

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет комп'ютерно- інтегрованих технологій, автоматизації,
електроінженерії та радіоелектроніки
Кафедра електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис) О. Ю. Колларов
(ініціали, прізвище)
« ____ » _____ 2021 р.

**Кваліфікаційна робота
бакалавра**

на тему Синтез системи підпорядкованого регулювання положення лопатей вітрогенератора

Виконав: студент 3 курсу, групи ЕЛКЗп-18
(шифр групи)

напряму підготовки (спеціальності) 141"Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Сліпченко М.О.
(прізвище та ініціали) _____
(підпис)

Керівник Кардаш Д.О., асист. каф. «ЕлІн»
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) _____
(підпис)

Рецензент канд. техн. наук, доц. каф. АТ Поцєпаєв В. В.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) _____
(підпис)

Нормоконтроль:

(підпис) Любименко О. М.
02.06.2021
(дата)

Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)
02.06.2021
(дата)

Покровськ – 2021 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації,
електроінженерії та радіоелектроніки

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: бакалавр

Спеціальність: (141) електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (Колларов О. Ю.)

« » _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Сліпченко Максим Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Синтез системи підпорядкованого регулювання положення лопатей вітрогенератора.

керівник роботи Кардаш Дмитро Олександрович, асист. каф. «ЕлІн
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 2 червня 2021 року.

3. Вихідні дані до роботи: Принципальна схема ділянки системи з відновлювальними джерелами енергії, яка включає в свій склад електричним приводом

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Виконання математичного опису системи автоматичного керування та складання структурної схеми досліджуваної системи.

2. Синтез та аналіз контуру регулювання струму якоря електродвигуна.

3. Синтез та аналіз контуру регулювання швидкості та положення двигуна.

4. Моделювання спроектованої схеми в системі автоматизованого ПР.

5. Охорона праці.

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

Дев'ять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Біла Н. С.		
Пункти 4.1 – 4.4	Кардаш Д. О.		
Нормоконтролер	Любименко О.М.		

7. Дата видачі завдання 5 травня 2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Пункт 4.1	05.05–10.05.21	
2.	Пункт 4.2	11.05–14.05.21	
3.	Пункт 4.3	15.05–20.05.21	
3.	Пункт 4.4	21.05–28.05.21	
5.	Охорона праці	29.05–01.06.21	

Студент _____
(підпис)

Слипченко М.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Кардаш Д.О.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Сліпченко М.О., «Синтез системи підпорядкованого регулювання положення лопатей вітрогенератора.» / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» – ДВНЗ ДонНТУ, Покровськ, 2021.

В дипломному проекті розглядається питання синтезу та побудови математичної моделі системи керування лопатями вітрового генератора.

На початку роботи були досліджені типи сучасних вітрових генераторів, їх різновиди та конструкцію. Також аналіз було зроблено, щодо, систем підпорядкованого керування за координатою положення, застосування в ланці керування спостерігачів за поточним станом положення електричного приводу. Ще одне важливе питання, яке було розглянуто – це типи датчиків положення та способи отримання від них інформації, про поточний стан параметрів електропривода.

Далі, був проведений, синтез системи підпорядкованого управління лопатей вітрового генератора. А це означає, що відбулося обрання розрахунків та налаштування блоків у контурах, відповідно струму, швидкості та положення. Так, наприклад, у внутрішньому контурі струму, виконується розрахунок за модульним оптимумом, а у контурі швидкості та положення – технічний оптимум. Як результатом, всього дослідження, стало моделювання у пакеті Matlab r2021 спроектованої системи, що й довело доцільність роботи.

Ключові слова: ЕЛЕКТРОПРИВОД, БАГАТОКОНТУРНА СИСТЕМА, РЕГУЛЯТОР ШВИДКОСТІ, СИСТЕМА ПІДПОРЯДКОВАНОГО КЕРУВАННЯ, ДАТЧИК СТРУМУ, КОНТУР РЕГУЛЮВАННЯ СТРУМУ, SIMULINK, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, MATLAB.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1. ОГЛЯД СТРУКТУРИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА У ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ.	10
1.1 Типи вітрових генераторів.	10
1.2 Типи електричних приводів, які застосовують у вітроенергетичних установках.	14
1.3 Огляд структура вітроустановки.	15
1.4 Застосування спостерігачів стану	18
1.5 Використання датчиків в систем керування за положенням.	21
2. ОГЛЯД СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ У ВІТРОГЕНЕРАТОРІ	24
2.1 Режими роботи вітроенергетичної установки та аналіз її функціонального складу.	24
2.2 Керування лопатями турбіни	26
3. ВИКОНАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО ОПИСУ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ. СКЛАДАННЯ ЇЇ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ	29
3.1 Опис елементів проектованої САР електричного приводу.	29
3.2 Обрання та розрахунок вентильного перетворювача.	34
3.3 Обрання та виконання давача струму.	35
3.4 Виконання давача швидкості.	36
3.5 Обрання задавача інтенсивності	37
4. СИНТЕЗ КОНТУРІВ РЕГУЛЮВАННЯ КОНТУРІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА	40
4.1 Синтез регулюючого контуру струму якоря електродвигуна.	40

4.2 Аналіз динаміки контуру РС із урахуванням зустрічної ЕРС електродвигуна	47
4.3 Реалізація спроектованого контуру РС з використанням операційного підсилювача	52
4.4 Аналіз та синтез контуру регулювання швидкості	54
4.5 Реалізація спроектованого контуру РШ з використанням операційного підсилювача	60
4.6 Аналіз та синтез контуру регулювання положенням. Виконання моделювання.	65
ВИСНОВКИ	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	73
ДОДАТОК А «Зауваження контролера з нормування»	76
ДОДАТОК Б «Охорона праці. Правила експлуатації систем з альтернативними джерелами енергії, які включають в свій комплекс вітрогенератори»	77
ДОДАТОК В «Код програми для побудову ЛФЧХ та ЛАЧХ системи, за допомогою математичного пакету Matlab у M-file»	82
ДОДАТОК Г «Розрахунок параметрів контуру РШ»	86

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВГ – вітровий генератор;
АД – асинхронний двигун;
СГ – синхронний двигун;
РП – регулятор положення;
ДП – датчик положення;
РШ – регулятор швидкості;
РС – регулятор струму;
 T_{zi} – стала часу блоку давача інтенсивності;
 $T_{ш}$ – стала часу контуру регулювання за значення швидкості;
 T_i – стала часу контуру регулювання за значенням струму;
ДШ – датчик швидкості;
ДС – датчик струму;
ОР – об'єкт регулювання;
 σ – величина перерегулювання;
 $W(p)$ – передатна функція;
 $R_{я}$ – активний опір ланцюга якоря електродвигуна;
 t_c – час першого узгодження;
 ε_p – величина прискорення розгону.

ВСТУП

Актуальність теми дипломного проекту. В наш час розвитку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) приділяється велика увага у багатьох, особливо розвинених, країнах світу і в тому числі і у нашій державі Україні. На промисловий рівень своїх потужностей, сьогодні, вийшли такі області ВДЕ, як фотоелектрика (або фотоелектричні станції) та вітроенергетика (або вітрові парки) [1-4].

Енергія вітру, серед всіх видів відновлювальних джерел, займає особливе місце, тому що вона має свої особливі, специфічні властивості - з одного боку це доступність, а з іншого - мінливість, в залежності від імовірного характеру прогнозу. Сьогодні існує безліч технологічних рішень стосовно складу та режимів роботи вітрових електричних установок (ВЕУ), які залежать від різних факторів.

Одна із основних проблем, яка виступає при роботі з вітрогенераторами це задачі оптимізації режимів роботи вітрової установки[1].

Широкого застосування набули вітрові установки зі змінним значенням швидкістю обертання турбіни (генератора), що дозволяє отримувати більшу кількість електричної енергії, ніж ті вітрогенератори, які працюють з постійною швидкістю обертання. Це, в першу чергу, пов'язано з тим, що вітроустановка зі змінною швидкістю обертання проектується та виконується з принципом дії, головна мета якого забезпечити, в якомога ширшому діапазоні швидкості вітру, максимальне значення аеродинамічної ефективності.

І саме у цих засадах та проблемах вітроенергетики і знаходиться актуальність даної роботи – покращити відбір вітрової енергії, яка буде перетворена в електричну, шляхом синтезу систем підпорядкованого керування лопатями вітрової турбіни. І також – пришвидшити перехід до застосування вітрових генераторів в енергетичній галузі України, що в свою чергу веде до енергетичної та економічної незалежності від інших держав [6,9].

Отже мета даної роботи – синтез і аналіз системи підпорядкованого керування лопатями вітрогенератора.

Предметом дослідження роботи є процеси управління та регулювання в контурі положення лопатей вітрогенератору.

Сумарна встановлена потужність вітроенергетики України на початок 2020 року становила 1,2 ГВт, з яких майже 650 МВт були введені в експлуатацію в 2019 році [2,5].

У той же час було зазначено, що за даними Української вітроенергетичної асоціації (УВЕА), загальна потужність глобального вітроенергетичного сектора перевищила 650 ГВт, з яких 225 ГВт припадає на долю вітрової енергетики в Європі [2,7].

Також УВЕА очікує близько 400 МВт нових вітроенергетичних потужностей, які будуть введені в експлуатацію в 2021 році.

У світі, сьогодні, вже накопичено значний позитивний досвід в галузі застосування вітроенергетичних установок (ВЕУ), також існують надійне сучасне обладнання та різні технічні рішення, що в свою чергу, дозволяє використовувати вітроустановки в різних погодних та кліматичних умовах. Провідні виробники пропонують установки як середньої потік 0,1-0,5 МВт, так і великий потужності від 0,5 до 15 МВт, з яких вже можливо формувати об'єднані в електричну мережу енергокомплекси, що називають вітряними парками або фермами [3-5].

Структура та обсяг дипломного проекту. Випускна кваліфікаційна робота обсягом 87 машинописних сторінок та складається з вступу, чотирьох основних розділів, висновків, 43 рисунків, переліку використаних джерел, що містить 20 найменувань та 4 додатків.

