зі звичайної системи ПІД-регулювання, механізму нечітких міркувань і набору нечітких правил, як показано на рисунку 3.4.

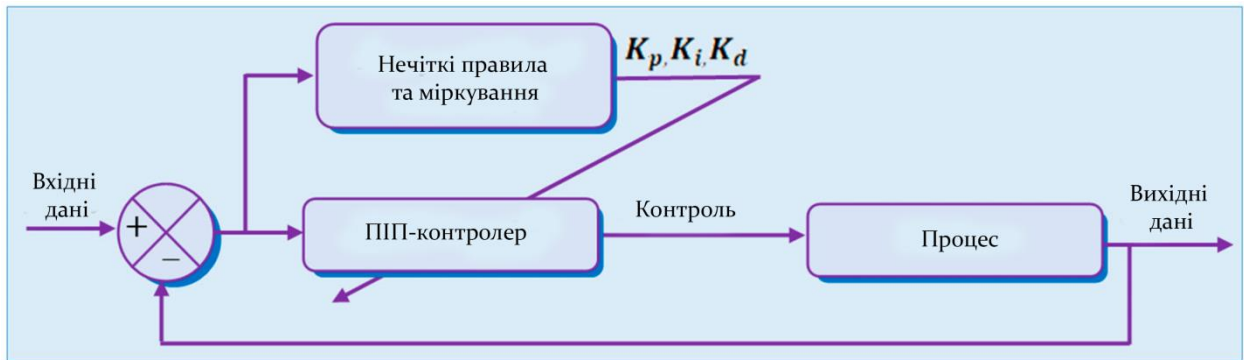


Рисунок 3.4 – Система ПІД-регулювання з контролером нечіткої логіки

Коефіцієнти підсилення ПІД-регулятора налаштовуються в режимі реального часу за допомогою нечіткого виводу та бази знань. Після цього ПІД-регулятор генерує сигнал керування. ПІД-регулятор VCS-FGS характеризується трьома коригуючими діями – K_p , K_d та K_i [56]. Можна припустити, що K_p і K_d завжди знаходяться в діапазоні $[K_{pmin}, K_{pmax}]$ і $[K_{dmin}, K_{dmax}]$, так що наступні рівняння будуть визначатися як:

$$K'_p = \frac{(K_p - K_{pmin})}{(K_{pmax} - K_{pmin})}. \quad (3.5)$$

$$K'_d = \frac{(K_d - K_{dmin})}{(K_{dmax} - K_{dmin})}. \quad (3.6)$$

Параметри ПІД-регулятора визначаються за запропонованою схемою відповідно до поточної помилки та її похідної. Фактично, інтегральна стала часу визначається як функція похідної сталої часу:

$$T_i = \alpha T_d. \quad (3.7)$$

Таким чином, ми можемо отримати інтегральний коефіцієнт підсилення наступним чином:

$$K_i = \frac{K_p}{\alpha T_d} = \frac{K_p^2}{\alpha K_d}. \quad (3.9)$$

Як тільки K'_p , K'_d та K_i , α визначено, параметри ПД-регулятора визначаються за допомогою рівнянь (13) та (15):

$$K_p = (K_{p.max} - K_{p.min})K'_p + K_{p.min}, \quad (3.7)$$

$$K_d = (K_{d.max} - K_{d.min})K'_d + K_{d.min}, \quad (3.8)$$

$$K_i = \frac{K_p^2}{(\alpha K_d)}. \quad (3.9)$$

Основне правило для визначення діапазону K_p і K_d ґрунтується на широких імітаційних дослідженнях, які проводяться для різних процесів, і полягає в наступному:

$$K_{pmin} = 0,32K_u, K_{pmax} = 0,6K_u, K_{dmin} = 0,08K_u T_u, K_{dmax} = 0,15K_u T_u, \quad (3.10)$$

де K_u та T_u позначають на межі стійкості коефіцієнт підсилення та період коливань відповідно. На рисунку 3.5 і в таблицях 3.1, 3.2 і 3.3 показано функції приналежності нечіткого регулятора, побудованого для входів E і dE. Виходами нечіткої множини є K'_p , K'_d та α . У цьому випадку маємо: позитивний великий (PB – Positive Big), позитивне середнє (PM – Positive Medium), позитивне мале (PS – Positive Small), нуль (ZO – zero), негативне мале (NS – Negative Small), негативне середнє (NM – Negative Medium) і негативне велике (NB – Negative Big).

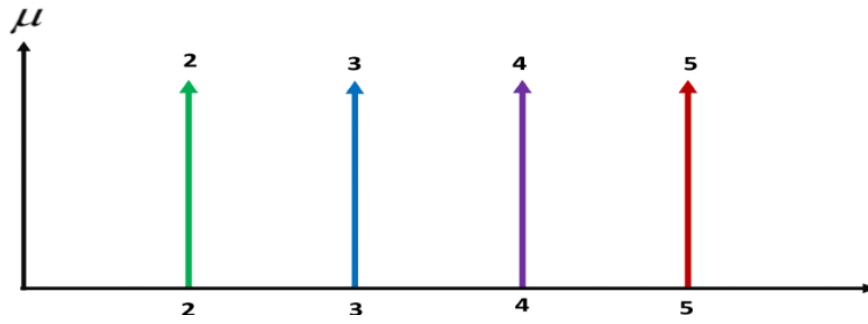


Рисунок 3.5 – функція належності α -таблиці.

Таблиця 3.1 – Нечіткі правила тьюнінгу для K'_p

		dE							
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
E	NB	S	S	S	S	S	S	S	
	NM	B	B	S	S	S	B	B	
	NS	B	B	B	S	B	B	B	
	ZO	B	B	B	B	B	B	B	
	PS	B	B	B	S	B	B	B	
	PM	B	B	S	S	S	B	B	
	PB	S	S	S	S	S	S	S	

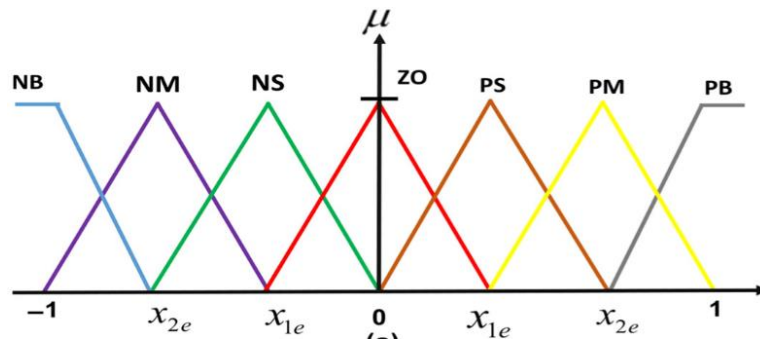


Рисунок 3.6 – Функція належності E та dE

Таблиця 3.2 – Нечіткі правила тюнінгу для K'_d

		dE						
E		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	NB	B	B	B	B	B	B	B
	NM	S	B	B	B	B	B	S
	NS	S	S	B	B	B	S	S
	ZO	S	S	S	B	S	S	S
	PS	S	S	B	B	B	S	S
	PM	S	B	B	B	B	B	S
	PB	B	B	B	B	B	B	B

Таблиця 3.3 – Нечіткі правила тюнінгу для α

		dE						
E		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	NB	2	2	2	2	2	2	2
	NM	3	3	2	2	2	3	3
	NS	4	3	3	2	3	3	4
	ZO	5	4	3	3	3	4	5
	PS	4	3	3	2	3	3	4
	PM	3	3	2	2	2	3	3
	PB	2	2	2	2	2	2	2

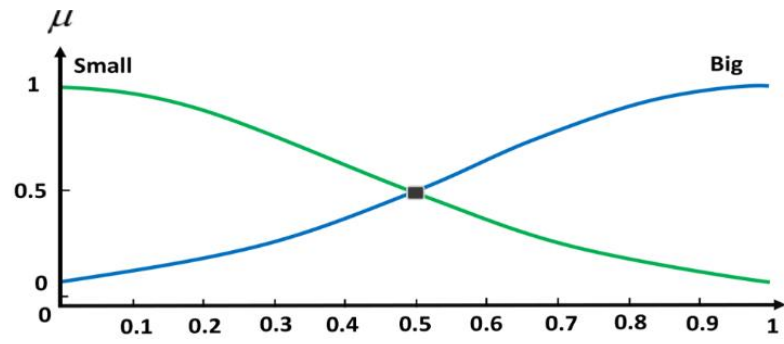


Рисунок 3.7 – Функція належності K_p та K_d

4 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

4.1 XSG-архітектури методів управління

Компанія Xilinx завжди надає своїм розробникам інструменти для спрощення етапу опису цифрових систем. XSG - це розвинений і чудовий графічний інструмент для створення, моделювання, верифікації, реалізації та валідації високопродуктивних систем на Xilinx FPGA [61]. Це також інструмент моделювання для проектування систем на основі ПЛІС. Він містить бібліотеку різних блоків, які можуть бути скомпільовані в FPGA автоматично [62]. У цій роботі XSG було використано для проектування та реалізації стратегій векторного керування на основі запропонованої системи VCS-FGS-PID змінно-швидкісної WECS, підключеної до мережі на FPGA. Спочатку для реалізації рекомендованих архітектур використовувалися XSG-блоки з пакету Simulink. Якщо спроектована архітектура була перевірена за допомогою цифрового моделювання та досягла бажаних результатів, то VHDL-код генерувався автоматично за допомогою інструменту XSG [63].

Крім того, XSG є інструментом моделювання системного рівня, який полегшує розробку апаратного забезпечення FPGA. Matlab/Simulink було використано для забезпечення високорівневого гнучкого середовища моделювання, яке добре підходить для розробки апаратного забезпечення. Цей інструмент надає високорівневі абстракції, які можна систематично компілювати у FPGA за допомогою простого використання команд. Ми створили таку систему в середовищі моделювання Simulink, використовуючи спеціальну бібліотеку, надану компанією Xilinx. Насправді, XSG добре проектує управління даними та шляхи даних. Для моделювання FPGA компанія Xilinx пропонує техніку «апаратного моделювання» для верифікації системи на платі FPGA з використанням ПК. Етапи маршрутизації, розміщення, синтезу та генерації програмних файлів були виконані в

систематичному порядку за допомогою інструменту Xilinx Vivado. На рисунку 4.1 показано, що для проектування апаратного забезпечення було обрано XSG. У роботі використовувалася версія Vivado/XSG 2018.1, яка працює на Matlab/Simulink версії 2017b, комп'ютер GF63 thin 9RCX intel I7-9750H та ПЛІС ZedBoard AES-Z7EV-7Z020-G. Після проектування системи та отримання необхідних результатів моделювання можна було генерувати файл бітового потоку після генерації коду VHDL та синтезу. Потім конфігураційні файли були використані для програмування FPGA [63,64].

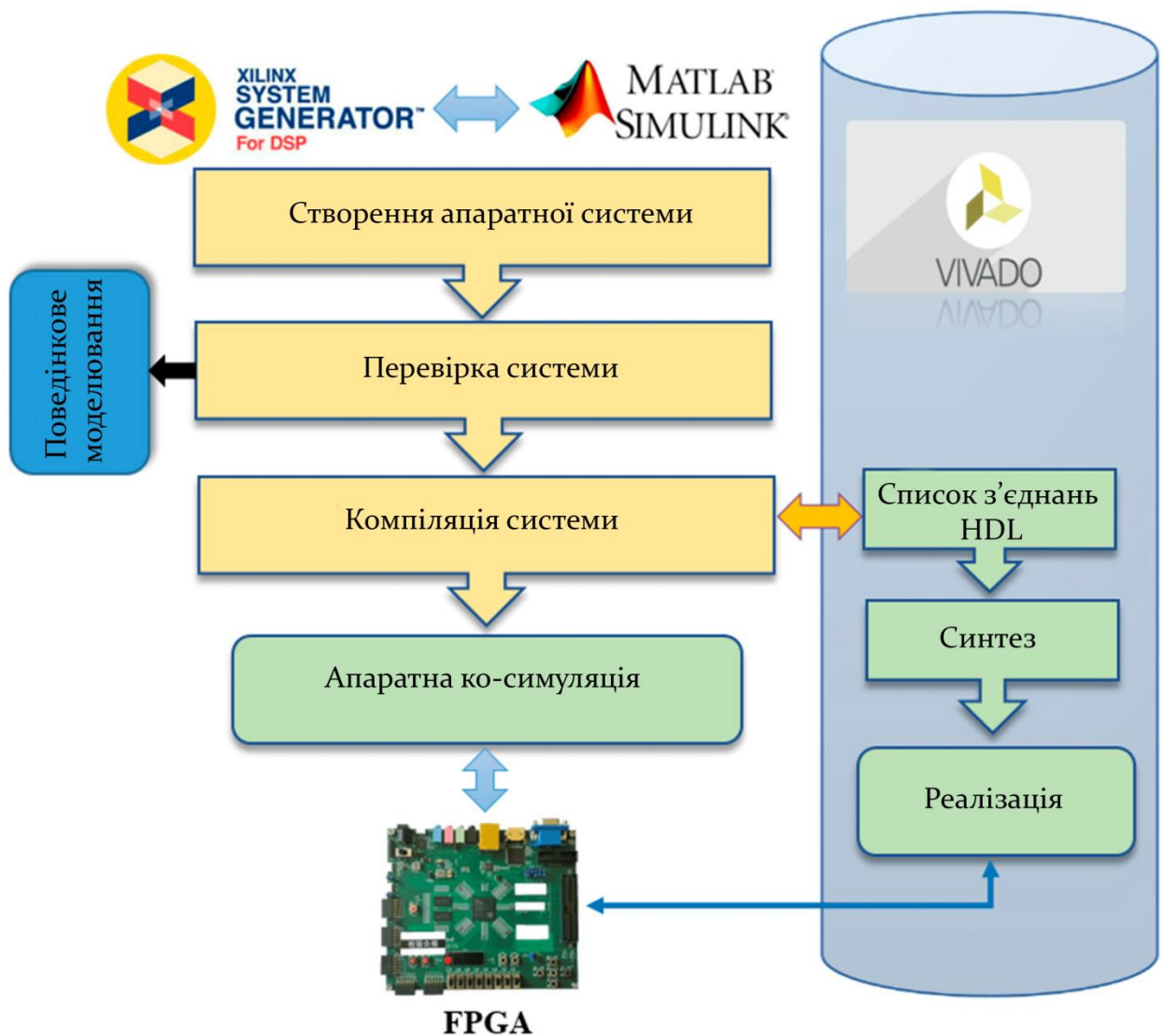


Рисунок 4.1 – Схема проектування на основі XSG

4.1.1 Розроблена архітектура VCS-PI з використанням XSG

Використане ПІ-регулювання математично виражається формулою (4.1) [60]:

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right), \quad (4.1)$$

де $T_i = K_p / K_i$, а K_p та K_i пропорційний та інтегральний коефіцієнти підсилення відповідно.

На рисунках 4.1, 4.2 та 4.3 представлено апаратну схему VCS-PI контролерів для перетворювача на стороні PMSG, апаратну схему VCS-PI контролера для напруги шини постійного струму та апаратну схему VCS-PI контролерів для перетворювача на стороні мережі, відповідно.

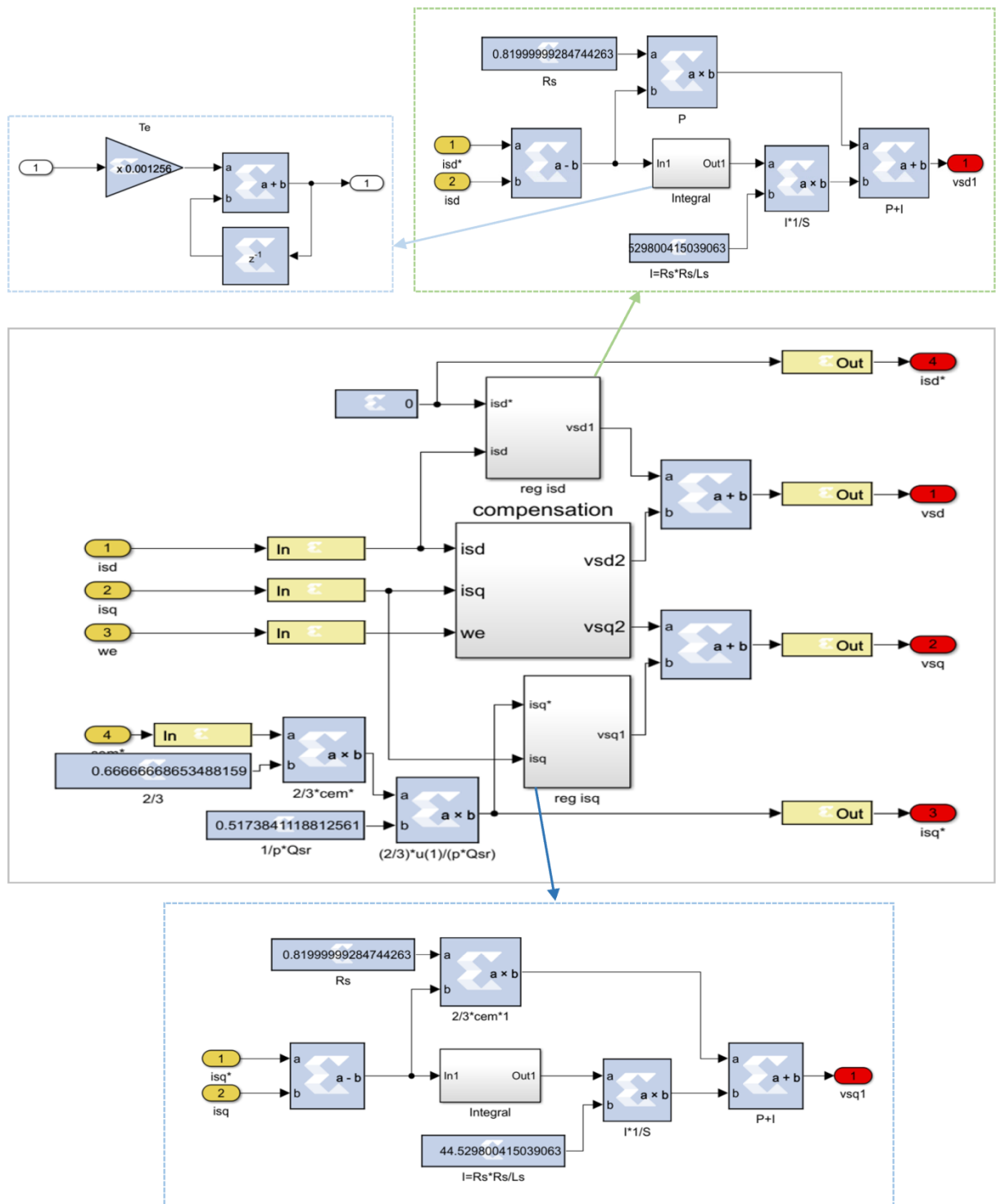


Рисунок 4.2 – Апаратне проектування VCS-PI контролерів для перетворювача на стороні PMSG

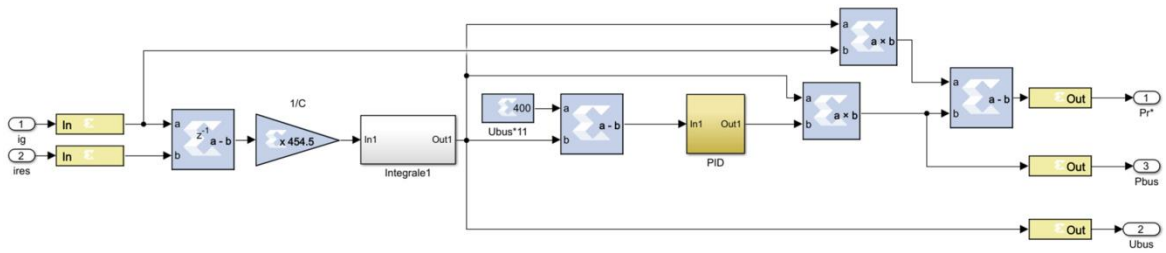


Рисунок 4.3 – Апаратна реалізація ПІ-регуляторів напруги постійного струму
VCS-PI

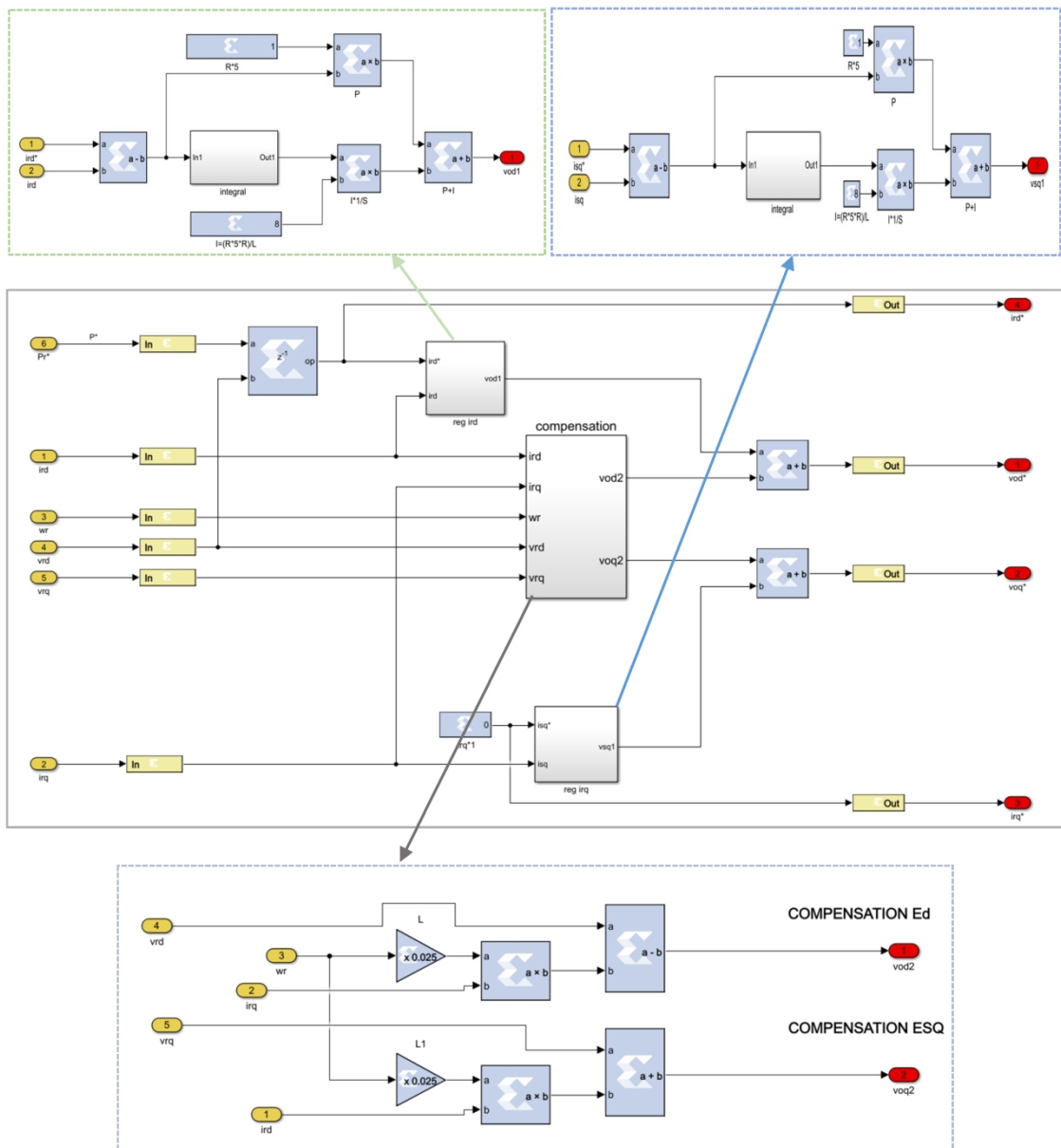


Рисунок 4.4 – Апаратна реалізація VCS-PI контролерів для мережевого
перетворювача

4.1.2 Реалізація контролерів VCS-FGSPID з використанням XSG

На рисунках 4.5, 4.6 та 4.7 представлено апаратну схему ПІД-регуляторів VCS-FGS для перетворювача на стороні PMSG, апаратну схему ПІД-регуляторів VCS-FGS для перетворювача напруги V_{dc} та апаратну схему ПІД-регуляторів VCS-FGS для перетворювача на стороні мережі, відповідно.

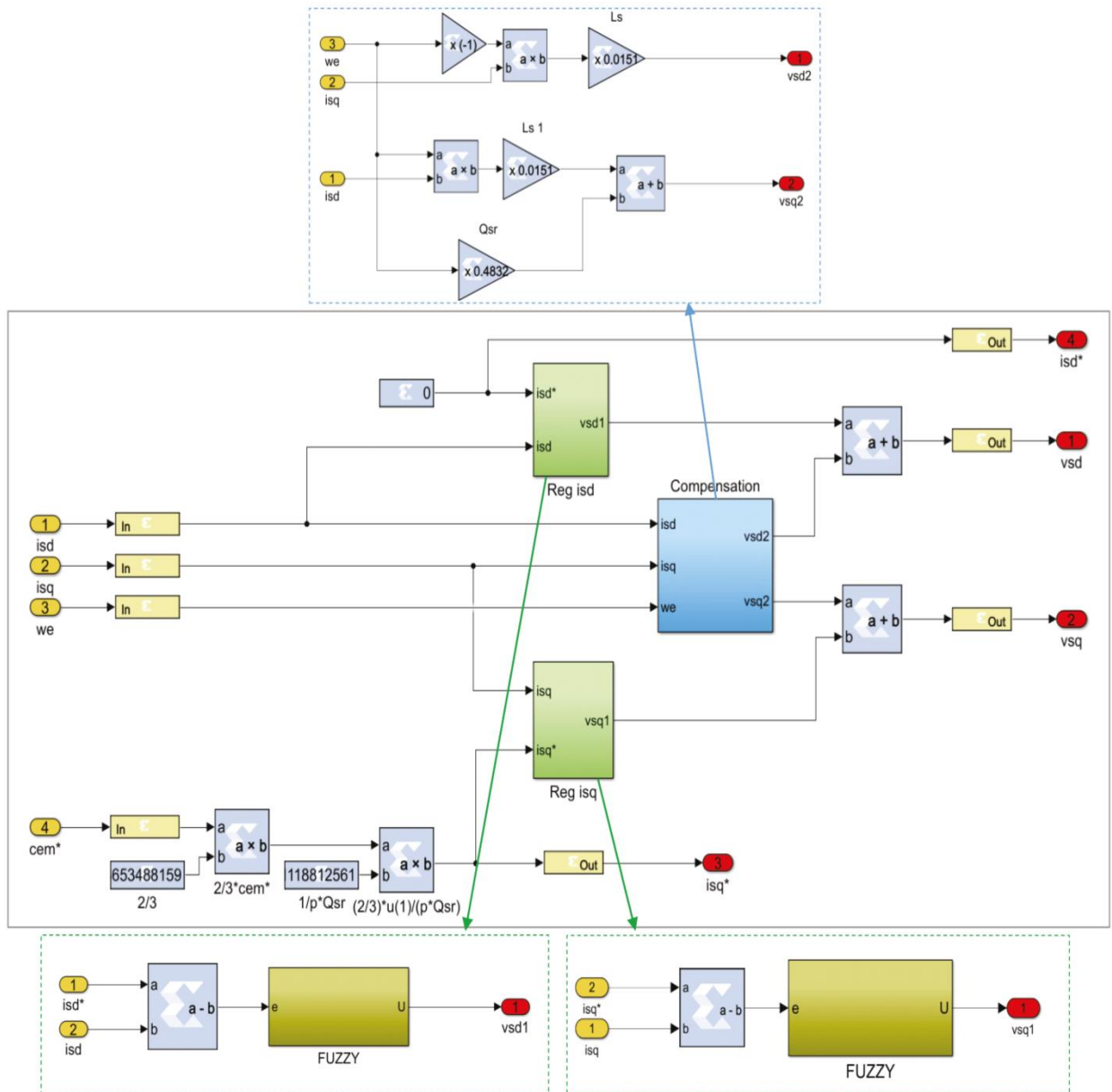


Рисунок 4.5 – Апаратне проектування VCS-FGS-PID-регуляторів для перетворювача на стороні PMSG

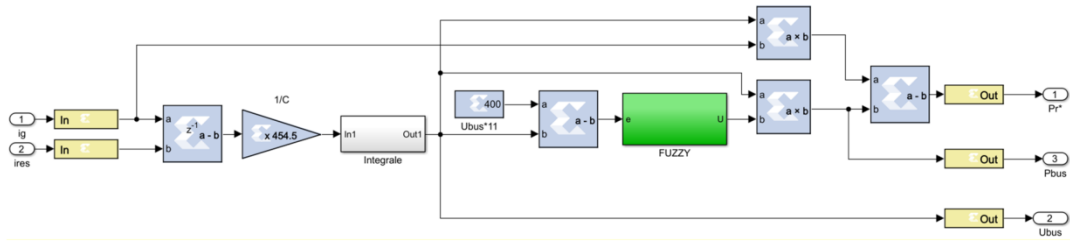


Рисунок 4.6 – Апаратна реалізація VCS-FGS-PID-регуляторів напруги шини постійного струму

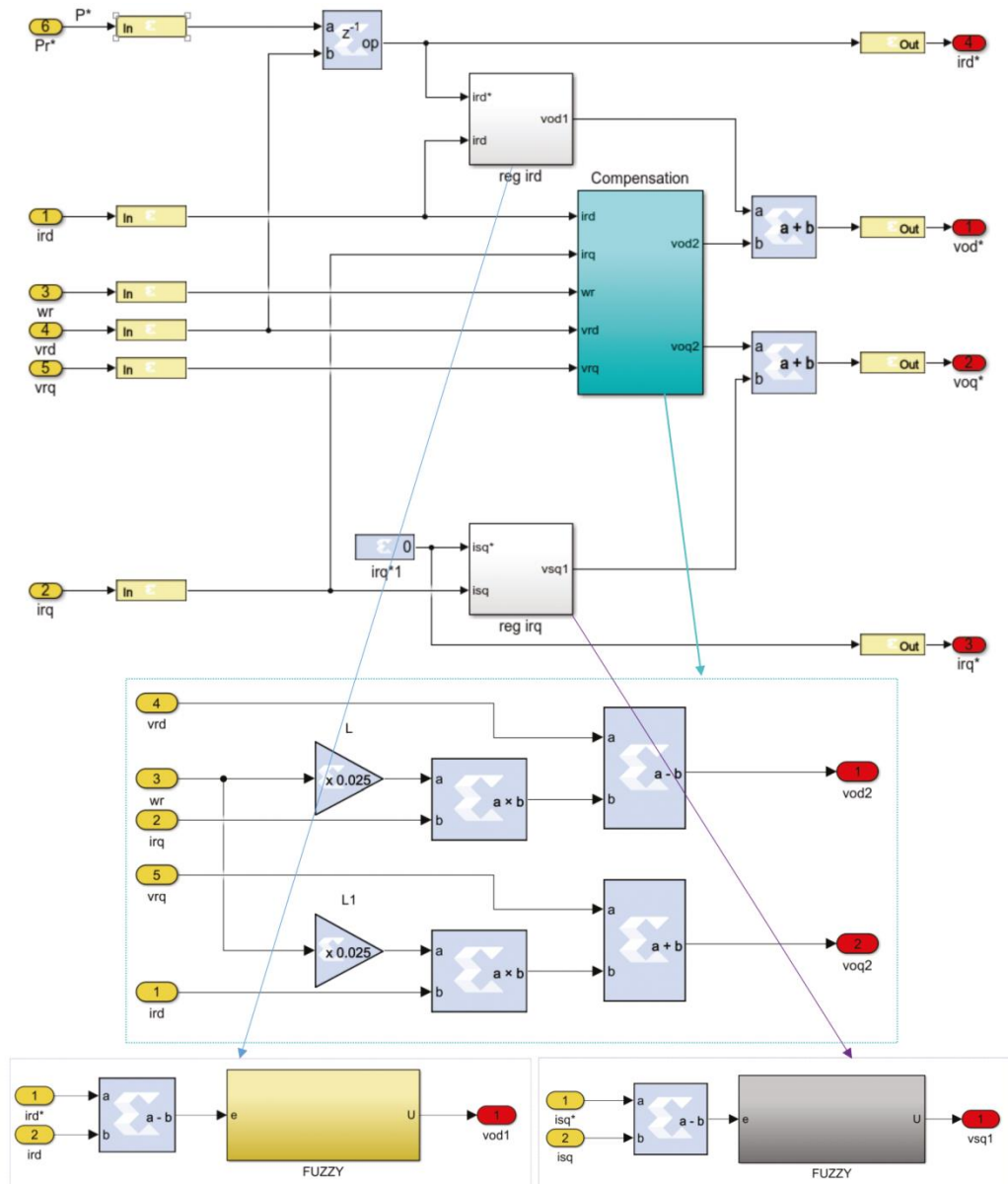


Рисунок 4.7 – Апаратна реалізація VCS-FGS-PID-регуляторів для мережевого перетворювача