1. ОГЛЯД СТРУКТУРИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА У ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ

1.1 Типи вітрових генераторів.

Існує два основних типи вітряних турбін (рисунок 1.1), які застосовуються в реалізації вітроенергетичних систем:

- горизонтально-осьові вітрові турбіни (ГОВТ);
- вертикально-осьові вітрові турбіни (ВОВТ).

Вітрові генератори за типом ГОВТ є найбільш часто використовуваним типом, і кожна турбіна володіє двома або трьома лопатями чи диском, який містить безліч лопатей (багато лопатевий тип), прикріплених до кожної турбіни.

Вертикально-осьові вітрові турбіни можуть використовувати вітрової потік в будь-якому напрямку і зазвичай виготовляються з лопатями, які обертаються навколо вертикального полюса [10].

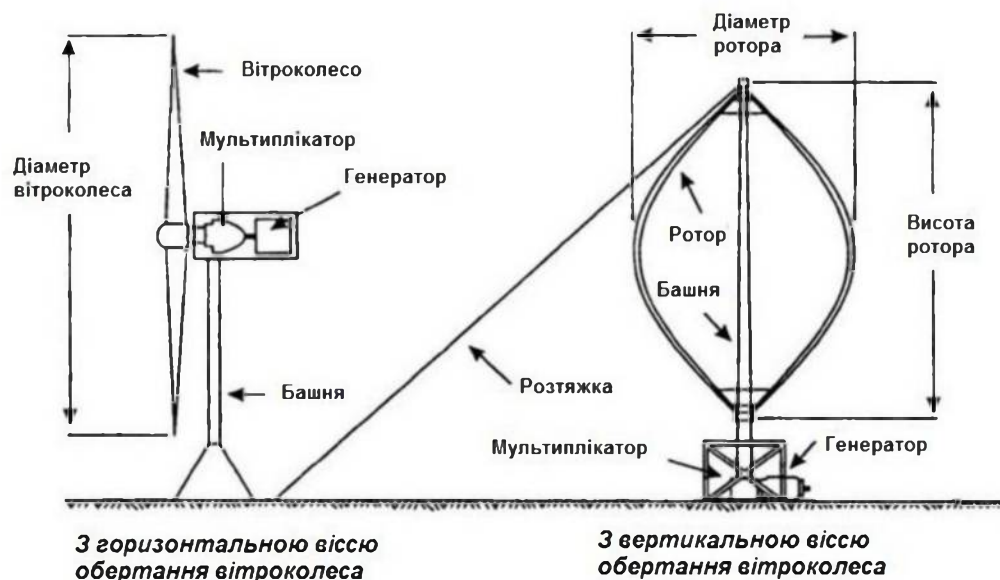


Рисунок 1.1 – Типи вітроелектричних установок та їх головні елементи [15]

Конструкція за вітрові турбін з горизонтальною віссю має характеристику пристроїв з високим або низьким рівнем міцності, в цьому значенні міцність відноситься до відсотку області охоплення, що містить

твердий матеріал. Генератори високої потужності поточного типу включають типи з великою кількістю лопатей, що покривають загальну площу, яку охоплюють лопаті, з твердим матеріалом, щоб максимізувати загальну кількість вітру (що стикається, зустрічається з лопатями). Прикладом високоміцної конструкції за типом ГОВТ є турбіна з багатьма лопатями, що використовується для перекачування води на фермах. Турбіни за принципом ГОВТ низької міцності найчастіше використовують три або дві довгі лопаті, що нагадують повітряні пропелери. Ці лопаті мають низьку частку матеріалу в зоні охоплення, проте це компенсується значно більшою швидкістю обертання, які використовуються для заповнення області охоплення лопатями. Генератори такого типу є найбільш часто використовуваними в комерційних вітрових генераторах. І саме вітрові генератори даної структури мають найбільший параметр «ефективності» у виробництві електричної енергії і відповідно, є одними з найбільш використовуваних економічних моделей [5].

Що ж до менш залучених у використанні генератори за типом BOBT, то здебільшого це експериментальні конструкції, що можливо характеризувати за формою та способом використання енергії вітру. У генераторах за типом BOBT, класу «Н» використовуються дві прямі лопаті, які прикріплені до сторони вежі Н формою, а у генераторах типу BOBT, класу «V» застосовують прямі лопаті, які прикріплені під кутом до валу та утворюють форму V-подібну. Проте в цьому аналізі варто сказати, що більшість вітрогенераторів типу BOBT, в порівнянні з ГОВТ (-вим), не є економічно конкурентоспроможними однак інтерес до прикладних досліджень та розробок типу BOBT зберігається, а особливо для створення інтегрованих систем, які включають вітроенергетичних комплекси [8,9].

Оцінка потужності вітроколеса. Згідно до закону Бетца, значення максимальною потужності, яку може виробляти (генерувати) вітряна турбіна, не може перевищувати значення в 59% від кінетичної енергії вітру. Приймаючи це обмеження до уваги очікувана потужність, яка генерується певною вітровою турбіною, характеризується за оцінкою кривої потужності

вітру, що отримана для кожної вітротурбіни, які зазвичай зображають у вигляді графіка, що показує співвідношення між вироблюваної потужністю (кВт) і швидкістю вітру (метри в секунду). Крива характеристики потужності вітру змінюється в залежності від параметрів, які є унікальними для кожної турбіни, до прикладу, це кі форма лопаті, кількість лопатей, площа охоплення ротора та швидкість обертання. Для того, щоб визначити, яка кількість енергії вітру буде вироблено від конкретної турбіни в певному місці розташування, крива потужності швидкості вітру турбіни повинна бути зв'язана з розподілом частоти вітру для її ділянки. Розподіл частотної швидкості вітру уявляє собою гістограму, яка представляє класи швидкості вітру та частоту в годинах на рік, що очікуються для кожного класу швидкості вітру. Дані для побудови цих гістограм, зазвичай, надходять шляхом вимірами швидкості вітру, які зібрані на ділянці та використовуються для розрахунку кількості годин, що спостерігаються для кожного класу швидкості вітру [7,11].

Оцінка приблизна щорічного виробництва електричної енергії в [кВт*г] (кіловат-годинах) на рік на ділянці, може бути розрахована за наступним методом:

$$P_p = V_B \cdot S \cdot N \cdot \eta, \quad (1.1)$$

де: – V_B – середню річну швидкість вітру;

- S – площа, яку охоплюють турбіни [м^2];
- N – кількість турбін;
- η – коефіцієнт продуктивності турбіни на ділянці [%].

Однак, при цьому, додаткові фактори здатні в кілька разів знизити щорічні оцінки виробництва електроенергії, які включають і втрату енергії через передачі на дальні відстані, а також від корисності (тобто, наскільки надійно турбіна буде виробляти енергію, коли є вітер) [9].

Про основні проблеми вітряних турбін можна сказати наступне – одні з основних проблема розміщення вітрових генераторів пов'язана з негативними

впливами на навколишнє середовище це і перешкоди пов'язані з шумом і впливом на дику природу [18]. Існує два види шумів, які пов'язані з турбінами – це:

- аеродинамічний шум, який створюється під час руху повітря крізь лопаті вітрогенератора. Аеродинамічний шум описують часто, як «свистячий» звук, що є фактором впливу типів лопатей та швидкості обертання колеса;

- механічний шум, який створюється власне устаткуванням, таким як коробка передач (редуктором). Механічний шум може бути ослаблений зміною механічних компонентів турбін.

Проте, шум вітрової турбіни в дБ (децибелах, одиниці вимірювання шуму) не голосніший за звук автомобіля при русі, та його часто можна порівнюють з шумом в сільській місцевості в нічний час [6].

Проблему вітрогенераторів також включає мерехтіння, де світло може відбиватися від обертових лопатей і зони електромагнітних завад, які впливають на телевізійні і радіосигнали в безпосередній близькості від турбін [17].

Отже, підбиваючи проаналізувавши джерела, хотілось би окреслити тепер переваги і недоліки вітроенергетики. В першу чергу, вітроенергетика має наступні переваги:

- вітрова енергія є поновлюваним та доступним джерелом енергії, запаси якого є невичерпними;

- відсутність шкідливих, в тому числі, і парникових викидів в навколишнє середовище при виробництві електричної енергії;

- можливість забезпечення енергією автономно для віддалених та ізольованих географічних територій;

- необхідна площа для встановлення власне вітропарку або вітроферми є невеликою тому це можливість використання землі, на якій встановлена ВЕУ, для інших цілей, до прикладу, для сільського господарства [19];

До числа недоліків вітроенергетики слід віднести:

- непостійну та нерегульовану генерацію електроенергії, тобто її кількість залежить від зовнішніх факторів, а саме швидкість та, в деяких випадках (коли немає регулювання), напрям вітру;

- більш високі, особливо на початку, капітальні витрати на одиницю потужності в порівнянні з вже традиційними тепловими станціями та навіть альтернативними - фотоелектричними електростанціями. Це через те, що в Україні близько 80% генерованої потужності від ВДЕ, на 2020 рік, становили саме ті, що виробляють електроенергію за допомогою сонця ;

- необхідність розвитку інфраструктури мережі;

- шумовий, електромагнітний та інколи візуальний (особливо в межах міста) вплив на навколишнє середовище та здоров'я людини [6].

1.2 Типи електричних приводів, які застосовують у вітроенергетичних установках

Отже, варто зазначити, що подальший розвиток систем з вітроустановками йде по шляху оптимізації вже існуючих розробок та застосуванню нових профілів лопатей та матеріалів з яких вони виконані [8].

Тому і в даному дипломному проекті було поставлено за мету розглянути питання дослідження та оптимізації системи керування електроприводу, який керує положенням лопатей у вітровій установці.

У вітроенергетичних установках можливо використовувати наступні види генераторів:

- 1) асинхронний генератор подвійного живлення;
- 2) асинхронний генератор з фазним ротором;
- 3) «асинхронізований» синхронний генератор;
- 4) синхронний генератор з електромагнітним збудженням;
- 5) асинхронний генератори з короткозамкненим ротором;
- 6) синхронний генератори (СГ) з магнітоелектричним збудженням, що означає використання постійних магнітів.