4.1.3 Проектування функцій приналежності за допомогою XSG

У цьому розділі описано фазифікацію, механізм виведення та дефазифікацію як частину проектування за допомогою XSG для реалізації архітектури регулятора VCS-FGS-PID на FPGA. Інструменти XSG, що представляють собою загалом бібліотеку графічного інтерфейсу для Matlab/Simulink, яка може бути використана для проектування та моделювання динамічних процесів системи, дозволяють реалізувати цифрові алгоритми на платах FPGA з високим ступенем деталізації. На рисунку 4.8 показано апаратну схему FGS-PID -регуляторів, де на входи подається похибка та її похідна. Крім того, виходами є оптимальні значення K_p , K_i та K_d . Як зазначалося раніше, нечіткі множини представлені у трикутній та трапецієподібній формах. Заздалегідь визначені блоки, що маніпулюють нечіткою логікою, не включені до бібліотеки XSG. В результаті було математично розроблено та описано декілька секцій ПІД-регулятора VCS-FGS. Перший крок полягав у визначенні всіх функцій належності за допомогою систем рівнянь, які їм відповідають. У наступній частині, використовуючи XSG для кожного входу, представлено приклад побудови функцій належності.

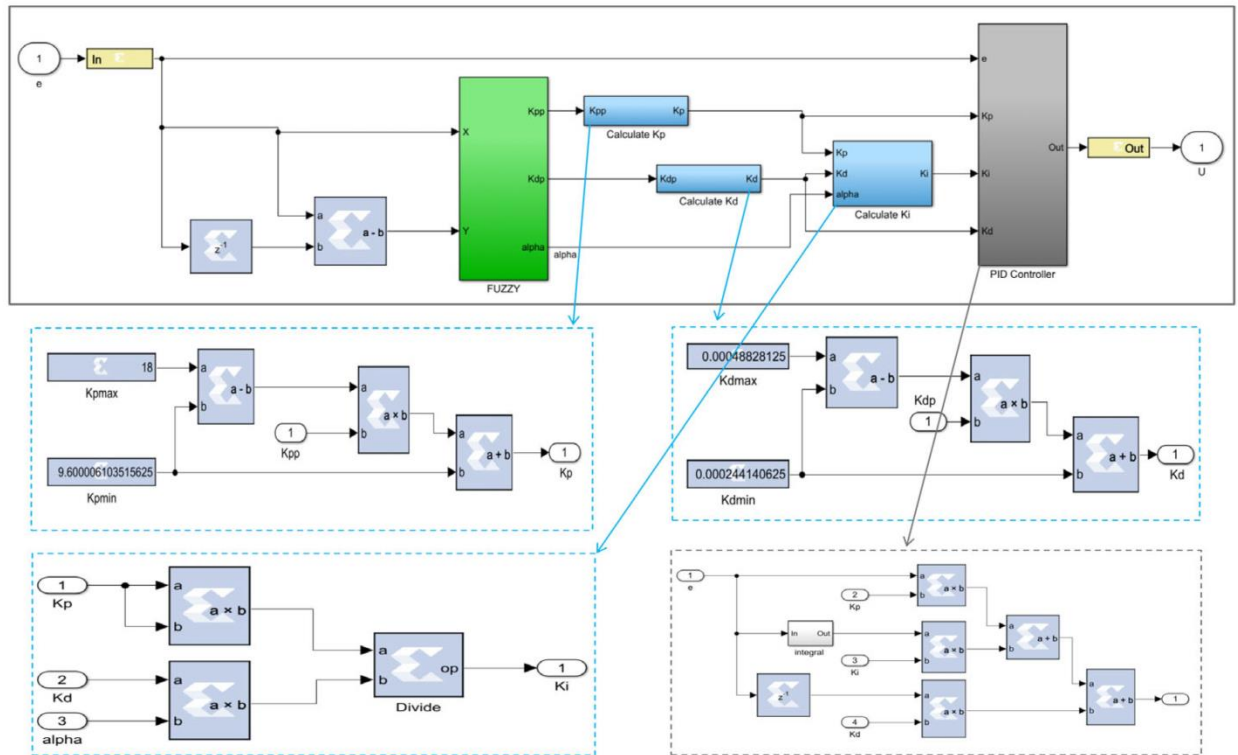


Рисунок 4.8 – Апаратна реалізація FGS-PID

Нечітка функція належності похибки. Відповідно, похибка задавалася сімома нечіткими множинами, які фактично представлені сімома математичними функціями, названими: PB, PM, PS, ZE, NS, NM та NB. Наприклад, функція належності NS задається рівнянням (4.2), і вона проілюстрована за допомогою XSG на рисунку 4.9.

$$\begin{cases} \text{if } e(t) > 0 \text{ or } e(t) > -x_{2_e} \text{ then } y(t) = 0 \\ \text{if } e(t) > -x_{1_e} \text{ then } y(t) = -3 \times e(t) \\ \text{else } y(t) = 3 \times e(t) + 2 \end{cases}, \quad (4.2)$$

Нечітка приналежність. Похідна функції помилки належності ZE задається формулою (4.3) і зображена за допомогою XSG на рисунку 4.10.

$$\begin{cases} \text{if } de(t) < -x_{1e} \text{ or } de(t) > x_{1e} \text{ then } y(t) = 0 \\ \text{if } de(t) < 0 \text{ then } y(t) = 3 \times de(t) + 1 \\ \text{else } y(t) = -3 \times de(t) + 1 \end{cases}, \quad (4.3)$$

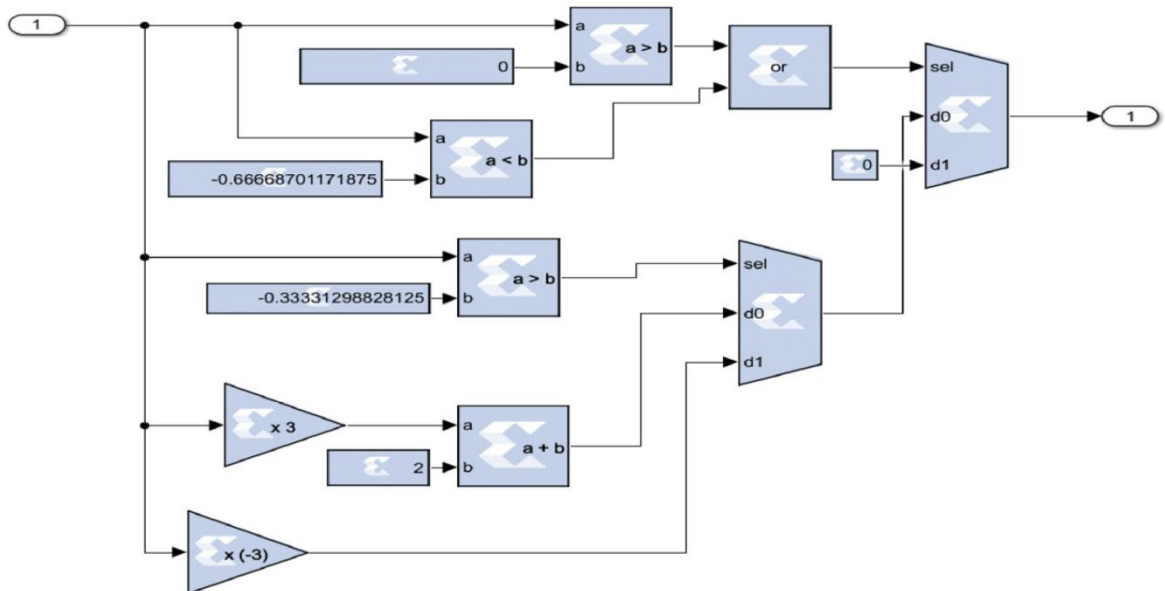


Рисунок 4.9 – Проектування функції належності NS з XSG

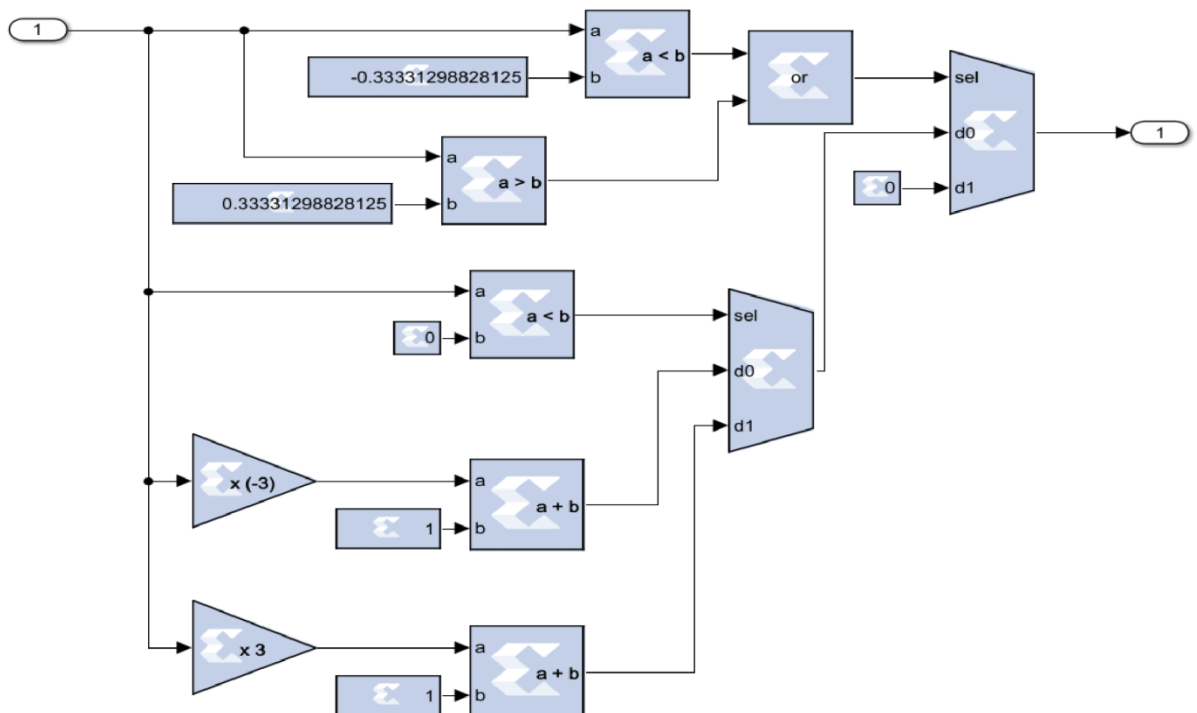


Рисунок 4.10 – Проектування функції належності ZE з XSG

4.2 Розробка правил

Сугено розробив такий нечіткий логічний контролер, який являє собою функцію MIN, що використовується для пошуку мінімального значення в нашій дослідницькій роботі між функціями приналежності двох вхідних даних, якими є похибка та її похідна. Цей контролер відображає оператор AND, який пов'язує між собою різні нечіткі функції. Приклад правила наведено на рисунку 4.11:

$$\left\{ \text{if } (e \text{ is } NS) \text{ and } (de \text{ is } PB) \text{ then } \begin{cases} K'_p & \text{is } S \\ K'_d & \text{is } B \\ \alpha & \text{is } 4 \end{cases} \right\}, \quad (4.4)$$

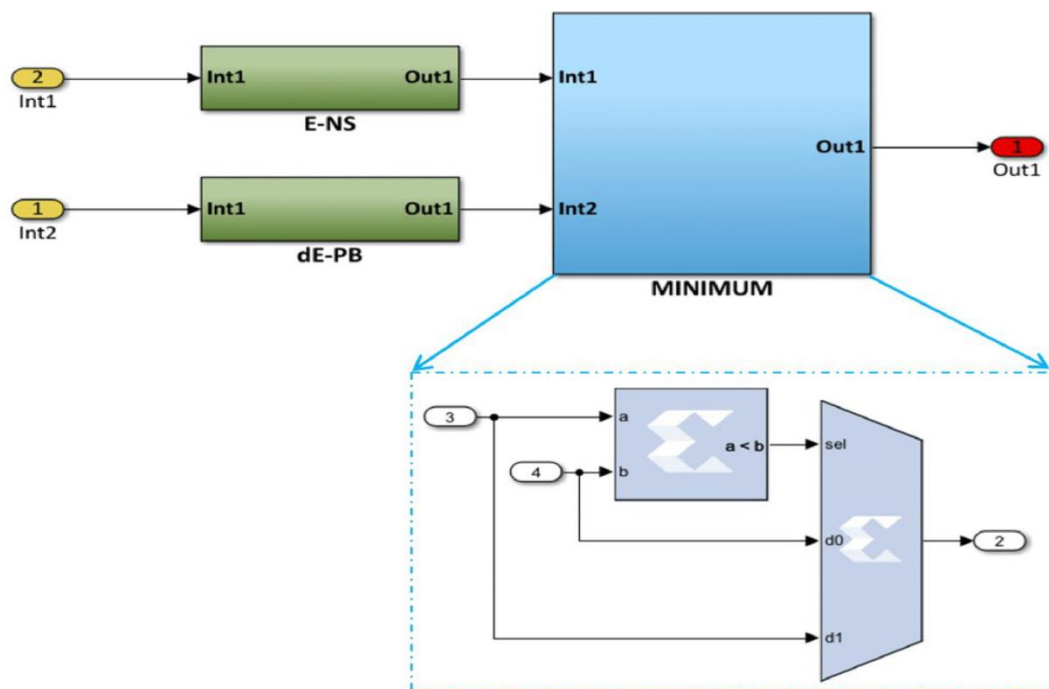


Рисунок 4.11 – Проектування

Оскільки функції належності є синглетонами, ми застосували метод зваженої висоти для дефазифікації, де варіація вихідної змінної задається наступним чином [60]:

$$y = \frac{\sum w_{ij} \times z_{ij}}{\sum w_{ij}}. \quad (4.5)$$

5 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ТЕСТУВАННЯ

5.1 Результати моделювання та впровадження

WECS та її алгоритми керування були розроблені та змодельовані за допомогою MATLAB/Simulink з використанням інструменту XSG. Параметри системи наведені в таблицях 5.1, 5.2 і 5.3, які використовуються для перевірки схем керування, запропонованих у цій роботі. Протягом 10 с моделювання до моделі вітрогенератора був застосований профіль вітру, показаний на рисунку 5.1.

Таблиця 5.1 – Параметри електромережі

Параметри	Значення
Опір фільтра з боку сітки R_r	0,2 Ом
Напруга мережі V_r	380 В
Індуктивність фільтра з боку сітки L_r	25 мГн
Ємність постійного струму C_{bus}	2200 мкФ
Опорна напруга U^* шини	400 В

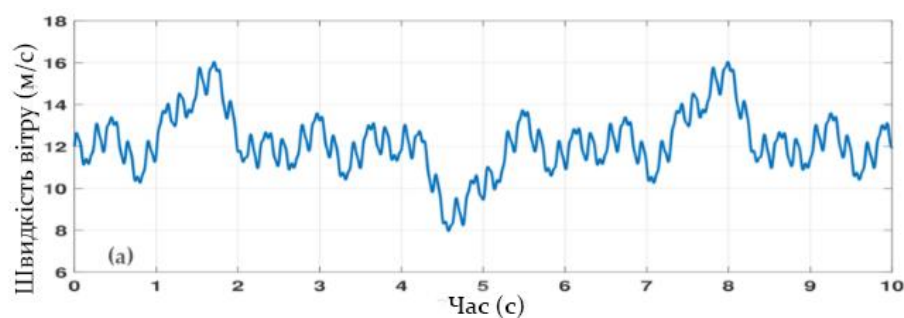


Рисунок 5.1 – Швидкість вітру

Таблиця 5.2 – Параметри PMSG

Параметри	Значення
Опір статора R_s	0,82 Ом
Індуктивність статора L_s	0,0151 мГн
Кількість пар полюсів p	2
Потік постійного магніту ϕ_m	0,4832 Вб

Таблиця 5.3 – Параметри вітротурбіни

Параметри	Значення
Кількість лопатей	3
Густина повітря ρ	1,22 кг/м ³
Номінальна потужність P_{eol}	3,5 кВт
Радіус леза R	2 м
Номінальна швидкість вітру V_{vn}	13 м/с

Вітрова турбіна була сконструйована таким чином, щоб обертатися з певною швидкістю і виробляти певну кількість енергії. Механізм керування, названий «кутом нахилу», використовувався для керування вихідною потужністю вітрової турбіни, яка збільшувалася, якщо швидкість вітру була високою. На рисунку 5.2 показано механічну швидкість PMSG, а на рисунку 5.3 – зміну кута нахилу. Нижче наведено підсумок роботи систем керування: кут орієнтації збільшувався, якщо швидкість вітру перевищувала номінальне значення. В результаті коефіцієнт потужності C_p падав, як показано на рисунку 5.4. Таким чином, генерована потужність була обмежена, як показано на рисунку 5.5.

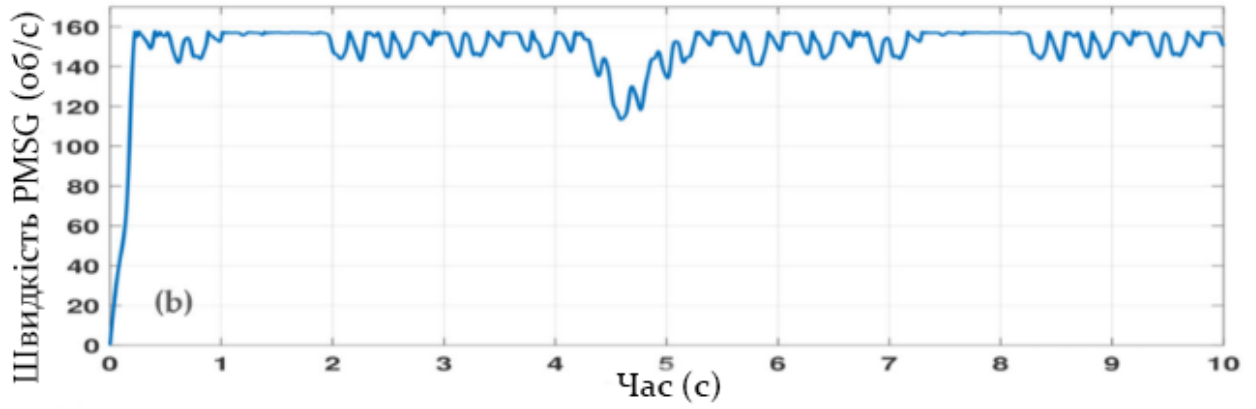


Рисунок 5.2 – Механічна швидкість

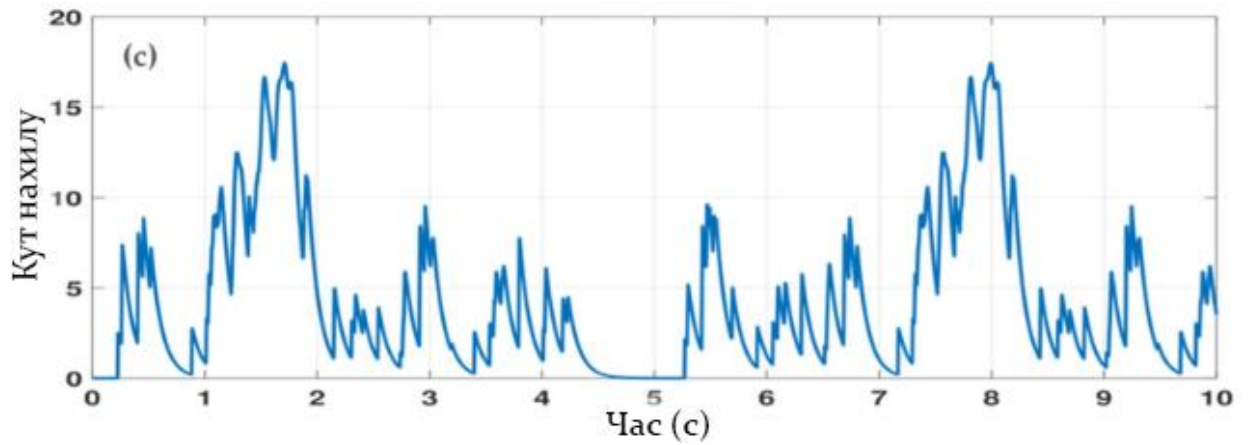


Рисунок 5.3 – Кут нахилу

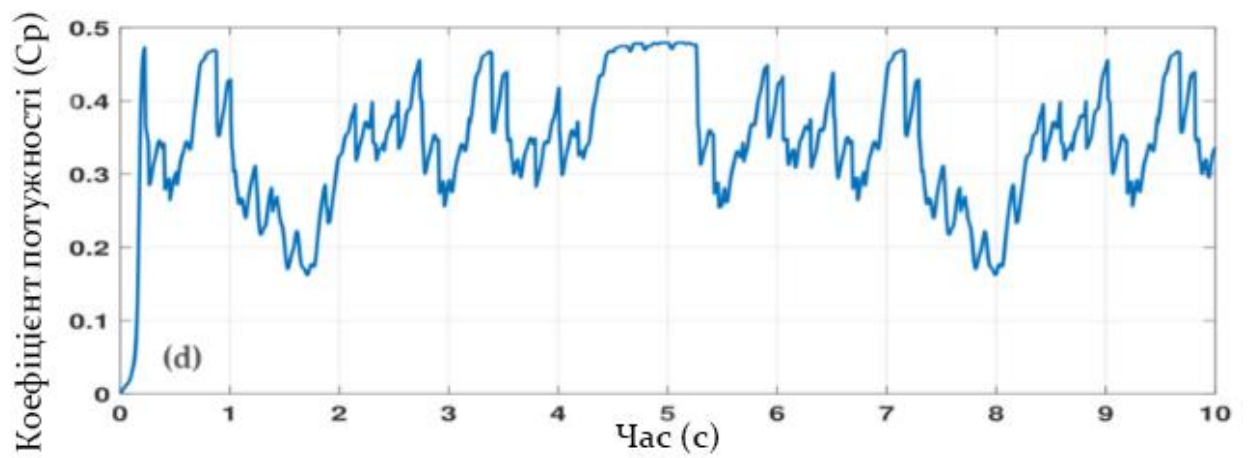


Рисунок 5.4 – Коефіцієнт потужності

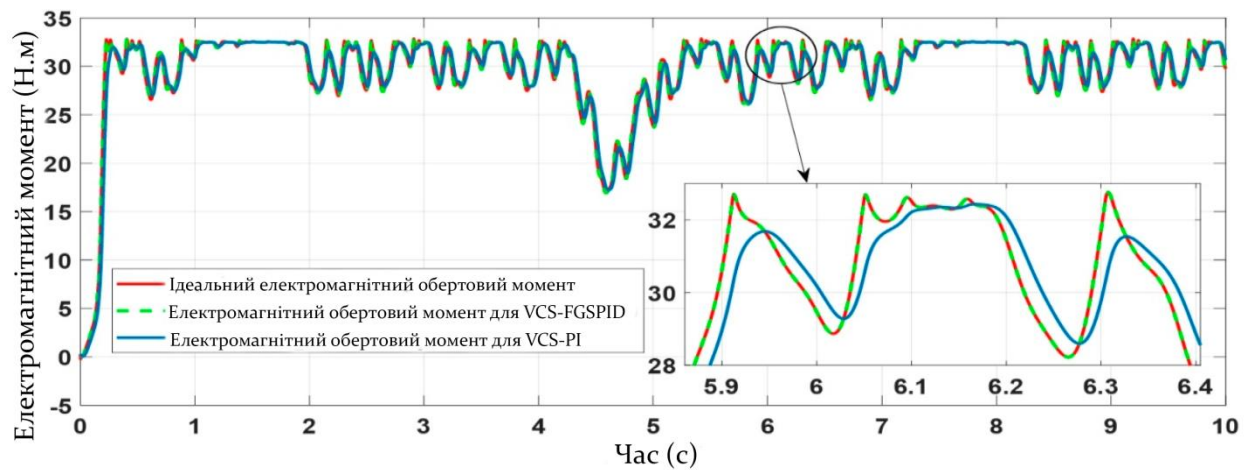


Рисунок 5.5 – Електромагнітний обертовий момент

Порівняння продуктивності ПІ-регуляторів VCS-PI та VCS-FGS-PID. Для підтвердження продуктивності нашого регулятора VCS-FGS-PID наведено два тести: без варіацій параметрів і з варіаціями параметрів. В останньому випадку, через нагрівання генератора, значення резистора R_s поступово збільшувалися через припущення про насичення, а також значення індуктивностей, характерних для PMSG.

Продуктивність системи без зміни параметрів. Цей тест було проведено для перевірки стійкості керування системою у відповідь на зміну швидкості вітру. Відповіді, отримані для обох типів керування, в основному показали, що система, керована регулятором VCS-FGS-PID, є більш стійкою, ніж класичний регулятор VCS-PI.

Похибки електромагнітного моменту, який зображено на рисунку 5.5, і квадратичної складової струму статора, яка показана на рисунку 5.6, і яка викликана зміною швидкості, були дуже високими для класичного регулятора VCS-PI, де не було миттєвої реакції від моменту і струму. Для вирішення цієї проблеми було запропоновано використовувати ПІД-регулятор VCS-FGS, який характеризується хорошими показниками з точки зору помилки відстеження та часу реакції.

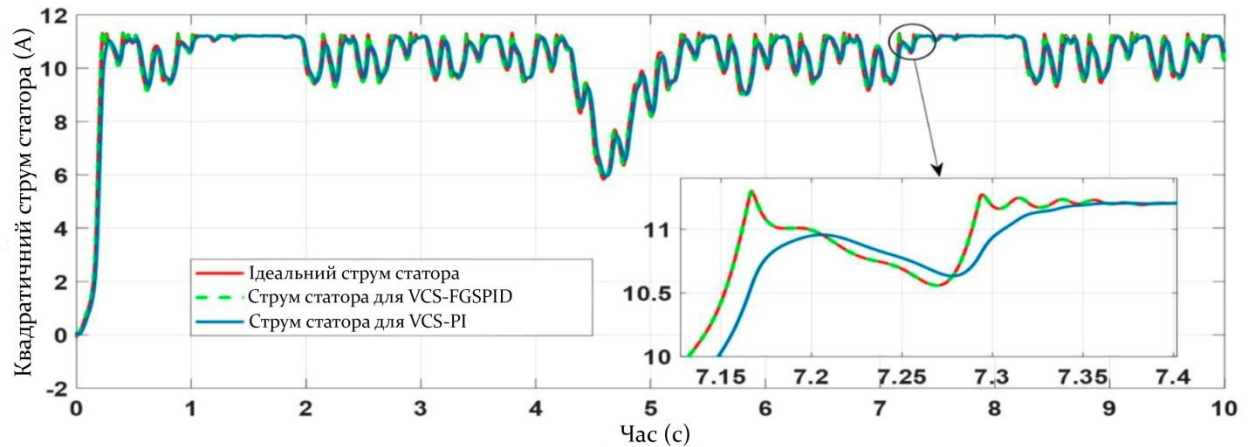


Рисунок 5.6 – Квадратична складова струму статора

Пряма складова струму, яка особливо сильно інжектується в мережу, та її еволюція проілюстровані на рисунку 5.7. Реакція цих кривих демонструє той факт, що регулятор VCS-FGS-PID є кращим, ніж VCS-PI, з точки зору часу реакції та відкидання збурень. Порівняно з запропонованим методом керування VCS-FGS-PID, висока зміна швидкості вітру вплинула на традиційне векторне керування. Профіль активної потужності, що вводиться в мережу, показано на рисунку 5.8.

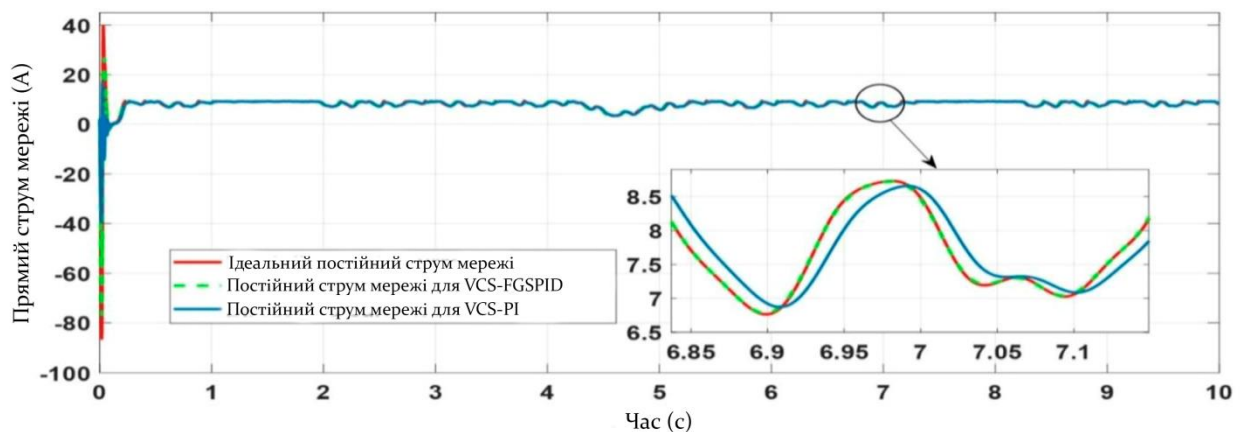


Рисунок 5.7 – Компонент постійного струму, що вводиться в мережу

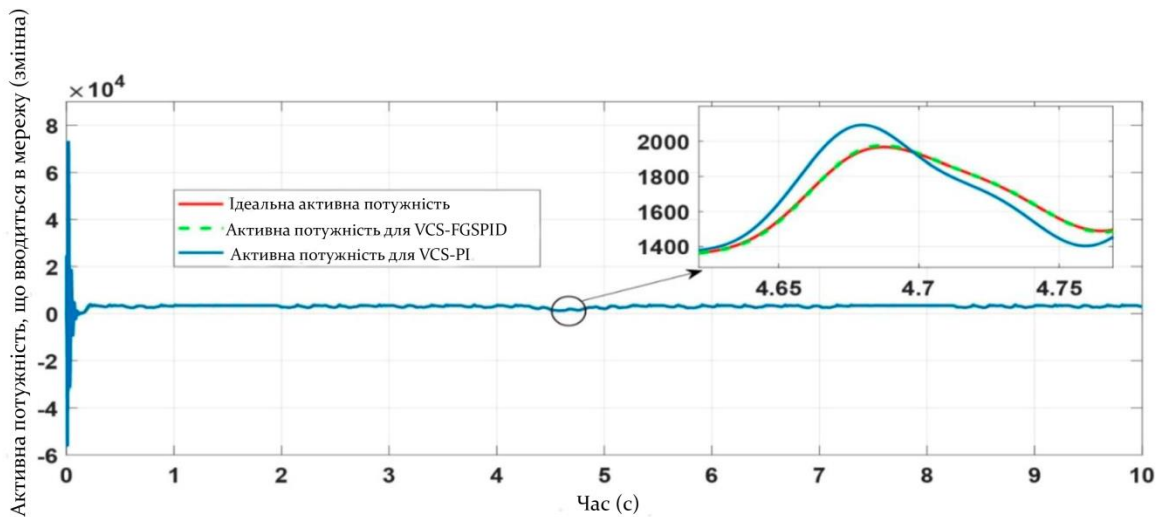


Рисунок 5.8 – Активна потужність, що відпускається в мережу

На рисунку 5.9 в загальному вигляді представлено результат моделювання реактивної потужності, яка також була закачана в мережу. Система працювала з одиничним коефіцієнтом потужності. Регулятори VCS-FGS-PID чітко ігнорували помилку, зберігаючи при цьому якості робастності та збіжності за кінцевий час. На рисунку 5.10 показано результати моделювання напруги на шині постійного струму. Прикметно, що регулятор VCS-FGS-PID мінімізував похибку порівняно з регулятором VCS-PI, зберігаючи при цьому робастність.