7) спеціальні синхронні генератори: індукторні СГ, генератори з ротором у вигляді лопаті (або як його ще називають – кігті) і деякі інші [2,8,18].

Кожен з цих типів генераторів має свої позитивні та негативні риси у використанні.

Слід звернути увагу на асинхронний генератора подвійного живлення, переваги у застосуванні під час проектування вітрових: використання напівпровідникового перетворювача меншої за значенням потужності (близько 35% від потужності вітроустановки), що в свою чергу дозволяє економічно значно знизити його вартість і втрати. Через це, при доволі високих середніх швидкостях вітру (більше 8 м/с) вітрогенератор на основі асинхронних генераторів подвійного живлення більше ефективні [8].

Треба сказати, що використання асинхронного генератора в вітроустановці викликає і певні труднощі, які пов'язані з появою можливих його несправностей, різного роду. Як приклад, можна привести пошкодження обмотки статора, з цих причин виникає необхідність проектування та впровадження відповідних захисних пристроїв [9,11].

1.3 Огляд структура вітроустановки

На рисунку 1 зображені основні елементи, с позначенням їх нумерації, які знаходяться в гондолі – корпус вітрового генератора середньої та високої потужності, який застосовують в промислових масштабах, у вітропарках. Тип турбіни приведенного вітрогенератора є, як можна побачити з розділу 1.1 найбільш розповсюджений у вітрових генераторах, а саме – горизонтально-осьові вітрові турбіни [9,18].

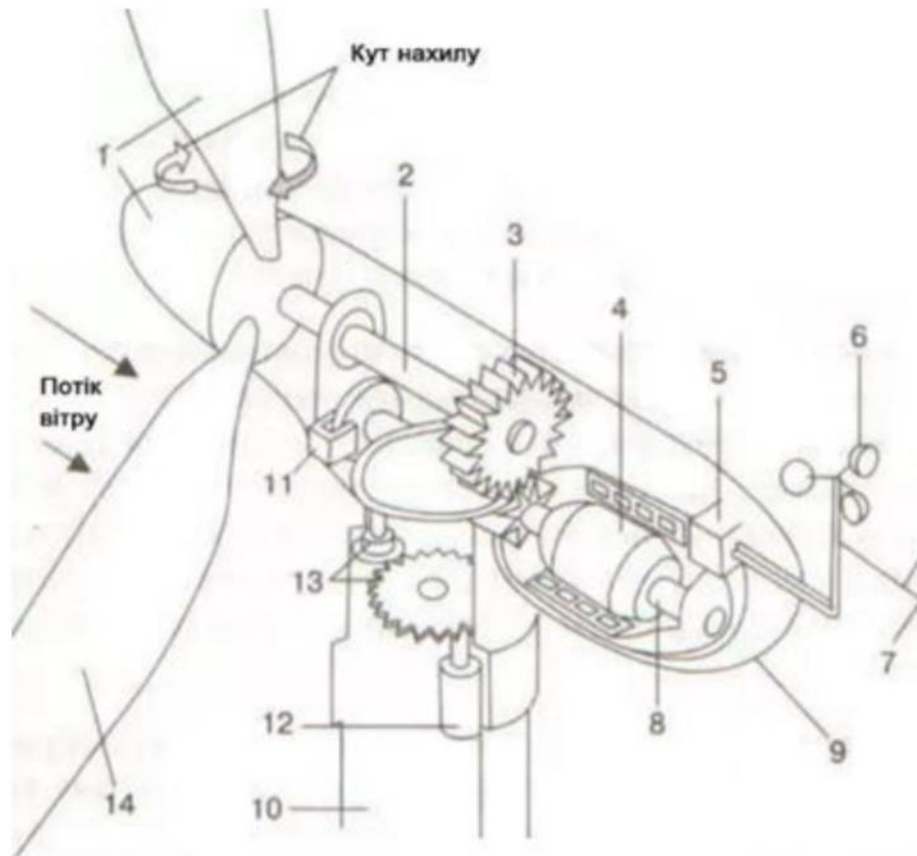


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення елементів вітрогенератора [18]

Отже на зображені показані:

- 1 – ротор вітрової установки (генератору);
- 2 – вал з низькою швидкістю або зовнішній (тобто основний ротор вітрогенератора, який перетворює енергію вітру в поки що механічну);
- 3 – редуктор швидкостей;
- 4 – генератор (ротор, який перетворює механічну енергію з елементу №2 в електричну);
- 5 – контролер, що слідкує за роботою всіх електричних елементів, швидкістю валів, системи та зовнішніми погодними умовами;
- 6 – анемометр або вітромір, призначений для збору інформації про погодні умови (з приладу №7) та передавання цієї інформації до контролера (елемент №5);
- 7- флюгер, метеорологічні прилади. Дуже важливий елемент конструкції, адже він визначає напрям вітру і за допомогою електропривода (елемент №13),

коли це необхідно, тобто прийшла команда від контролеру, вся основна конструкція повертаються на потрібний кут для того, щоб забезпечити умови перпендикулярності між вітровим потоком та лопаттю, що в свою чергу призведе до максимального відбору потужності в даній мережі;

8 – вал високої швидкості, має зубчате з'єднання з валом низької швидкості ;

9 – корпус, в який і поміщена уся механічна та електрична система генерації електроенергії, системи перетворення та трансформації знаходяться на землі, щоб не робити конструкцію ще важчою, адже сам корпус може знаходитися на висоті 100-150 метрів над поверхнею, що робить складним і його обслуговування ;

10 щогла, яке підіймає корпус над землею, також уже важливий елемент усієї конструкції, по її «стовбуру» електрична енергія через буде ;

11- гальмо, необхідно у випадку перевищення допустимого значення швидкості вітру (за нормами це значення становить близько 15 м/с) і також під час будь-яких ремонтних робіт в механічній або електричній частині;

12- електропривод, за допомогою двигуна здійснює переміщення усього корпусу (елемент №9)

13- диски обертання, які діють за тим же принципом ще і у 3, тільки тут вже з'єднання відбувається в горизонтальній площині ;

14- лопаті, елементи системи, за допомогою яких і відбувається повернення ротору низької швидкості.

А рисунок 1.3 демонструє спрощену загальну схему вітрогенератора, яка додатково дає зрозуміти, яким чином та за допомогою яких елементів у конструкції, вітроенергетична установка розташовується на поверхні землі [9,12].

Тут схематично, окрім розглянутих вище, наведені під номерами наступні елементи:

1 – фундамент, на якому і розташовується вітрогенератор;

2 – шафа з силовим обладнанням, де розташовується ланцюги керування та силові контактори;

3 – вежа або башта – конструкція, на якій закріплюється лопаті та корпус;

4 – сходи башти, які допомагають персоналу, що обслуговує;

5 – поворотний механізм корпусу [18].



Рисунок 1.3 – Спрощена загальна схема вітрогенератора [16,18]

1.4 Застосування спостерігачів стану

Систему регулювання за положенням неможливо уявити без спостерігачів стану, і вітроенергетична установка не є виключенням у цьому питанні. Тому необхідно більш детально розглянути їх структуру, характеристики та завдання, які перед ними ставляться.

Отже для систем з точним позиціонуванням, а проєктована сама належить до таких, як правило, потрібна система, що буде відстежувати та керувати налаштуваннями поточного становища. І саме однією з таких систем виступає спостерігач стану.

Сам термін «спостерігач стану» є загальним поняттям в теорії управління. Під самим «спостерігачем» розуміють структуру певного виду, яка дозволяє за відомими критеріям працюючого в системі електричного двигуна, або усього електроприводу, давати оцінку величинам, які невідомі. В електричних приводах, що досліджується у даній науковій роботі, до таких параметрів можна віднести: напругу, струм та швидкість, тобто такі параметри, які безпосередньо вимірюють за допомогою датчиків. За умов відсутності датчика швидкості, завдання спостерігача трохи ускладнюється, через те, що швидкість перестає бути відомою або вимірювальним параметром та переходить в ряд оцінюваних. У такому випадку, спостерігачі стану стають, просто критично, необхідним.

Класифікація спостерігачів представлені на рис. 1.4 схема класифікації спостерігачів стану.

Застосування непрямих вимірювачів положення. Спостерігачі цього типу потрібно застосовувати в електричних приводах без наявності датчиків. Для застосування вимірювання положення ротора(якоря) електродвигуна спостерігачі застосовують магнітну неоднорідність властивостей машини. До прикладу, неоднорідність магнітної проникності чи несиметричність обмоток. Сьогодні, одним із популярних методів, яким виконують вимірювання спостерігачі, має назву «високочастотна інжекція». Поточний метод приходить до генерації тестових сигналів високої частоти, і до пошуку реакції на сигнал реального положення ротора (або якоря). Швидкість ротора можна оцінити при ньому, як диференціал положення. З одного боку, це є досить складно та характеризується додатковими підвищеним рівнем шуму та втратами, а з іншого – точність методу доволі сильно залежить від властивостей конкретно взятого електродвигуна. Використання цього методу необхідно розглядати індивідуально для кожного випадку [14]. Тому і в цій роботі тепер можна від цього методу відмовитися.