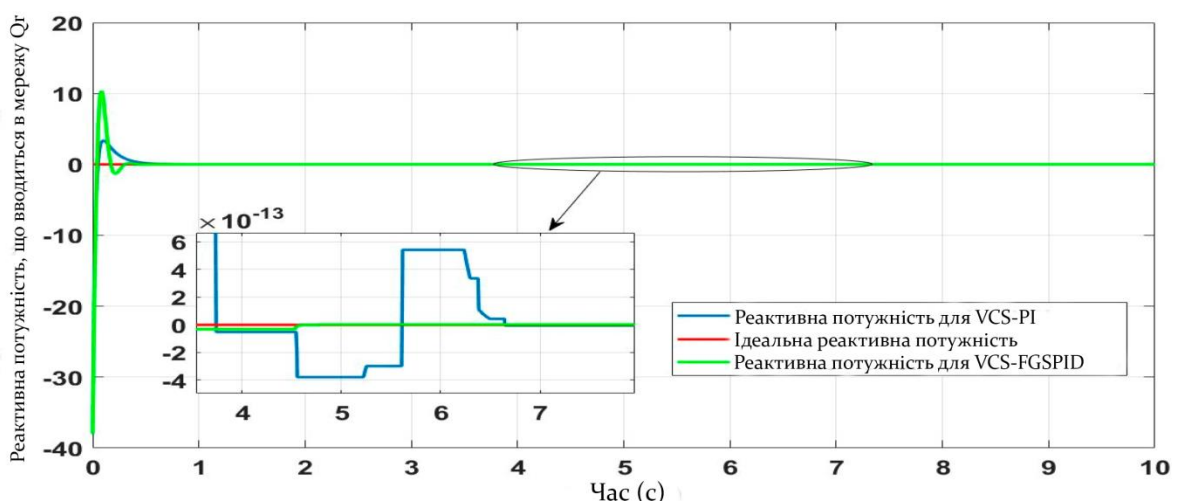


Рисунок 5.9 – Реактивна потужність, що відпускається в мережу

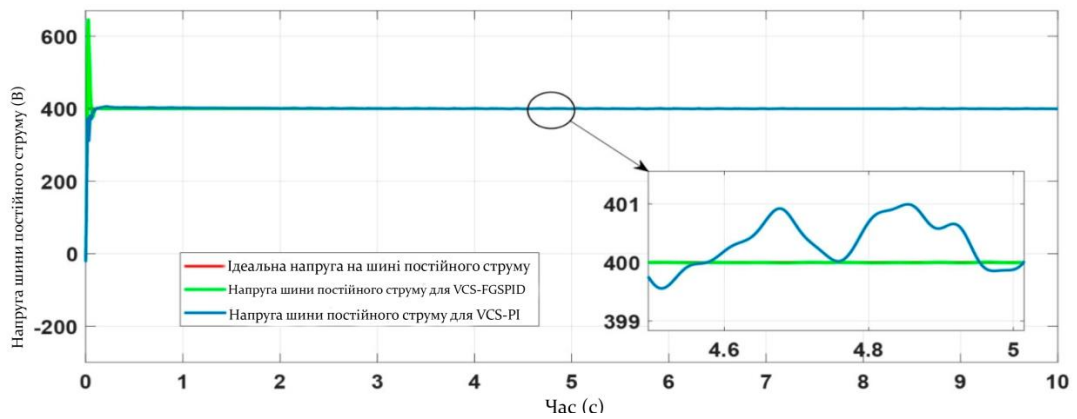


Рисунок 5.10 – Напруга шини постійного струму

Ефективність системи керування при зміні параметрів. Щоб перевірити ефективність запропонованої стратегії керування при зміні параметрів, PMSG починав роботу з номінального опору статора. Після цього він відображав варіації значень опору наступним чином:

- А $t = 2$ с, опір збільшується на 50%;
- А $t = 4$ с, опір збільшується на 100%;
- А $t = 8$ с, опір збільшується на 200%.

Зміна опору статора показана на рисунку 5.11.

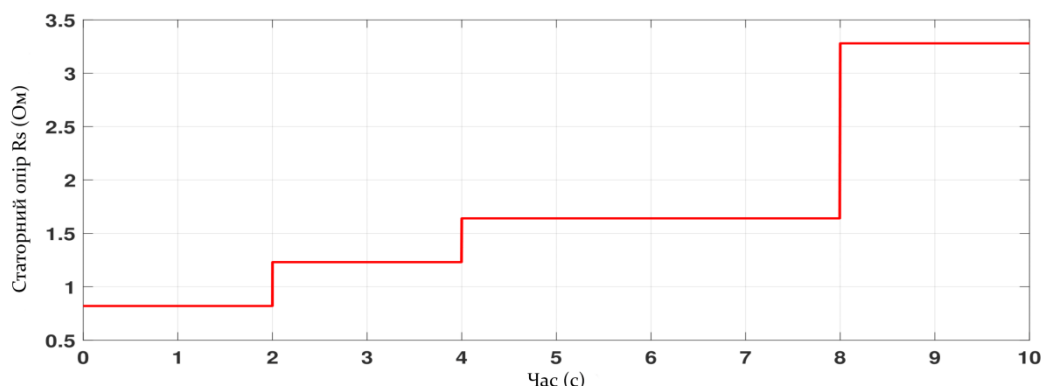


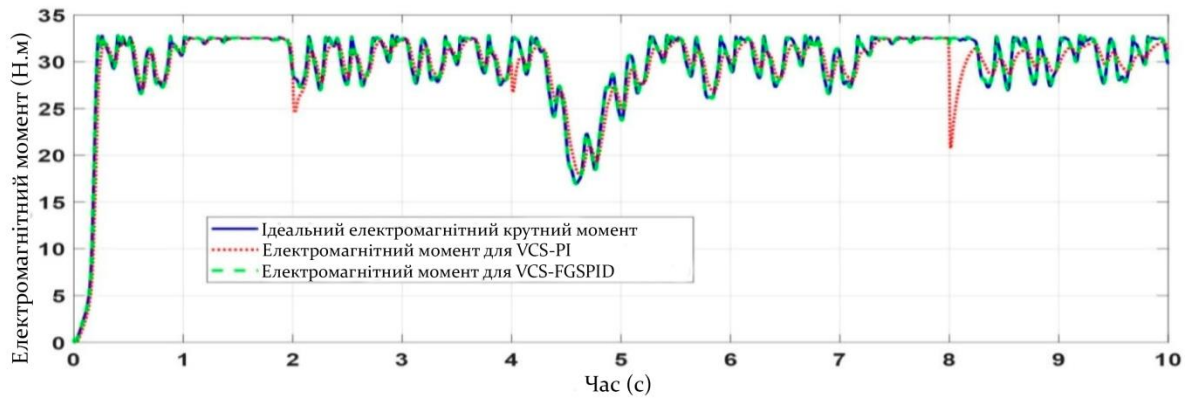
Рисунок 5.11 – Зміна опору як функція часу (с)

На рисунку 5.12 представлено результати моделювання електромагнітного моменту при зміні опору статора. Як показано на цьому

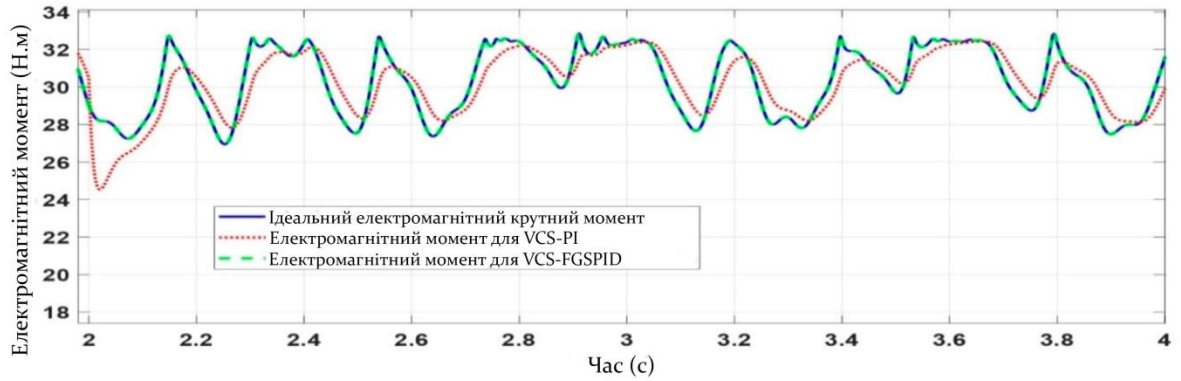
рисунку, зміна опору на 50%, 100% і 200% призвела до відхилення звичайного ПІ-регулятора VCS-PI, в той час як VCS-FGS-PID-регулятор зберігав стабільну поведінку. Як наслідок, тест на зміну опору статора доводить, що регулятор VCS-FGS-PID є більш надійним і більш ефективним порівняно з регулятором VCS-PI.

5.2 Порівняльне дослідження між запропонованим FGS-PID та нелінійним регулятором

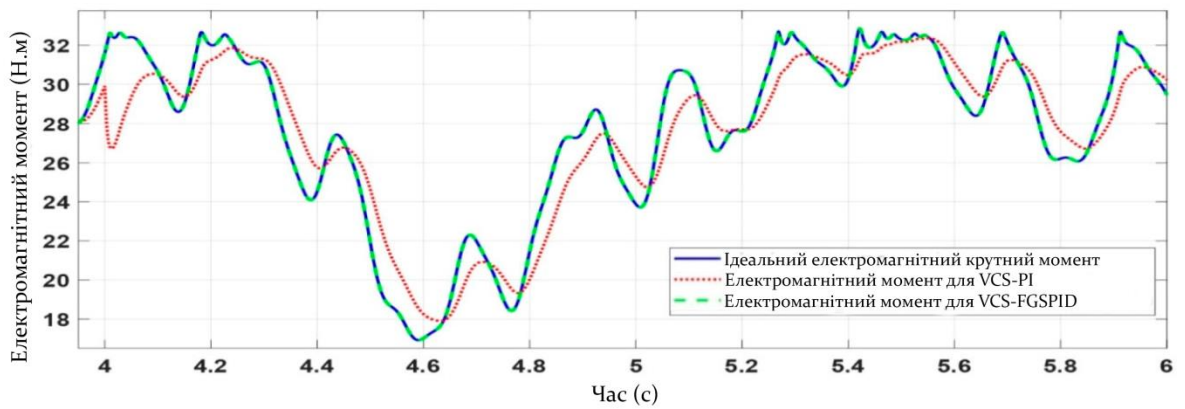
Для того, щоб підкреслити ефективність запропонованого FGS-PID, було проведено порівняльне дослідження з контролером SMC. Як показано на рисунку 5.12, відгук електромагнітного моменту, коли WECS керується за допомогою підходів VCS-FGS-PID, пропонує кращі показники з точки зору точності відстеження та коливань навколо опорного значення. Однак, електромагнітний крутний момент демонстрував явище бовтанки, яке супроводжувалося високими коливаннями, що може призвести до кількох небажаних наслідків для якості виробленої електроенергії та системи в цілому. Крім того, на рисунках 5.13 і 5.14 показано еволюцію квадратичної складової струму статора і постійної складової струму, що інjektується в мережу, відповідно. З цих рисунків видно, що перевагою VCS-FGS-PID є те, що вона дозволяє виключити будь-яке явище бовтанки, яке може бути викликане SMC, зберігаючи при цьому властивості робастності. Це свідчить про те, що алгоритми VCS-FGS-PID можуть бути більш придатними методами керування для промислових енергетичних систем завдяки їх здатності забезпечувати відмінну точність і надійність без проблем з блуканням, які можуть бути присутніми в техніці керування SMC. На рисунку 5.15 показано результат моделювання активної потужності, що вводиться в мережу. Видно, що підходи VCS-FGS-PID дозволили зменшити або навіть усунути явище блукання, зберігаючи при цьому властивості робастності та збіжності за скінченний час.



At = 2 s



At = 4 s



At = 8 s

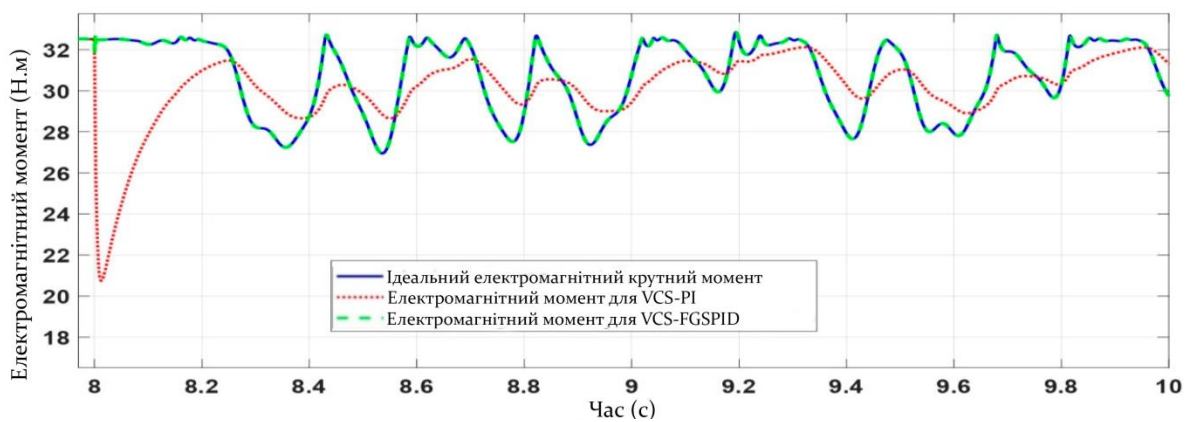


Рисунок 5.12 – Електромагнітна характеристика крутного моменту при зміні параметрів

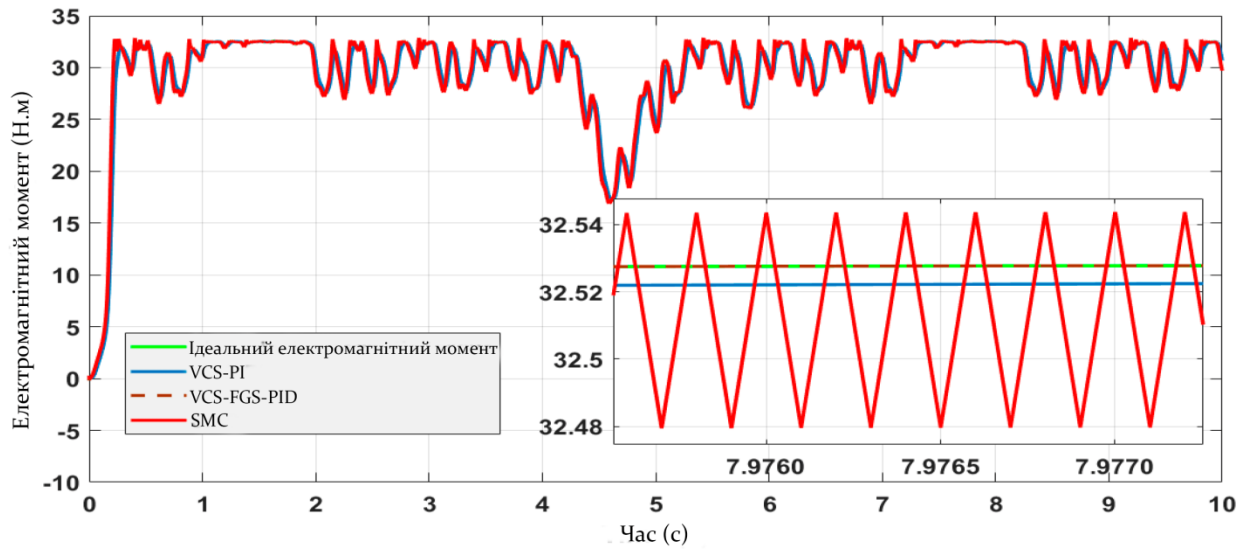


Рисунок 5.13 – Електромагнітний обертовий момент

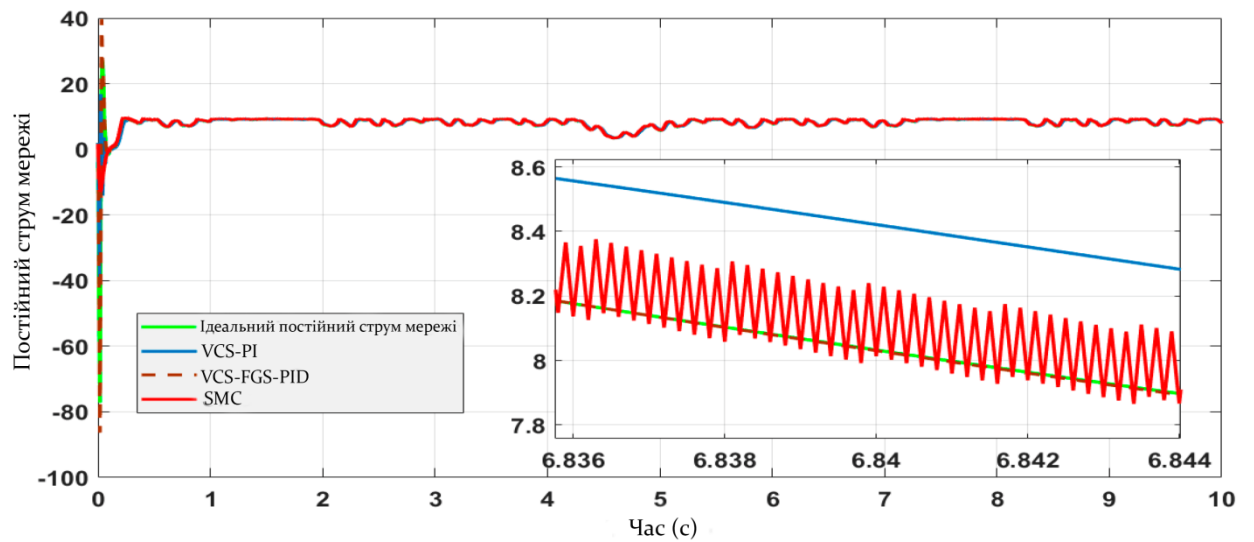


Рисунок 5.14 – Постійний струм мережі

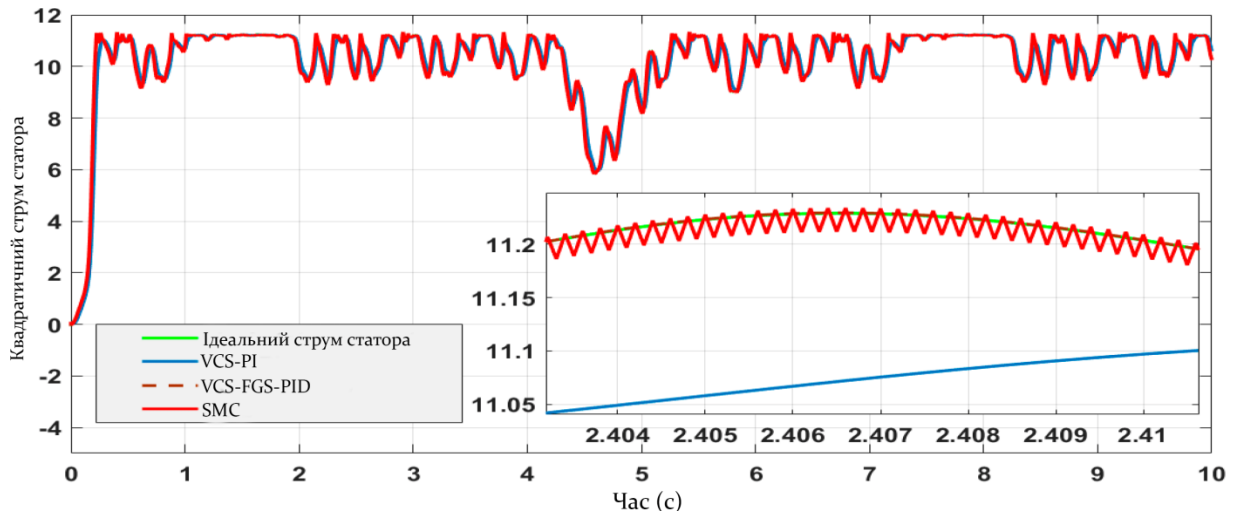


Рисунок 5.15 – Квадратичний струм статора

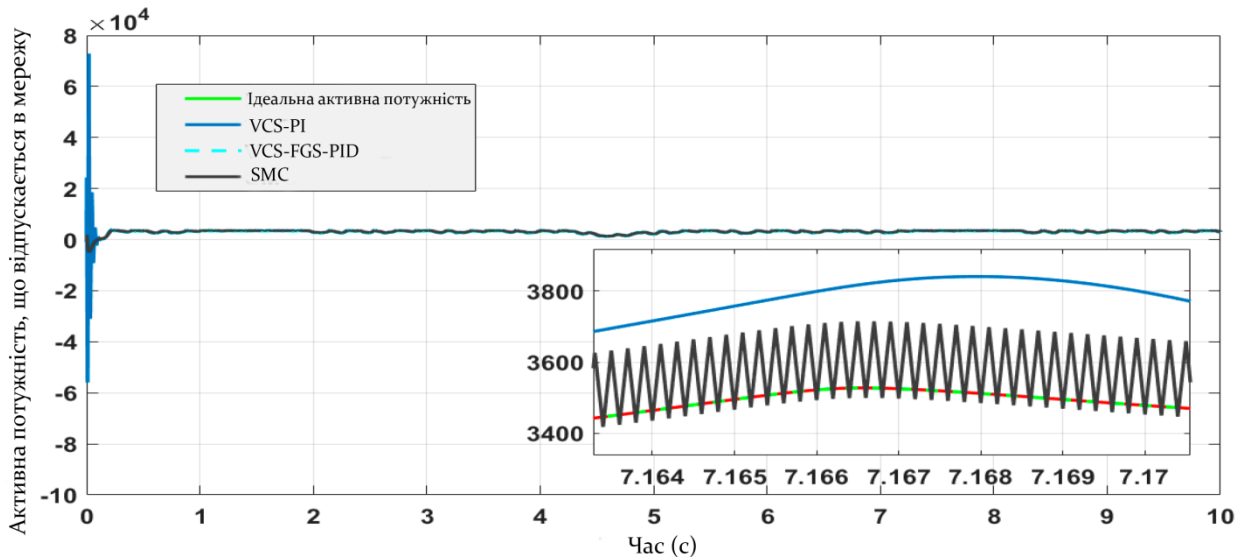


Рисунок 5.16 – Активна потужність, що відпускається в мережу

Ефективність запропонованого регулятора також оцінювалася за допомогою різних індексів ефективності з використанням середньої абсолютної похибки (MAE – mean absolute error), середньої квадратичної похибки (MSE – mean square error) та середньоквадратичної похибки (RMSE – root mean square error). Похибки електромагнітного моменту, квадратного струму статора, постійного струму мережі та активної потужності, що вводиться в мережу, визначаються як:

$$\begin{cases} e_{T_{em}} = T_{em_{ref}} - T_{em_{actual}} \\ e_{i_{sq}} = i_{sq_{ref}} - i_{sq_{actual}} \\ e_{i_{rd}} = i_{rd_{ref}} - i_{rd_{actual}} \\ e_{P_r} = P_{r_{ref}} - P_{r_{actual}} \end{cases}, \quad (5.1)$$

де $T_{em_{ref}}$ еталонний електромагнітний момент, $T_{em_{actual}}$ дійсний електромагнітний момент, $i_{sq_{ref}}$ опорний струм статора, $i_{sq_{actual}}$ фактичний струм статора, $i_{rd_{ref}}$ опорний прямий струм мережі, $i_{rd_{actual}}$ фактичний прямий струм мережі, $P_{r_{ref}}$ еталонна активна потужність, що вводиться в мережу, а $P_{r_{actual}}$ фактична активна потужність, що вводиться в мережу.

MAE, MSE та RMSE визначаються наступним чином [65]:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad (5.2)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (5.3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (5.4)$$

де n – кількість точок даних.

Підсумовуючи, посилаючись на таблицю в додатку Б, можна побачити, що запропонований регулятор VCS-FGS-PID пропонує кращі показники при використанні MAE, MSE та RMSE, що демонструє, що останній регулятор може розглядатися як внесок у керування промисловою мережею WECS, підключеною до мережі.

Таблиця 5.3 – Порівняння між досліджуваними контролерами

Контрольована змінна	Критерії	VCS-PI	SMC	VCS-FGS-PID
Електромагнітний крутний момент	MAE	0,6007	0,0320	$4,5179 \times 10^{-4}$
	MSE	0,8641	0,0013	$5,7214 \times 10^{-6}$
	RMSE	0,9296	0,0364	0,0024
Квадратичний струм статора	MAE	0,2072	0,0110	$1,5583 \times 10^{-4}$
	MSE	0,1028	$1,5725 \times 10^{-4}$	$6,8069 \times 10^{-7}$
	RMSE	0,3206	0,0125	$8,2504 \times 10^{-4}$
Постійний струм мережі	MAE	0,7756	0,1476	0,0574
	MSE	40,1864	0,0417	0,5022
	RMSE	6,3393	0,2043	0,7086
Активна потужність, що вводиться в мережу в мережу	MAE	294,7217	56,0731	21,8005
	MSE	$5,8029 \times 10^6$	$6,0249 \times 10^3$	$2,7075 \times 10^3$
	RMSE	$2,4089 \times 10^3$	77,6199	52,0336

5.3 Порівняння запропонованого підходу з іншими існуючими схемами

Для того, щоб підкреслити ефективність запропонованого методу контролю, важливо порівняти його з іншими методами, представленими в літературі. Однак слід зазначити, що порівняння обмежене тим, що рідко можна знайти подібні роботи, виконані в однакових умовах. Таблиця 5.4 чітко показує, що запропонований метод контролю дає значно меншу похибку стану порівняно з іншими методами. Крім того, запропонований метод демонструє кращі показники точності, робастності, динаміки тощо порівняно з іншими методами. Підсумовуючи, отримані результати підкреслюють перевагу запропонованого методу керування у зменшенні гармонічних спотворень та досягненні точного і швидкого керування.

5.4 Реалізація стратегії векторного контролю на ПЛІС

Апаратне моделювання. Мова опису архітектури XSG надає важливі функції, які дозволяють спілкуватися з Simulink. В результаті можна створити віртуальний сценарій роботи для апроксимації та швидкої перевірки методу апаратної реалізації, який відомий як тест ко-симуляції, і який відіграє важливу роль у перевірці синтезованої стратегії керування. Крім того, це зменшує загальний час, необхідний для проведення експериментальних тестів, а також підвищує ефективність реалізації. Як наслідок, на цьому може базуватися апаратне співімітаційне моделювання запропонованого VCS-FGS-PID-регулятора:

- крок моделювання: Чисельне моделювання, виконане в середовищі Matlab/Simulink, використовується для валідації, а також для підтвердження реалізації алгоритму управління VCS-FGS-PID;

- етап XSG моделювання: На цьому етапі перевіряється, що результати, отримані за допомогою XSG-симуляції, подібні до результатів, отриманих за допомогою Matlab/Simulink;

- етап апаратної ко-симуляції: Ми реалізуємо модель XSG на платі FPGA. Насправді, симуляція також називається апаратною симуляцією в циклі. Тому спроектована архітектура XSG має бути сумісною з характеристиками плати FPGA, яка буде реалізована.

Слід зазначити, що під час апаратного моделювання між входом і виходом блоків XSG автоматично генерується модуль спільного моделювання Joint Test Action Group (JTAG), відомий як "JTAG co-sim", який автоматично генерується між входом і виходом блоків XSG. На рисунку 5.16 показано загальну блок-схему архітектури реалізації запропонованої процедури ко-симуляції.

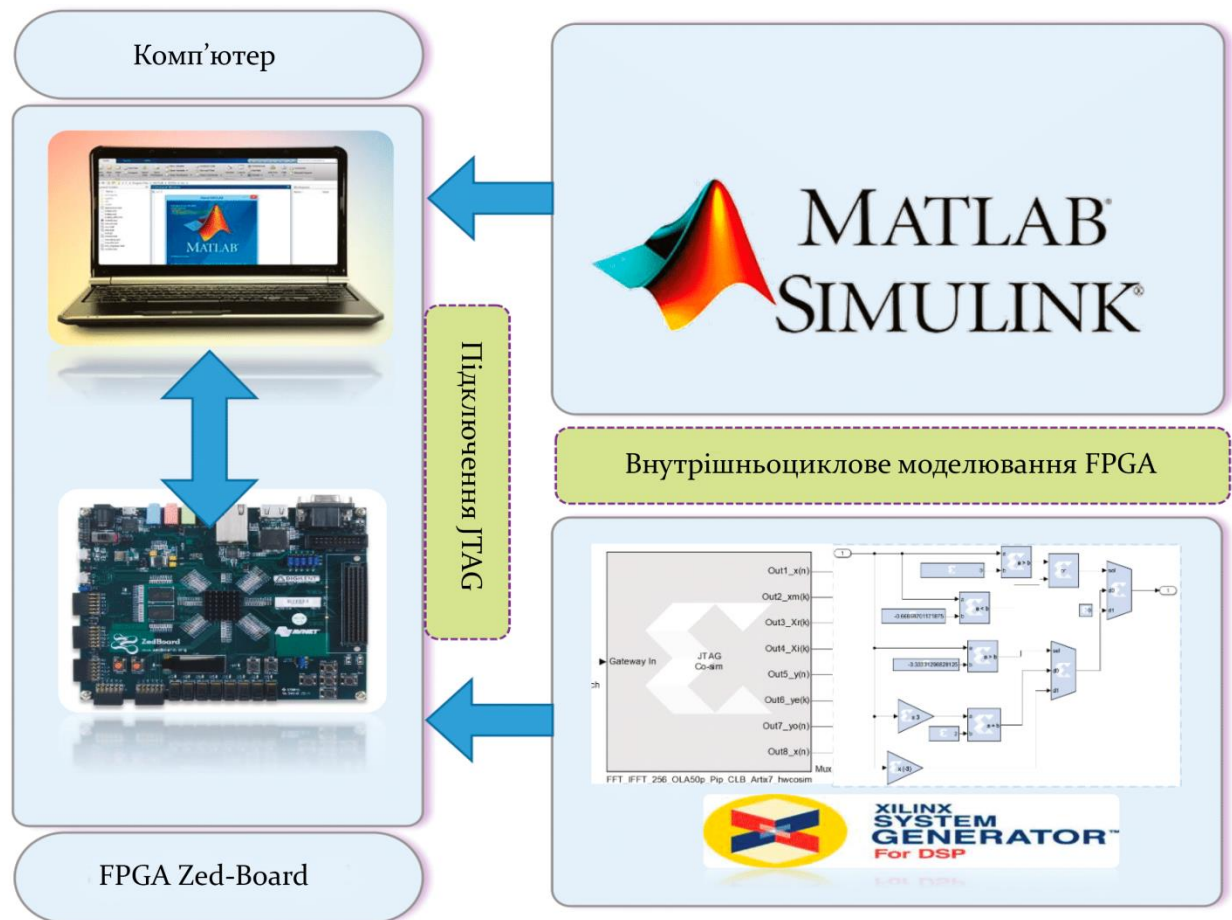


Рисунок 5.17 – Апаратна косимуляція

Можна отримати бібліотеку логічних ядер, розроблену спеціально для реалізації на FPGA, яка готова до конфігурації та використання відповідно до специфікацій проектувальника. Після цього інтегроване програмне середовище Xilinx (VIVADO) використовується для генерації файлів «netlist» для реалізації системних генераторних блоків. Ці файли відповідають за перетворення логічної схеми у фізичний файл. Вони також генерують бітовий потік для передачі на цільовий інструмент за допомогою типового JTAG-з'єднання. Моделювання в MATLAB XSG дозволяє тестувати FPGA - додаток в тих же умовах, що і фізичні пристрої, з аналогічною шириною даних змінних і операторів.