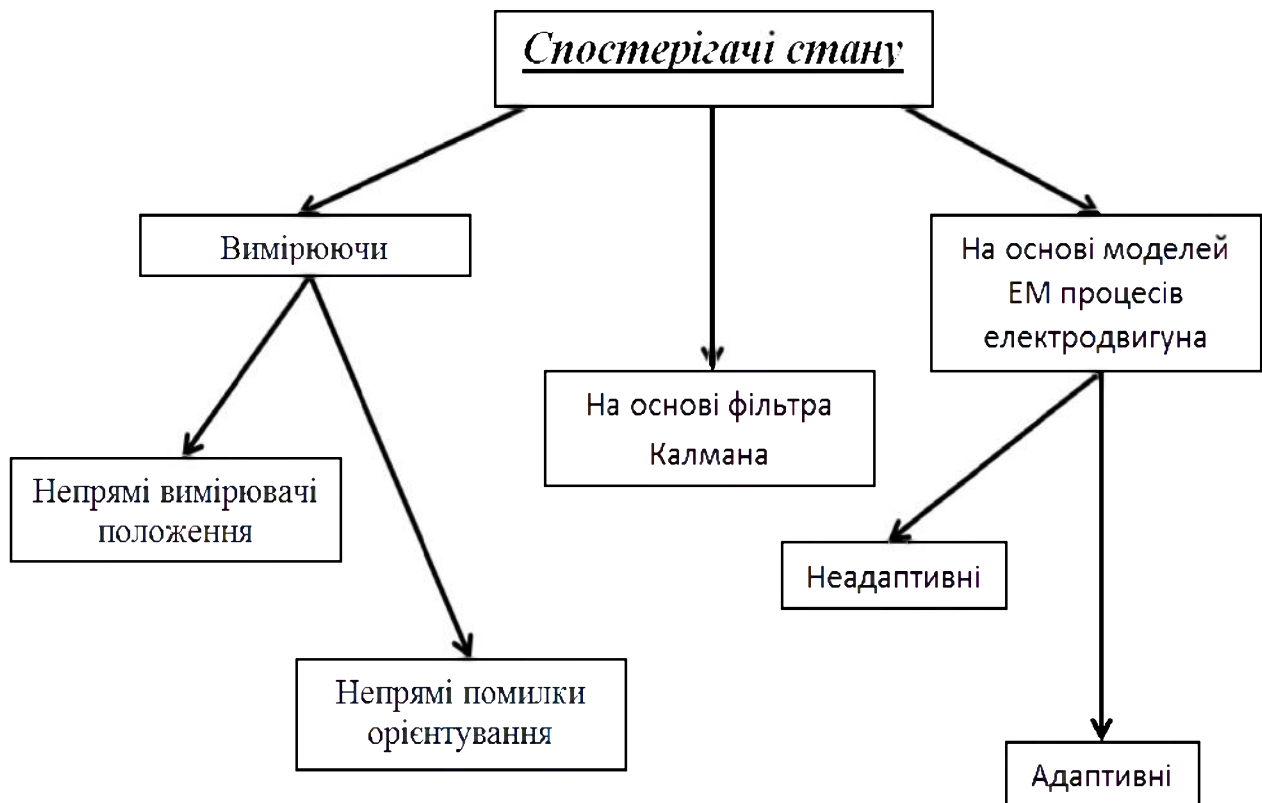


Рисунок 1.4 – Класифікація спостерігачів стану

Пристрій для вимірювання помилки орієнтування, спостерігачі цього типу також застосовуються електроприводах, де немає датчиків. В свою чергу, вони використовують внутрішні сигнали системи керування, які залежать від помилки та її орієнтування. Ці пристрої в літературі називають адаптивними, через те, що вони спрямовують значення помилки орієнтування до нуля. Положення у цій системі, можна оцінювати за швидкістю якоря.

Не адаптивні спостерігачі стану виконані на основі моделей електродвигуна. Спостерігачі цього типу застосовуються вже у приводах з датчиками положення або швидкості. Використовуючи формули моделі процесів двигуна, пристрою за відомим (виміряними раніше) параметрами розраховують значення оцінки, що необхідні для регулювання вже невідомих величин [15].

Адаптивні спостерігачі на основі моделі електродвигуна, пристрої цього типу можна зустріти, як в електричних приводах з датчиками швидкості чи

положення, так і без них. Побудову та впровадження таких спостерігачів застосовують для використання їх у якості, системи, яка стежить за параметрами. Крім самої моделі, в їх склад також входить й регулятор адаптації моделі до реальних фізичних процесів, що відбуваються в електродвигуні або приводі [16].

1.5. Використання датчиків в систем керування за положенням.

Як правило в системах підлеглого регулювання, окрім, застосування спостерігача стану, необхідно передбачити ще й датчики. Отже, потрібно розглянути їх конструктивні особливості.

Для початку розглянемо вимірювальні датчики. Датчик переміщення, взагалі, є вимірювальним перетворювачем лінійних або кутових зсувів у сигнал – електричний, механічний або пневматичний, який буде зручний, як і для реєстрації, так і для дистанційної передачі та подальших перетворень чи обробки [16].

Датчики можуть характеризуватися наступними параметрами:

- граничними межами змін входних ($v_{\min}$ – $v_{\max}$), а також вихідних величин ($u_{\min}$ – $u_{\max}$);
- чутливістю чи порогом чутливості, яка є значенням мінімальної дії, на яку відреагує датчик положення;
- законом, який виконує опис зміни величини вихідного параметру (u) в залежності від значення входного впливу чи входної величини (v);
- тимчасовими параметрами, наприклад, сталими часу.

Сьогодні, не можна уявити галузь роботи з електричним приводом, де б не потрібно було використовувати датчики переміщення та положення. Вони є важливою, якщо, навіть, не основною, сполучною ланкою між механічною та електронною частиною приладів.

Під час вибору датчика, який необхідно інтегрувати у схему, в першу чергу, важливо обрати потрібні пріоритети за наступними критеріями:

- швидкість виконання вимірюваного;
- клас захисту та умови використання;
- габаритні розміри приладу;
- надійність застосованого обладнання;
- значення лінійності, чи навпаки, не лінійності;
- точність та сигнал дозволу;
- вартість приладу.

Також, потрібно прийняти до уваги, що датчик визначає відносно чи абсолютне положення об'єкту дослідження, яке підлягає контролю. Виділяють також два основні методи для визначення положення, а також вимірювання переміщень [14].

При виконанні завдання за першим методом – датчик генерує сигнал, що є функціональною залежністю положення однієї з його частин, яка, в свою чергу, пов'язана з рухомим об'єктом, а вже зміни цього сигналу характеризують переміщення. Такі датчики за положенням мають назву абсолютними і до них слід віднести наступні види:

- датчики індуктивні з використанням рухомого сердечником;
- резистивні або потенціометричні датчики;
- кодові цифрові датчики з абсолютними значеннями;
- датчики ємнісні з рухомими обкладинками.

При використанні другого методу, при кожному елементарному переміщенні генерує датчик одиничний імпульс, а положення при цьому може бути визначено, шляхом підрахунку суми цих імпульсів та в залежності від напрямку переміщення. Датчики положення такого типу називають відносними. Їх перевагою, перед абсолютними, є такі їх риси, як низька вартість та простота в обслуговуванні, а серед недоліків цих приладів слід віднести моменти пов'язані з мікропроцесорною обробкою сигналу та періодичним виконанням калібрування.

Також датчики можна розділити на безконтактні та контактні. У датчиках першого типу (безконтактних) відбувається зв'язок між самим

приладом та рухомим об'єктом, воно здійснюється шляхом електростатичного або електромагнітного поля, а також магнітного [19].

Резистивні (або потенціометричні) датчики засновані на простому принципі дії, який призводить до досить помірної вартості. Вимірюваний сигнал, при цьому, має досить високий показник лінійності, який не вимагає для цього спеціальної електричної схеми для обробки. При цьому, такий датчик має своє внутрішнє тертя, яке, звичайно, впливає на його точність тому, що воно є джерелом шумів і причиною зносу, а це тягне за собою і погіршення характеристик (точності, лінійності) і створює межу у кількості вимірювань, що датчик зможе витримувати. Також, на його функціонування істотно впливає навколишнє середовище, до прикладу, таке, як вологість, значення температура, пил). Уникнути цих факторів дестабілізації допоможе використання:

- сучасних резистивних покриттів заповнених на основі пластиків;
- застосування магніт залежних резисторів – для виконання безконтактного зчитування положення.

2. ОГЛЯД СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ У ВІТРОГЕНЕРАТОРІ

2.1 Режими роботи вітроенергетичної установки та аналіз її функціонального складу.

Завданням, яке ставиться перед ланцюгом керування вітрогенератором є безперервна адаптація значення частоти обертання ротора (ω) до змінного параметру швидкості вітру (n_v). Таке рішення дозволяє виконувати підтримку оптимального співвідношення значення швидкодії або як ще називають цю величину – швидкохідності (λ), вона забезпечує отримання максимальної вихідної потужності, що є основною задачею, яке ставиться перед усіма системами з використанням ВДЕ [18,19].

Отже, в цьому випадку, можна використовувати головну перевагу турбіни, яка працює зі змінною швидкістю обертання – генерацію більшої за значенням потужності. При цьому слід враховувати, що при граничній швидкості вітру, її необхідно обмежити, щоб не відбулось аварійного або перед аварійного випадку. І тому в функціональному складі застосовується два види обмеження:

- Електричне гальмування (на схемі рис. 2.1 позначено – ЕГ1);
- Механічне гальмування (на схемі рис. 2.1 позначено – МГ) [9].

І ще можливий випадок, коли необхідно застосовувати обидва види, комбіноване – тоді застосовується електричне гальмування (вже ЕГ2) та механічне гальмування (МГ).