Після моделювання та часового аналізу запропонованої архітектури алгоритму управління, етап апаратної ко-симуляції використовується для

того, щоб підтвердити продуктивність проекту на FPGA ZedBoard. Як показано на рисунку 5.16, файл бітового потоку генерується та синтезується за допомогою апаратного моделювання, який використовується для програмування FPGA та генерації нового JTAG-блоку. Останній замінить XSG-дизайн регулятора VCS-FGS-PID. Через JTAG-кабель плата FPGA може зчитувати струм статора, електромагнітний момент, механічну швидкість, струм мережі та напругу мережі. Нарешті, згенерований JTAG-блок буде з'єднаний з трифазним випрямлячем, напругою шини та інвертором. Крім того, фаза апаратного моделювання починається, коли плата FPGA підключається до ПК за допомогою кабелю для програмування JTAG (кабель USB-II). Як показано на рисунку 5.17, кабель JTAG буде використано для виконання фази завантаження бітового потоку. Після цього всі інструменти Matlab використовуються для моделювання та візуалізації результатів. Як показано на рисунках 5.18, 5.19, 5.20, 5.21, 5.22 та 5.23, результати апаратного моделювання мають таку ж точність, як і результати, отримані за допомогою Simulink Matlab, що доводить ефективність запропонованого підходу. Дійсно, на рисунку 5.18 представлено еволюцію електромагнітного моменту, коли WECS керується обома методами керування, а саме VCS-FGS-PID та VCS-PI. Видно, що запропонована VCS-FGS-PID забезпечує кращі показники з точки зору точності відстеження. Рисунок 5.19 демонструє, що ідеальний квадратичний струм статора наближається до свого еталонного значення з відмінним відстеженням і точністю у випадку запропонованого CAP-FGS-PID. Однак, коли WECS керується за допомогою VCS-PI, ідеальний квадратичний струм статора слідує за своїм еталонним значенням з помітною похибкою. На рисунках 5.20 та 5.21 показано зміни постійного струму мережі та напруги на шинах постійного струму. Видно, що запропонований регулятор забезпечує кращі характеристики з точки зору точності порівняно з VCS-PI. Активна та реактивна потужність, що подається в мережу, показана на рисунках 5.22 та 5.23, які демонструють, що фактична потужність наближається до заданої з високою точністю.