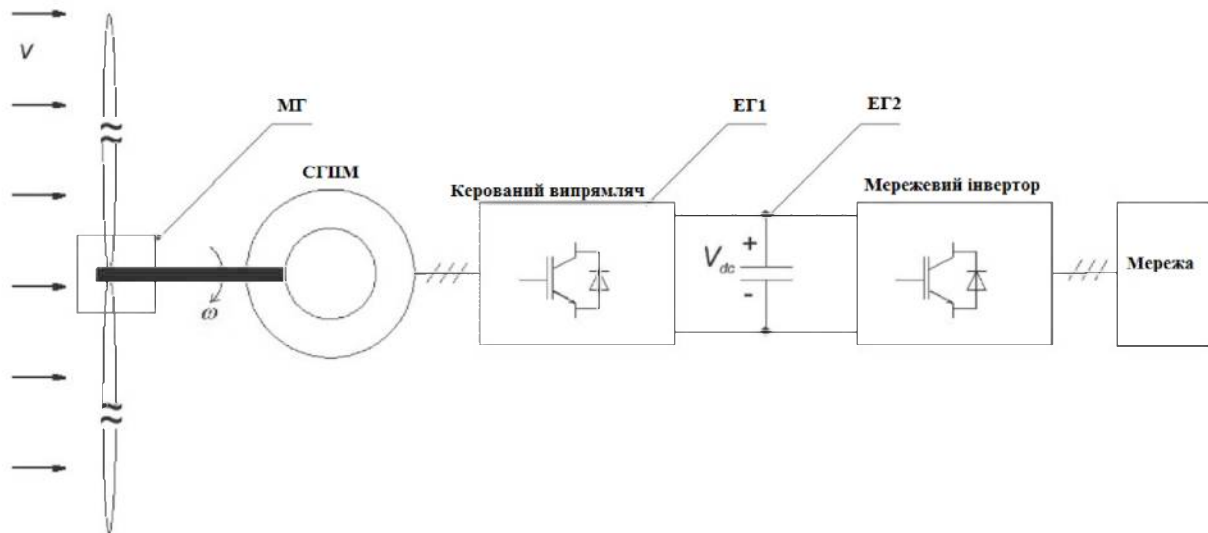


Рисунок 2.1 - Функціональний склад вітроенергетичних установок

Якщо переходити до розгляду структурної схеми управління вітрової установки (рис. 2.2) з типом електричної машини – синхронний генератор з використанням постійних магнітів, то варто зазначити, що при такому управлінні використовують чотири незалежних підсистем [9].

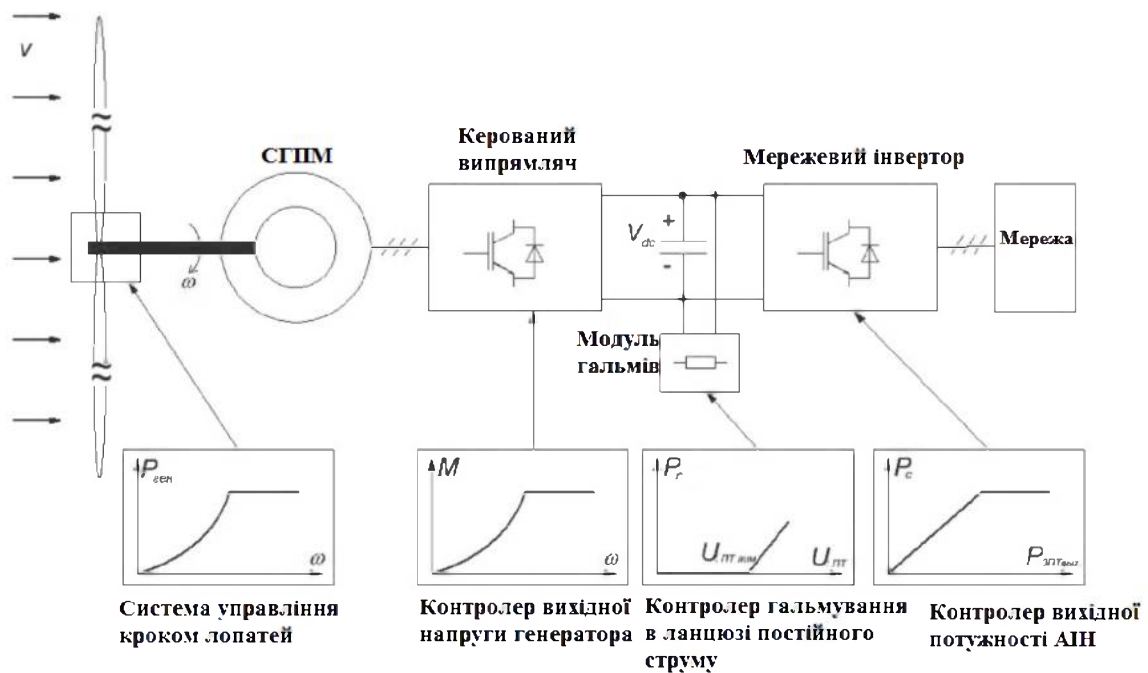


Рисунок 2.2 – Структура системи управління вітроенергетичних установок

В цей склад входять:

- Система управління поворотом (кроком) лопатей.

– Контролер за значенням вихідної напруги синхронного генератора з постійними магнітами.

– Контролер за процесом гальмування вже в ланці постійного струму, адже для уникнення вищих гармонік, генеровану електричну потужність «трансформують» 2 рази. Спочатку у постійний струм, а потім знову у змінний, щоб вже віддати енергію в централізовану електричну мережу.

– Контролер за значенням вихідної потужності автономного інвертору напруги. Сам автономний інвертор напруги (АІН) виконує функцію сполучення вітроустановки з мережею, тобто слідкує за значенням частоти та напруги, яке б відповідало наявним вимогам [8-10].

2.2 Керування лопатями турбіни

Існує декілька видів управління ротора турбіни для того, щоб виконати обмеження генерації потужності під час роботи вітрогенератора у випадках високих швидкостей вітру. Що допоможе уникнути поломки турбіни або, навіть, усієї установки. Один з простих та економічно вигідних – застосування пасивного керування. При його застосуванні лопаті вітрової установки жорстко закріплюються до вітрового колеса, а обмеження значення потужності виходу виконуються за рахунок аеродинамічної форми конструкції самих лопатей.

Проте, звичайно, цей метод є придатним тільки для вітрогенераторів малої потужності, або у тих географічних районах, де, можливо, не має сильних поривів вітру.

Другий метод керування, вже включає в себе активне керування кутом повороту лопатей під час зміни швидкості вітру. Перевагою такого методу є управління потужністю доброї якості, передбачені можливості плавного пуску та аварійної зупинки. Однією з особливостей використання даного методу є можливість отримати значення генерованої потужності (дійсного значення) близькою до номінальної потужності генератора, за умови максимальної

швидкості вітру (максимальна можлива для експлуатації). До недоліків цієї системи слід віднести [5]:

- по-перше – виконання додаткової системи та механізму регулювання, що як раз і передбачає застосування додаткових електричних приводів для керування положенням лопатями, що і вивчається в даному дипломному проекті.

- по-друге, це коливання значення потужності при номінальній швидкості вітру. В цьому повинні допомогти акумуляторні батареї, які будуть запасати енергії при її надлишку та видавати потім її у електричну мережу, при її нехватці.

Отже, в даній науковій роботі, виконується дослідження вітрової установки з активним застосуванням ланцюга управління кутом повороту лопатей. Відбувається процес управління кутом за значенням вихідної потужності (коли вона змінюється). Відповідна структурна схема показана на рис. 2.3. [15].

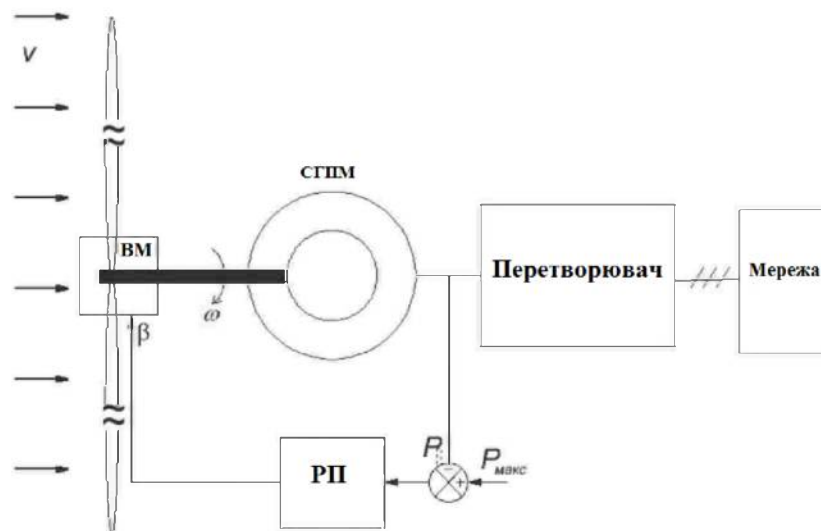


Рисунок 2.3. – Структурна схема вітроустановки з застосуванням комплекту регулювання положенням лопатей

Тут (на рис. 2.3.) також представлені:

РП – регулятор потужності, цей блок включає в себе і ланцюг регулювання положенням лопатями, адже виконуючи порівняння діючої

потужності та заданої, у випадку їх розбіжності відбувається змінна поточного положення лопатей;

ВМ – виконавчий механізм, в даній роботі застосовується електропривод, а взагалі існує можливість застосування ще й гідропривода або навіть пневматичного привода.

В якості значення, за допомогою якого відбувається процес обмеження використовується мінімальне та максимальне значення параметра кута лопаті ($\beta_{\min}$, $\beta_{\max}$) та його похідної. Отже, контур регулювання положення містить нелінійну складову типу насичення за змінною β та її похідної. А саму передавальну функцію виконавчого механізму можливо представити у вигляді системи першого порядку, що показано на (2.1) [14].

$$W_{BM} = \frac{k_{BM}}{k_{BM} + p},$$

$$k_{BM} = \frac{1}{T_{\beta}}$$
(2.1)

де T_{β} – постійна часу системи.

На рис. 2.4. наведена силова схема перетворювача вітроустановки

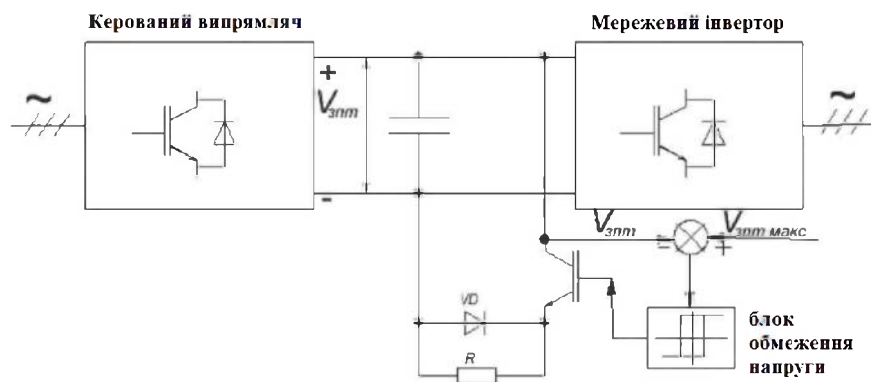


Рисунок 2.4. – Структурна схема вітроустановки з застосуванням комплекту регулювання положенням лопатей

3. ВИКОНАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО ОПИСУ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ. СКЛАДАННЯ ЇЇ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ

3.1 Опис елементів проектованої САР електричного приводу.

Отже, виконавши аналіз існуючих та наявних способів використання електричних приводів у вітрогенераторах, постає питання про те, який саме тип електроприводу необхідно застосовувати про регулюванні положення лопатей вітрового генератору.

З одного боку дуже добре, в останні роки, себе зарекомендували електричні приводи змінного струму, а саме асинхронні двигуни короткого замкненого типу. Однак постає нове питання про те, звідки брати для них живлення у вітрогенераторах. Адже ці приводи не такої великої потужності на відміни від тих, що генерують з вітрової енергії, електричну. До того ж, вітроустановка не завжди видає однакові вихідні параметри і є дуже залежною від погодних умов, а як раз приводи лопатей повинні бути незалежними від погодних умов. Адже саме зміна погодних параметрів і викликає необхідність застосовувати цей електричний привод. Для вирішення цього питання можна було використати живлення від централізованої електромережі, куди віддає вироблену енергію вітрогенератор, однак, вона як правила одного напрямку, а по друге, зазвичай вітроенергетичні станції накопляють електричну енергію шляхом використання акумуляторів, а вже потім віддають у мережу. Таке конструктивне рішення дозволяє забезпечувати мережу електричної енергією протягом усієї доби в рівній кількості та без перерв викликаних зовнішніми факторами [14-15].

І саме наявність цього ланцюгу в системі і підказує відповідь на головне питання, про тип електроприводу, що необхідно використовувати.

Адже маючи батареї, можливо застосовувати електропривод постійного струму, і головне, що при цьому силове обладнання можна залишити біля

аккумуляторної станції, на поверхні землі. А сам електричний привід помістити у корпус вітрогенератора і при тому не перевантажувати його конструкцію.

На користь саме цього типу електроприводу говорить і те, що в системі керування лопатями необхідно точність регулювання та його широкий діапазон. Оскільки мало тільки керувати положенням «повернутий до вітру» чи «за вітром» необхідно ще й регулювати у проміжних діапазонах.

Під час виконання математичного опису системи автоматичного керування її як правило ділять на окремі елементи.

Вони обов'язково повинні бути односпрямованої властивості, тобто значення вхідного сигналу не має вплив на вихідний, а в свою чергу, вихідний не має впливати на вхідний [18].

Рівність диференційних рівнянь, які виконують опис процесів в реальній та функціональній залежності поміж вхідними і вихідними параметрами є основою для математичного опису.

В дипломній роботі розглядається система підпорядкованого регулювання положення лопатей вітроенергетичної установки. До складу системи, що піддається синтезу входять наступні компоненти:

- 1) Задавач інтенсивності (ЗІ);
- 2) Двигун постійного струму, з незалежним збудженням (ДПС);
- 3) вентильний перетворювач (ВП);
- 4) давач положення (ДП);
- 5) регулятор положення (РШ);
- 6) давач швидкості (ДШ);
- 7) регулятор швидкості (РШ);
- 8) давач струму (ДС)
- 9) регулятор струму (РС) [15, 16].

Під час розгляду рівнянь математичної моделі електричного двигуна постійного струму з НЗ, необхідно дотримуватися слідуєчого положення:

- 1) магнітний потік є незмінним параметром $\Phi = const$, а це значить відсутня дія реакції якоря, яка розмагнічує;

2) індуктивне значення якірного ланцюга значення постійне, тобто – $L_{я} = const$.

3) відсутній будь-який вплив на систему вихрових струмів;

Схема електричного двигуна постійного струму [10], який було обрано у якості машини електропривода в даній роботі зображено на рис. 3.1.

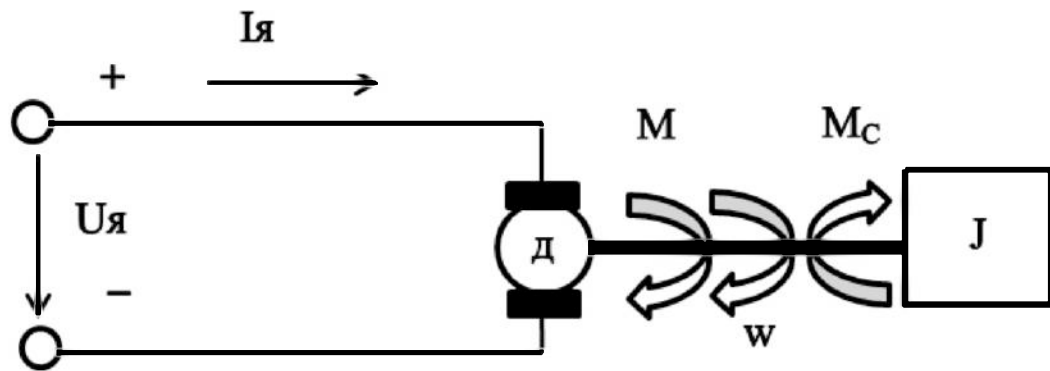


Рисунок 3.1 – Електричний двигун постійного струму незалежного збудження

А схема заміщення електричного двигуна показана на рис. 3.2. за [8,10].

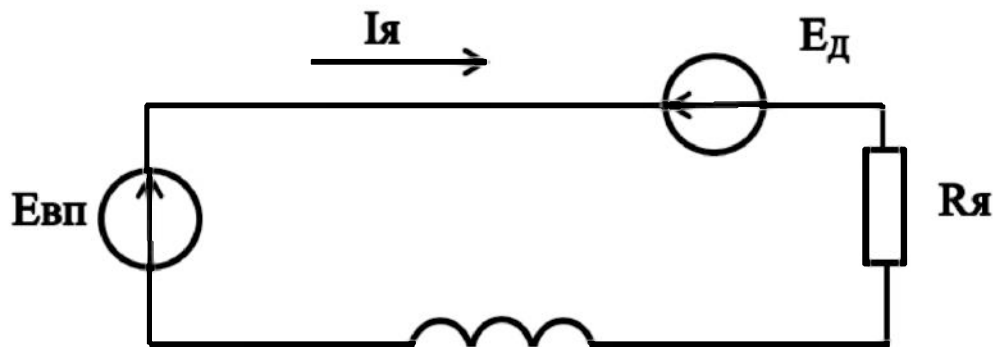


Рисунок 3.2 – Електрична схема заміщення

За таких умов можна записати основні рівняння (3.1).

$$\begin{cases} E_{вп} = L_{я} \cdot \frac{di_{я}}{dt} + i_{я} \cdot R_{я} \\ J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M - M_c \end{cases}, \quad (3.1)$$

де: $E_{\text{ВП}} = U$ – електрорушійна сила перетворювача;

$i_{\text{я}}$ – значення струму в ланцюзі якорю;

$L_{\text{я}}$ – індуктивне значення якорю;

$R_{\text{я}}$ – значення опору якірного ланцюга;

ω – значення кутової швидкості обертання валу електродвигуна;

J – момент інерції системи;

$E_{\text{д}}$ - електрорушійна сила електричного двигуна, яку можна розрахувати за (3.2)

$$E_{\text{д}} = k \cdot \omega \cdot \Phi \quad (3.2)$$

Отже, приймаючи до уваги, що $\Phi = \text{const}$, можна позначити $c = k \cdot \Phi$, і тоді вираз (3.2) перетворюється на (3.3).

$$E_{\text{д}} = \omega \cdot c \quad (3.3)$$

Момент електродвигуна можна розрахувати за (3.3).

$$M = I \cdot k \cdot \Phi = I \cdot c \quad (3.4)$$

Значення статичного моменту електричного двигуна ($M_{\text{с}}$), можливо розрахувати за (3.5) [18].

$$M_{\text{с}} = k \cdot I_{\text{с}} \cdot \Phi = c \cdot I_{\text{с}} \quad (3.5)$$

Виконавши перетворення, тепер можливо отримати систему рівнянь, яка наведена на (3.6).

$$\begin{cases} U = i_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} + \omega \cdot c + L_{\text{я}} \cdot \frac{di_{\text{я}}}{dt} \\ i_{\text{д}} \cdot c = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + i_{\text{с}} \cdot c \end{cases} \quad (3.6)$$

Якщо застосувати перетворення Лапласу, і в той же час, виконати в рівняння (3.6) підстановку виразу $J = T_{\text{м}} \cdot c^2 \cdot R_{\text{я}}^{-1}$, можливо отримати систему рівнянь (3.7).

$$\begin{cases} U(p) - c \cdot \omega(p) = R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}(p) \cdot (T_{\text{я}} p + 1) \\ \omega(p) \cdot \frac{c \cdot T_{\text{м}}}{R_{\text{я}}} p = I_{\text{я}}(p) - I_{\text{с}}(p) \end{cases}, \quad (3.7)$$

де: $T_{\text{м}}$ – значення електромеханічної сталої часу;

$T_{\text{я}}$ – значення електромагнітної сталої часу.

Отже можна представити отриману систему в (3.7) у вигляді перетворення Лапласа (3.8).

$$\begin{cases} I_{\text{я}}(p) = \frac{(-c \cdot \omega(p) + U(p))}{(T_{\text{я}} p + 1) \cdot R_{\text{я}}} \\ \omega(p) = \frac{(I_{\text{я}}(p) - I_{\text{с}}(p)) \cdot R_{\text{я}}}{c \cdot T_{\text{м}} p} \end{cases} \quad (3.8)$$

Отже, тепер передатну функцію електричної частини електродвигуна можна представити у вигляді (3.9).

$$W_I(p) = \frac{I_{\text{я}}(p)}{-c \cdot \omega(p) + U_{\text{я}}(p)} = \frac{1}{(T_{\text{я}} p + 1) \cdot R_{\text{я}}} \quad (3.9)$$

В свою чергу, передатна функція механічної частини електричного двигуна представлена на (3.10).

$$W_{\omega}(p) = \frac{\omega(p)}{I_{\alpha}(p) - I_c(P)} = \frac{R_{\alpha}}{c \cdot T_M p} \quad (3.10)$$

Сама структурна схема досліджуваної системи представлена на рис. 3.3.