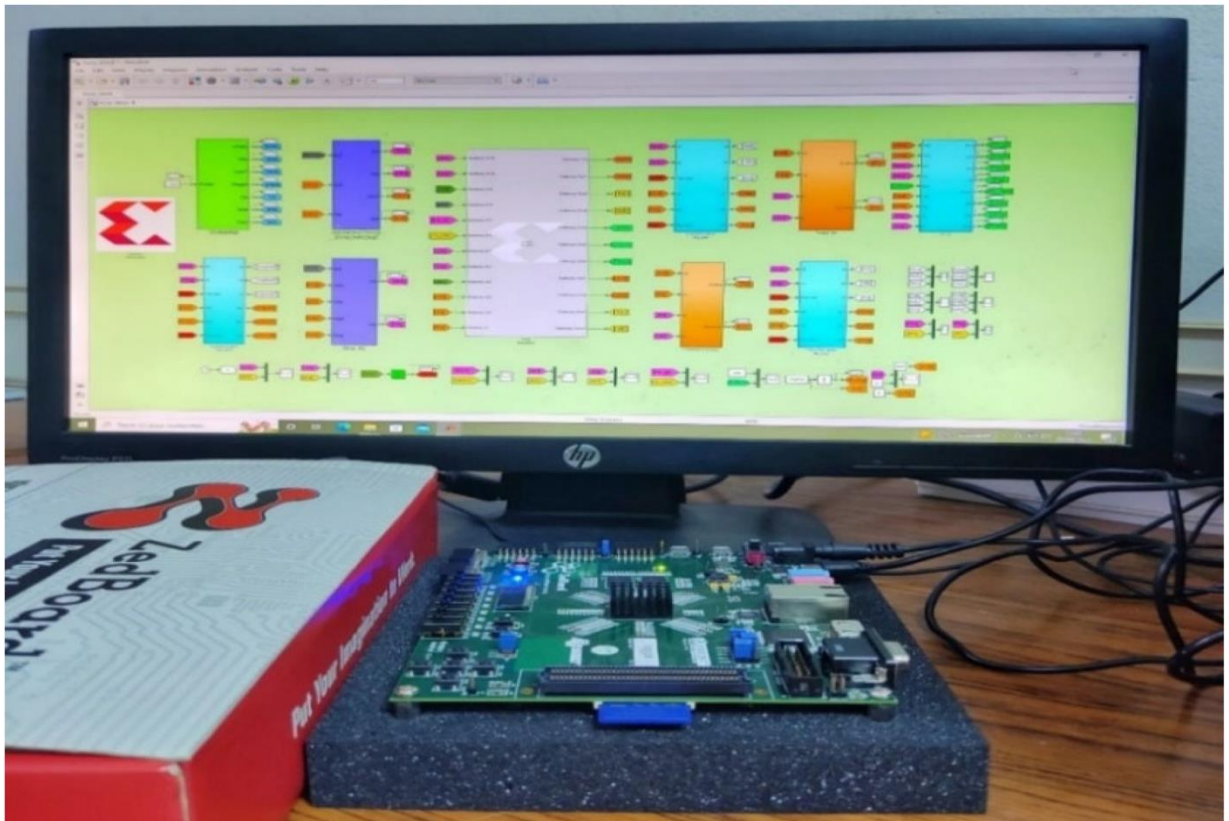


Рисунок 5.18 – Апаратна косимуляція для VCS-FGS-PID-регуляторів

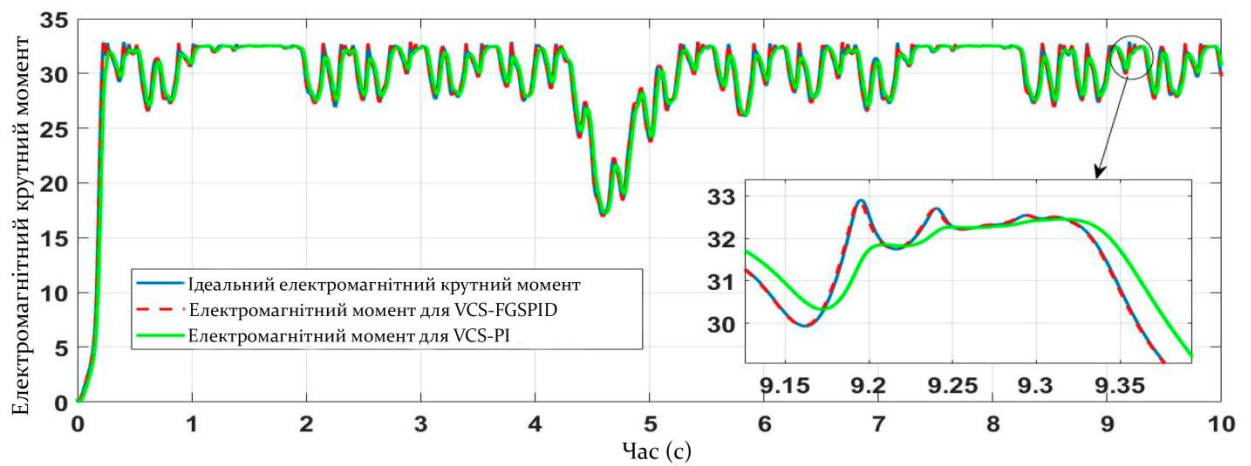


Рисунок 5.19 – Апаратне моделювання електромагнітного моменту

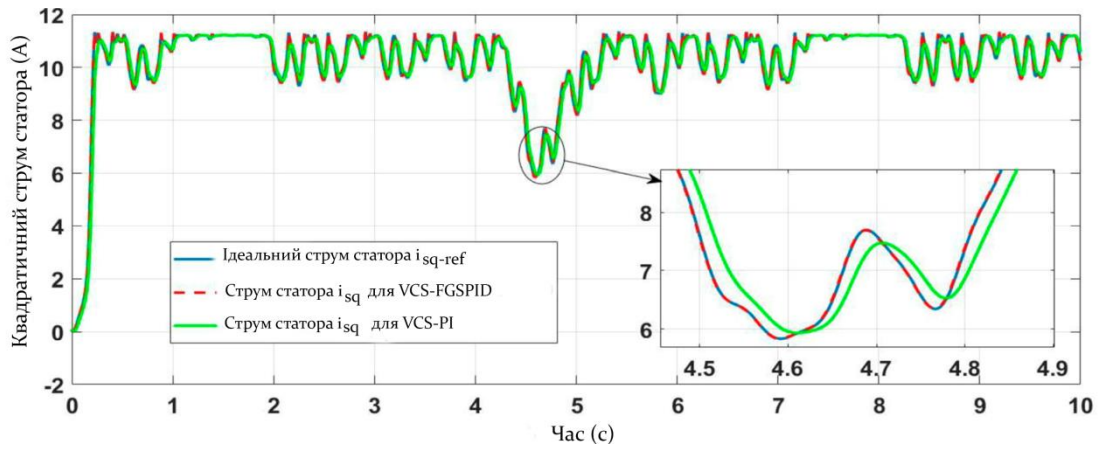


Рисунок 5.20 – Апаратна ко симуляція для квадратичного струму статора

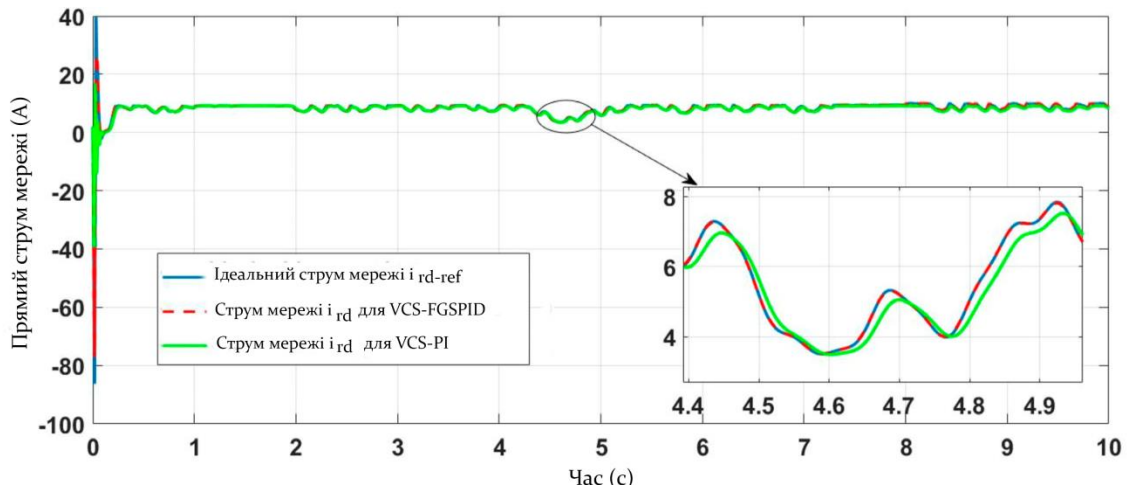


Рисунок 5.21 – Апаратна ко симуляція для постійного струму мережі

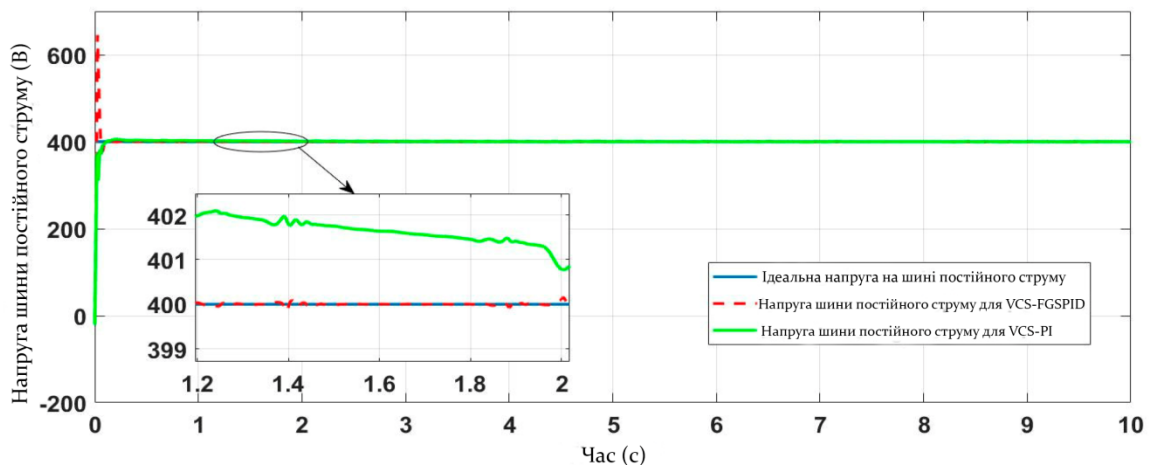


Рисунок 5.22 – Апаратна ко симуляція напруги на шині постійного струму

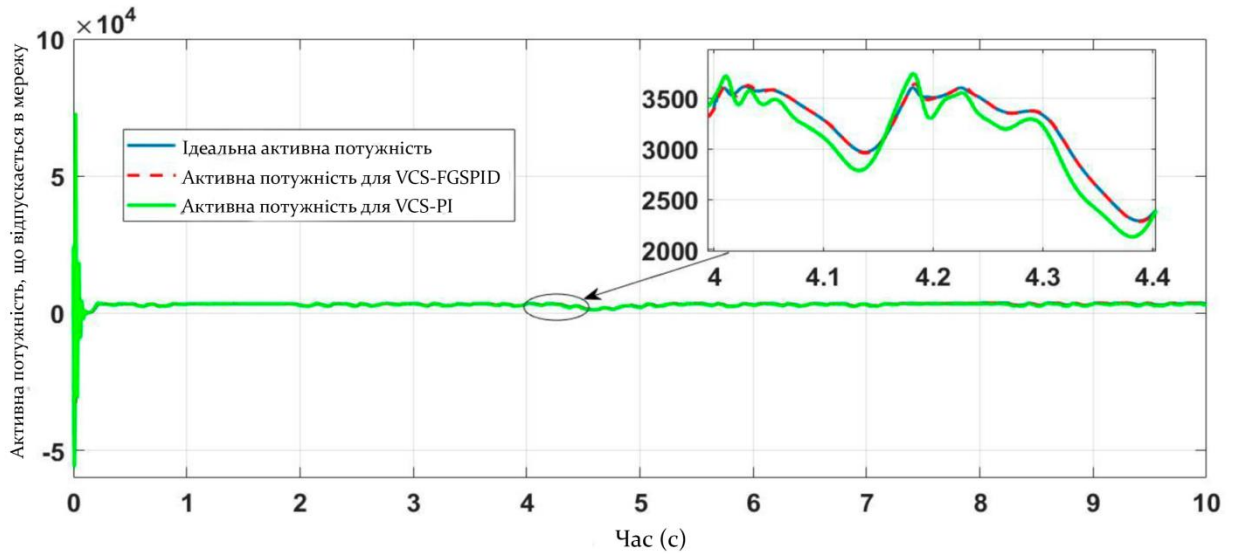


Рисунок 5.23 – Апаратне моделювання активної потужності, що вводиться в мережу

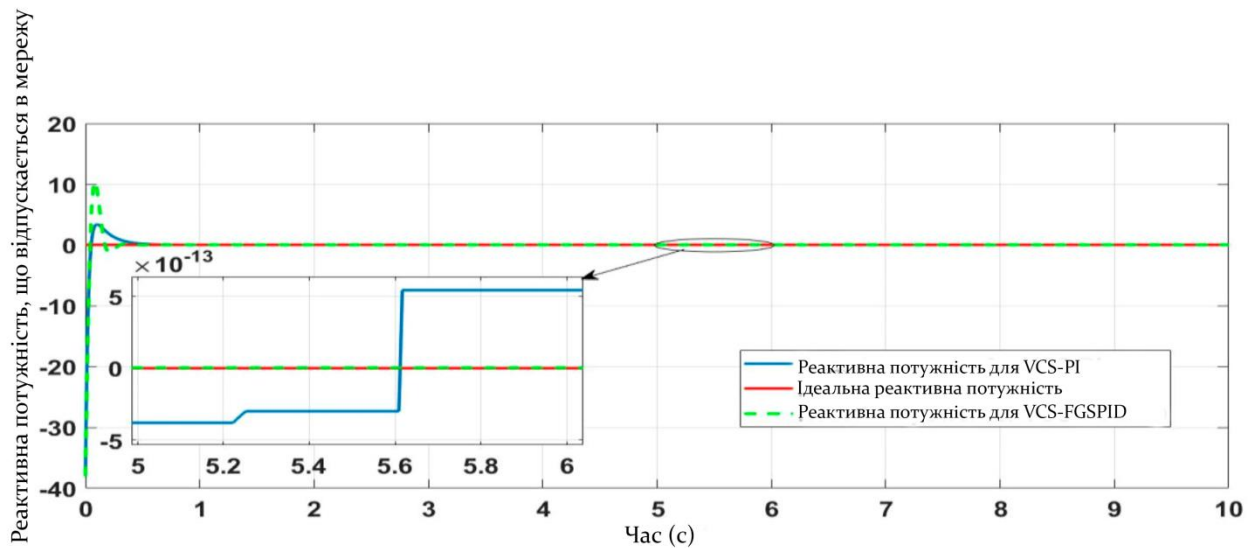


Рисунок 5.24 – Апаратне моделювання реактивної потужності, що вводиться в мережу

У таблиці 5.4 показано використання ресурсів FPGA у запропонованому дизайні. Запропонована реалізація використовує від 0,2% до 59% ресурсів. Крім того, результати показують низьку вартість реалізації

на ПЛІС. Дійсно, архітектура запропонованої конструкції займає меншу площу, забезпечуючи при цьому сприятливу продуктивність. Фактично, реалізація реального часу на FPGA може бути використана в різних промислових процесах для WECS.

Таблиця 5.4 – Синтез споживання апаратних ресурсів

Ресурси	Використання	Доступно	% використання
LUT	31774	53200	59,725563
LUTRAM	48	17400	0,27586207
FF	22139	106400	20,807331

ВИСНОВКИ

У цій роботі розглянуто розробку та апаратну реалізацію двох схем керування (VCS-FGS-PID та VCS-PI), застосованих до підключеної до мережі регульованої WECS зі змінною швидкістю. Існує дві основні цілі керування WECS. Перша – це керування перетворювачем на стороні PMSG, що дозволяє вітровій турбіні видобувати максимальну потужність. Друге – це керування з боку мережі, яке має на меті підтримувати роботу з одиничним коефіцієнтом потужності, контролюючи реактивну та активну потужність, що передається в електромережу. Цей контролер також регулює напругу на шинах постійного струму. Перша схема керування на основі FGS-PID-регулятора була порівняна з другою схемою на основі звичайного ПІ-регулятора. Для кращої оцінки продуктивності різних методів керування, порівняльне дослідження було розширено при зміні опору статора. Розроблено регулятор VCS-FGS-PID для вирішення будь-яких обмежень традиційного регулятора VCS-PI щодо продуктивності та стійкості при нелінійній поведінці WECS.

Для апаратної реалізації використано XSG, що дозволяє реалізувати запропоновану методику керування на FPGA. Апаратна реалізація запропонованого підходу є простою та швидкою завдяки новому методу, заснованому на XSG. Різноманітні результати моделювання показують вищу продуктивність регулятора VCS-FGS-PID у порівнянні з традиційним регулятором VCS-PI з точки зору часу відгуку, властивостей стабільності, динаміки, відстеження та точності при високих коливаннях швидкості вітру та змінному опорі статора. Результат реалізації показує ефективність FPGA з точки зору часу виконання. Дійсно, він був досить коротким у порівнянні з часом виконання dSPACE завдяки паралельній обробці. Короткий час виконання збільшує продуктивність машини і зменшує крутний момент, а також збурення струму статора, що дозволяє реалізовувати більш складні

алгоритми. Нарешті, підхід реалізації XSG можна розглядати як важливий інструмент для реалізації апаратних FPGA реального часу, а також складних і бажаних алгоритмів управління WECS.

Тим не менш, у нашій подальшій роботі залишаються інші проблеми, які необхідно вирішити, такі як перевірка працездатності запропонованого методу VCS-FGS-PID відповідно до реальних експериментальних результатів. Крім того, автори зосередяться на інтеграції акумуляторної системи зберігання енергії для WECS. Це може включати розробку нових стратегій керування та систем управління потужністю для оптимізації вихідної потужності, а згодом отримання досконалої вітроенергетичної системи, здатної забезпечити безперервне живлення навантаження без коливань.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Orusa, T.; Orusa, R.; Viani, A.; Carella, E.; Borgogno Mondino, E. Geomatics and EO Data to Support Wildlife Diseases Assessment at Landscape Level: A Pilot Experience to Map Infectious Keratoconjunctivitis in Chamois and Phenological Trends in Aosta Valley (NW Italy). *Remote Sens.* 2020, 12, 3542.
2. Orusa, T.; Viani, A.; Cammareri, D.; Borgogno Mondino, E. A Google Earth Engine Algorithm to Map Phenological Metrics in Mountain Areas Worldwide with Landsat Collection and Sentinel-2. *Geomatics* 2023, 3, 221–238.
3. Orusa, T.; Cammareri, D.; Borgogno Mondino, E. A Possible Land Cover EAGLE Approach to Overcome Remote Sensing Limitations in the Alps Based on Sentinel-1 and Sentinel-2: The Case of Aosta Valley (NW Italy). *Remote Sens.* 2023, 15, 178.
4. Orusa, T.; Borgogno Mondino, E. Exploring Short-Term Climate Change Effects on Rangelands and Broad-Leaved Forests by Free Satellite Data in Aosta Valley (Northwest Italy). *Climate* 2021, 9, 47.
5. Orusa, T.; Cammareri, D.; Borgogno Mondino, E. A Scalable Earth Observation Service to Map Land Cover in Geomorphological Complex Areas beyond the Dynamic World: An Application in Aosta Valley (NW Italy). *Appl. Sci.* 2023, 13, 390.
6. Carella, E.; Orusa, T.; Viani, A.; Meloni, D.; Borgogno-Mondino, E.; Orusa, R. An Integrated, Tentative Remote-Sensing Approach Based on NDVI Entropy to Model Canine Distemper Virus in Wildlife and to Prompt Science-Based Management Policies. *Animals* 2022, 12, 1049.
7. Orusa, T.; Borgogno Mondino, E. Landsat 8 thermal data to support urban management and planning in the climate change era: A case study in Torino area, NW Italy. *Remote Sens. Technol. Appl. Urban Environ.* 2019, 111570, 133–149.
8. Vigneys, T.; Kumarappan, N. Autonomous operation and control of

photovoltaic/solid oxide fuel cell/battery energy storage based microgrid using fuzzy logic controller. *Int. J. Hydrog. Energy* 2016, 41, 1877–1891.

9. Barkovska, O., Filippenko, I., Semenenko, I., Korniienko, V., & Sedlaček, P. (2023). Адаптація FPGA архітектури для прискорення алгоритмів обробки зображень. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, 0(2), 94-106. doi:<https://doi.org/10.32620/reks.2023.2.08>.

10. Jacobson, M.Z.; Delucchi, M.A. Providing all global energy with wind, water, and solar power, part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. *Energy Policy* 2011, 39, 1154–1169.

11. Meghni, B.; Dib, D.; Azar, A.T. A second-order sliding mode and fuzzy logic control to optimal energy management in wind turbine with battery storage. *Neural. Comput. Appl.* 2017, 28, 1417–1434.

12. Корнієнко, Є., Ляшенко, О. і Торба, А. (2023) «Метод керування системою генерації електроенергії з використанням бездротових технологій», *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*, (2(24)), с. 80–89. doi: 10.30837/ITSSI.2023.24.080.

13. Yan, S.; Gu, Z.; Park, J.H.; Xie, X. Adaptive memory-event-triggered static output control of T–S fuzzy wind turbine systems. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 2021, 30, 3894–3904.

14. Yan, S.; Gu, Z.; Park, J.H.; Xie, X.; Dou, C. Probability-density-dependent load frequency control of power systems with random delays and cyber-attacks via circuital implementation. *IEEE Trans. Smart Grid* 2022, 13, 4837–4847.

15. Chavero-Navarrete, E.; Trejo-Perea, M.; Jáuregui-Correa, J.C.; Carrillo-Serrano, R.V.; Ríos-Moreno, J.G. Expert control systems for maximum power point tracking in a wind turbine with PMSG: State of the art. *Appl. Sci.* 2019, 9, 2469.

16. Kristiansson, B.; Lennartson, B. Robust and optimal tuning of PI and PID controllers. *IEE Proc.-Control. Theory Appl.* 2002, 149, 17–25.

17. Prasad, L.B.; Tyagi, B.; Gupta, H.O. Optimal control of nonlinear

inverted pendulum dynamical system with disturbance input using PID controller & LQR. In Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, Penang, Malaysia, 25–27 November 2011; IEEE: New York, NY, USA; pp. 540–545.

18. Пляшов, О., Pokora, K., Diachenko, V. і Kovalenko, A. 2023. Класифікація даних апаратними прискорювачами FPGA у центрах обробки даних та хмарах. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. 2, 72 (Чер 2023), 106-112. DOI:<https://doi.org/https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.2.106>.

19. Su, Y.X.; Sun, D.; Duan, B.Y. Design of an enhanced nonlinear PID controller. *Mechatronics* 2005, 15, 1005–1024.

20. Qais, M.H.; Hasanien, H.M.; Alghuwainem, S. Optimal Transient Search Algorithm-Based PI Controllers for Enhancing Low Voltage Ride-Through Ability of Grid-Linked PMSG-Based Wind Turbine. *Electronics* 2020, 9, 1807.

21. Hoai, H.-K.; Chen, S.-C.; Than, H. Realization of the Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Control System with an Intelligent Controller. *Electronics* 2020, 9, 365.

22. Etxeberria, A.; Vechiu, I.; Camblong, H.; Vinassa, J.M. Comparison of sliding mode and PI control of a hybrid energy storage system in a microgrid application. *Energy Proced.* 2011, 12, 966–974.

23. Errami, Y.; Ouassaid, M.; Maaroufi, M. A performance comparison of a nonlinear and a linear control for grid connected PMSG wind energy conversion system. *Int. J. Electr. Power* 2015, 68, 180–194.

24. Song, Y.; Wu, S.; Yan, Y.Y. Control strategies for indoor environment quality and energy efficiency—A review. *Int. J. Low Carbon Technol.* 2013, 10, 305–312.

25. Krim, Y.; Abbes, D.; Krim, S.; Mimouni, M.F. Classical vector, first-order sliding-mode and high-order sliding-mode control for a grid connected variable-speed wind energy conversion system: A comparative study. *Wind. Eng.* 2018, 42, 16–37.

26. Liu, X.; Yu, H.; Yu, J.; Zhao, L. Combined speed and current terminal sliding mode control with nonlinear disturbance observer for PMSM drive. *IEEE Access* 2018, 6, 29594–29601.
27. Krim, S.; Gdaim, S.; Mtibaa, A.; Mimouni, M.F. Implementation on the FPGA of DTC-SVM Based Proportional Integral and Sliding Mode Controllers of an Induction Motor: A Comparative Study. *J. Circuits Syst. Comput.* 2017, 26, 1750049.
28. Talla, J.; Leu, V.Q.; Šmídl, V.; Peroutka, Z. Adaptive Speed Control of Induction Motor Drive With Inaccurate Model. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2018, 65, 8532–8542.
29. El Mourabit, Y.; Derouich, A.; El Ghzizal, A.; El Ouanjli, N.; Zamzoum, O. Nonlinear backstepping control for PMSG wind turbine used on the real wind profile of the Dakhla-Morocco city. *Int. Trans. Electr. Energy Syst.* 2020, 30, e12297.
30. Saidi, Y.; Mezouar, A.; Miloud, Y.; Benmahdjoub, M.A.; Brahmi, B.; Meddah, A.; Khalfallah, B. Adaptive Control of Wind Turbine Generators for Power Capture Optimization by Using Integral Backstepping Approach During Partial-Load Operation. *J. Control Autom. Electr. Syst.* 2021, 32, 1041–1052.
31. Mahmood, M.; Niels Kjølstad, P.; Hans Henrik, N. Robust model predictive control of a wind turbine. In *Proceedings of the 2012 American Control Conference (ACC), Montreal, QC, Canada, 27–29 June 2012*; IEEE: New York, NY, USA, 2012; pp. 4393–4398.
32. Benbouhenni, H.; Bizon, N. Advanced direct vector control method for optimizing the operation of a double-powered induction generator-based dual-rotor wind turbine system. *Mathematics* 2021, 9, 2403.
33. Setiawan, I.; Priyadi, A.; Miyauchi, H.; Purnomo, M.H. Adaptive B-spline neural network-based vector control for a grid side converter in wind turbine-DFIG systems. *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.* 2015, 10, 674–682.
34. Benbouhenni, H. Application of seven-level neural space vector PWM in direct vector control system of doubly fed induction generator for wind

turbine. *Int. J. Smart Grid* 2019, 3, 163–171.

35. Cadenas, E.; Rivera, W. Short term wind speed forecasting in La Venta, Oaxaca, Mexico, using artificial neural networks. *Renew. Energy* 2009, 34, 274–278.

36. Muyeen, S.M.; Al-Durra, A. Modeling and control strategies of fuzzy logic controlled inverter system for grid interconnected variable speed wind generator. *IEEE Syst. J.* 2013, 7, 817–824.

37. Evangelista, C.; Puleston, P.; Valenciaga, F.; Fridman, L.M. Lyapunov-designed super-twisting sliding mode control for wind energy conversion optimization. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2013, 60, 538–545.