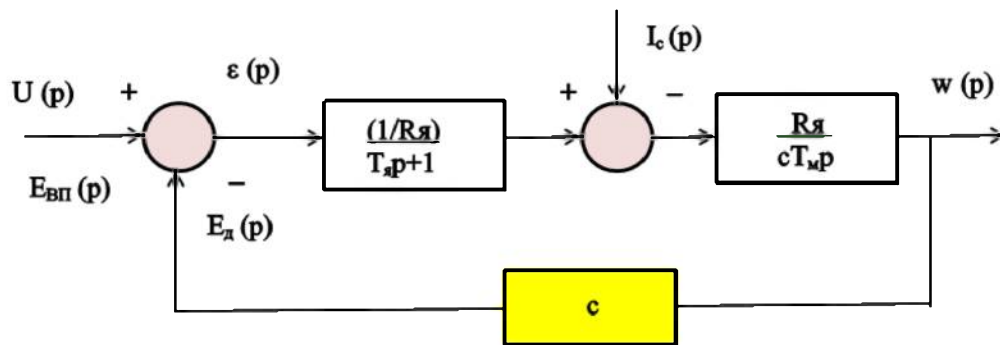


Рисунок 3.3 – Структурна схема електродвигуна постійного струму з незалежним збудженням

3.2 Обрання та розрахунок вентиляного перетворювача.

Вентильний перетворювач (ВП) представляє собою статичний перетворювач електричної енергії, який має призначення перетворювати постійний струм у змінний та навпаки. В системі, що досліджується він надає живлення якірному колу електродвигуна постійного струму [16,18].

Тиристорний перетворювач є дискретним, нелінійним, динамічним об'єктом з обмеженою характеристикою керованості. Однак, під час виконання аналізу необхідно прийняти той факт, що вентильний перетворювач є лінійною аперіодичною ланкою з передавальною функцією, як в (3.11). Головним чином через те, що час перехідних процесів в досліджуваній системі значно більший за період дискретності самого перетворювача.

$$W_{en}(p) = \frac{E_{en}(p)}{U_K(p)} = \frac{k_{en}}{1 + T_\mu p} \quad (3.11)$$

де: $E_{en}(p)$ – електрорушійна сила вентильного перетворювача;

k_{en} – коефіцієнт підсилення;

T_μ – стала часу вентильного перетворювача;

$U_K(p)$ – сигнал керування.

На рис. 3.4 наведена мат. модель вентильного перетворювача.

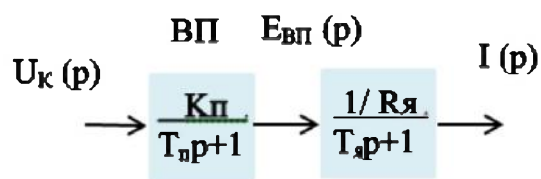


Рисунок 3.4 – Структурна схема вентильного перетворювача, який працює з якорем електродвигуна у режимі безперервного струму

3.3 Обрання та виконання давача струму.

Давач струму це пристрій, який дає можливість здійснювати зворотній зв'язок за значенням параметру струму та являє собою шунт, який ввімкнений у силовий ланцюг “електричний двигун – вентильний перетворювач” та давач, що підключений до нього. І тому цей пристрій є можливим реалізувати у вигляді пропорційної ланки $W_i(p) = K_i$. На рис. 3.5 наведена структурна схема давача струму.

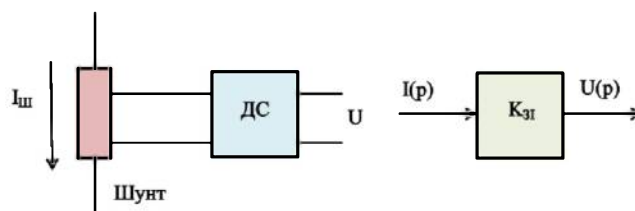


Рисунок 3.5 – Давач струму, структурна схема

Слід прийняти до уваги, що шунт необхідно підібрати в такий спосіб, щоб він пропускав максимально дозволений або граничний струм електродвигуна.

Розрахунок значення максимально дозволеного струму приведено у (3.12).

$$I_{\max} = 2.5 \cdot I_H = 50 \cdot 2.5 = 125 \text{ (A)} \quad (3.12)$$

Головне, що при цьому, значення коефіцієнту передачі за струмом, при зіставленні двох значень, задовольняє вимогам (3.13)

$$k_i \leq \frac{U_{\max}}{I_{\max}} \quad (3.13)$$

3.4 Виконання давача швидкості.

Для надходження, до оператора, інформації про стан параметру «поточна швидкість двигуна» потрібно, власне, мати давач швидкості. Собою він являє спеціальну електричну машину невеликої, відносно самого електроприводу, потужності, вихідне значення напруги, якої можливо знайти за (3.14).

$$U_{\text{вих}} = \omega \cdot \gamma \quad (3.14)$$

де: γ - значення коефіцієнту пропорційності.

На рис. 3.6 позначення блоку «ДН» – давач напруги, який здійснює потенціальну розв'язку вихідного та вхідного сигналів [13].

$$k_{\omega} = k_{\text{дїл.напруги}} \cdot k_{TG} \cdot k_{ДН} = \frac{U_{\max}}{\omega_{\text{ном}}} \quad (3.15)$$

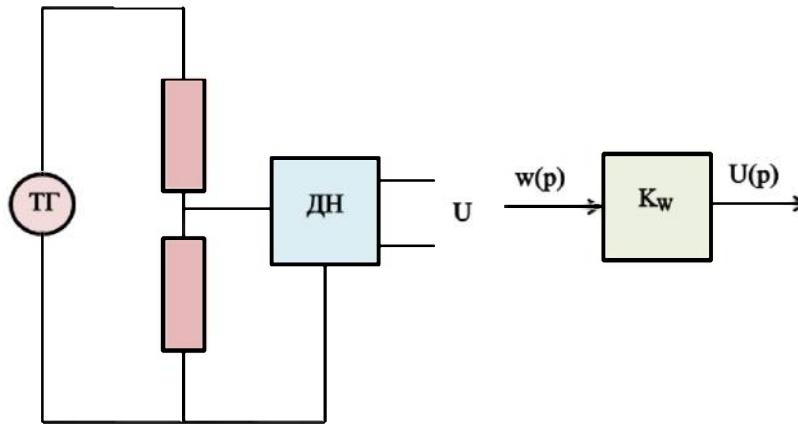


Рисунок 3.6 – Структурна схема вузла давача швидкості

Також під час застосування на виході тахогенератора фільтру, сам давач швидкості являє собою інерційну ланку з передатною функцією, що показана у виразі (3.16).

$$W_{\omega}(p) = \frac{k_{\omega}}{1 + T_{\omega}p}, \quad (3.16)$$

де: T_{ω} – це стала часу, яка виступає параметром інерційності фільтра (рис. 3.6), що на схемі знаходиться на виході боку тахогенератора та основним призначенням, якого є обмеження пульсацій значення вихідної напруги; k_{ω} – є передатним коефіцієнтом блоку давача швидкості.

3.5 Обрання давача інтенсивності.

Задавач інтенсивності (на схемі 3.10 «3І») призначений для формування потрібного закону зміни параметрів регулювання, в основному швидкості. Структурна схема давача інтенсивності являє з себе послідовно з'єднанні блоки обмеження. Блок з високим значенням коефіцієнту підсилення та регулюванням граничного значення вихідного сигналу інтегратора, що замкнений зворотнім зв'язком (3.17).

$$U_{3I} = \int_0^t \frac{U_0 dt}{T_{3I}} = \frac{t_p \cdot U_0}{T_{3I}}, \quad (3.17)$$

Виконання давачем інтенсивності свого завдання продемонстровано на характеристиці, рис. 3.7.

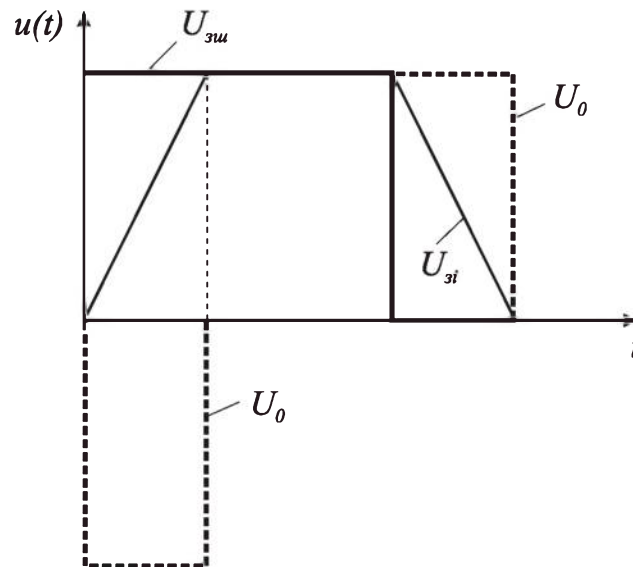


Рисунок 3.7 – Відпрацювання давача інтенсивності свого завдання

Структурну схему давача інтенсивності продемонстровано на рис. 3.8.

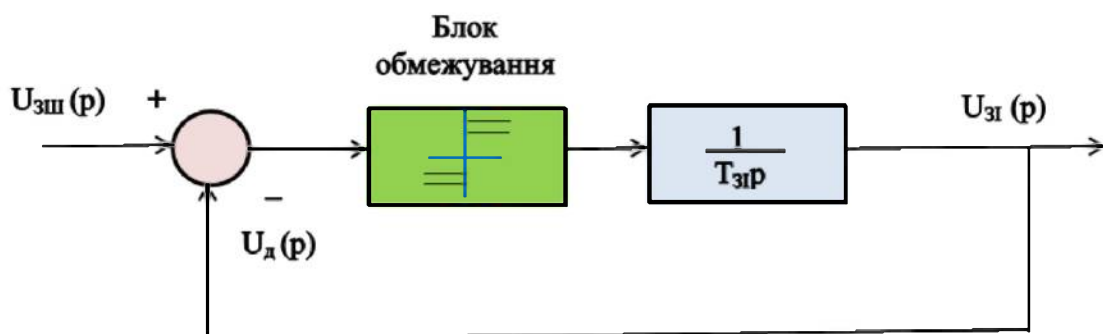


Рисунок 3.8 – Структурна схема давача інтенсивності

На рис. 3.8, показані наступні блок обмеження за граничними значеннями вхідного сигналу та інтегратор.

На рис. 3.9 представлена структурна схема системи «Вентильний перетворювач–електродвигун постійного струму».

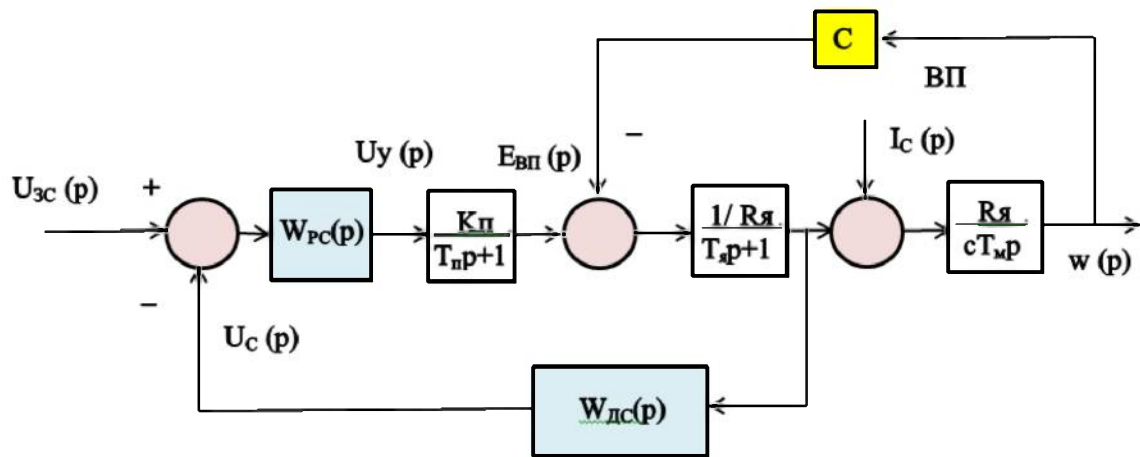


Рисунок 3.9 – Структурна схема системи вентильний перетворювач–електродвигун постійного струму

Дана схема (рис. 3.9) складова, внутрішня частина для двоконтурної автоматизованої системи управління, що наведена на рис. 3.10.

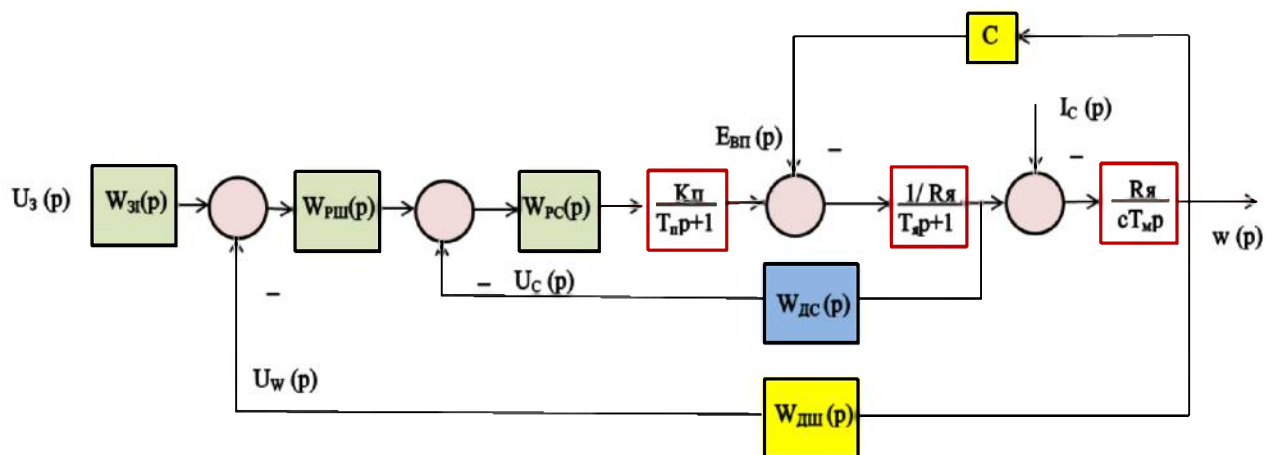


Рисунок 3.10 – Структурна схема підпорядкованого керування двох контурної системи.

4. СИНТЕЗ КОНТУРІВ РЕГУЛЮВАННЯ КОНТУРІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА

4.1 Синтез регулюючого контуру струму якоря електродвигуна.

Отже, для розгляду системи регулювання саме контуру струму необхідно з структурної схеми підпорядкованого керування (рис. 3.1) виділити внутрішній контур, який і є контуром струму, також треба зауважити, що цей контур розглядається без зустрічної електрорушійної сили двигуна. Даний контур після його виділення, виглядає, як показано на рис 4.1 [18].

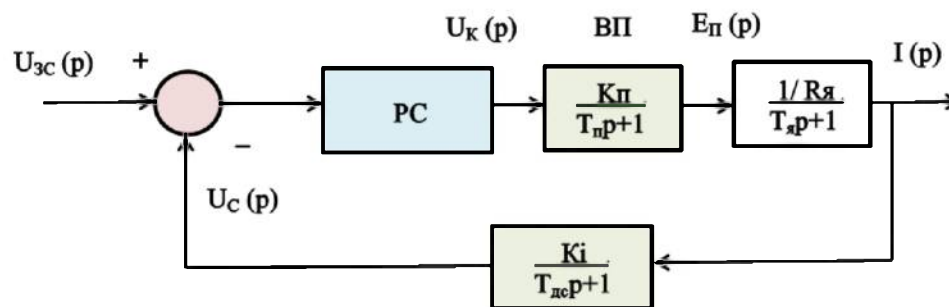


Рисунок 4.1 – Структурна схема контуру регулювання струму без блоку електрорушійної сили двигуна

Отже, з тих міркувань, що значення напруги (U_c) не може перевищувати граничного значення модулів напруги модулів уніфікованих блокових систем регулювання ($U_{dom} = 10V$), обираємо значення коефіцієнта зворотного зв'язку за струмом, як у (4.1)

$$k_i = \frac{U_{dom}}{I_{cm}} = \frac{8}{125} = 64 \cdot 10^{-3} \left[\frac{B}{A} \right] \quad (4.1)$$

А значення максимального струму «стопоріння» – $I_{cm} = 125 A$.

Тоді з рахуванням (4.1), передатна функція регулюючого об'єкту буде дорівнювати (4.2).

$$W_{обp}(p) = \frac{k_i \cdot k_{БП}}{(T_{я}p + 1) \cdot R_{я}}, \quad (4.2)$$

Слід обрати передатну функцію самого РС, при цьому вона повинна компенсувати велике значення сталої часу об'єкту, тому що параметр $T_{я} = 0.02(c)$, значно вищий за $T_{\mu} = 0.005c$. І звідси ця передатна функція буде дорівнювати (4.3).

$$W_{PC}(p) = \frac{1}{W_{об}(p)} \cdot \frac{1}{T_i p} = \frac{R_{я} \cdot (T_{я}p + 1)}{k_{БП} \cdot T_i p \cdot k_i}, \quad (4.3)$$

де T_i – це значення постійної часу інтегрування контуру регулювання струмом, коли він розімкнений.

З формули (4.3) можна побачити, що така передатна функція КРС за смисловим значенням відповідає пропорційно–інтегральному(ПІ) регулятору.

На (4.4) представлена передатна функція контуру регулювання струмом, коли він розімкнений, за керуючим впливом.

$$W_{KC}(p) = \frac{1}{(T_{\mu}p + 1) \cdot T_i p} \quad (4.4)$$

У виразі (4.5) представлена також передатна функція контуру регулювання струмом, проте у тому випадку, коли він же замкнений, також за керуючим впливом.

$$K_{KC}(p) = \frac{k_i^{-1}}{(T_{\mu}p + 1) \cdot T_i p + 1} \quad (4.5)$$

Тепер постає задача обрати значення сталої інтегрування (T_i) контуру з РС, коли він розімкнений, і тому налаштовуючи увесь контур на режим модульного оптимуму вибираємо наступні параметри (4.6).

$$T_i = T_\mu \cdot a_i = 5 \cdot 2.5 \cdot 10^{-3} = 12.5 \text{ мс}$$

$$a_i = \frac{T_I}{T_\mu} = 2.5, \quad (4.6)$$

Вже після цього можна вже значення T_i підставити в (4.3) і звідси отримати рівняння (4.7), це передатна функція розімкненої системи.

$$W_{KC}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_\mu p \cdot (T_\mu p + 1)} = \frac{1}{(0.005p + 1) \cdot 0.01p} \quad (4.7)$$

Вираз 4.8, відповідає передатній функції контуру РС замкненої системи.

$$K_{kc}(p) = \frac{1}{K_i \cdot (2 \cdot T_\mu^2 p^2 + 2T_\mu p + 1)} = \frac{15.63}{0.0005p^2 + 0.01p} \quad (4.8)$$

Після проведення розрахунків значень без врахування внутрішньої ЕРС електричного двигуна, тепер потрібно виконати аналіз і з його врахуванням.

І для цього, відповідно, потрібно знову виділити з загальної структурної схеми підпорядкованого регулювання, контур РС вже з урахуванням складової зустрічної електрорушійної сили електродвигуна, що наведено на рис 4.2.

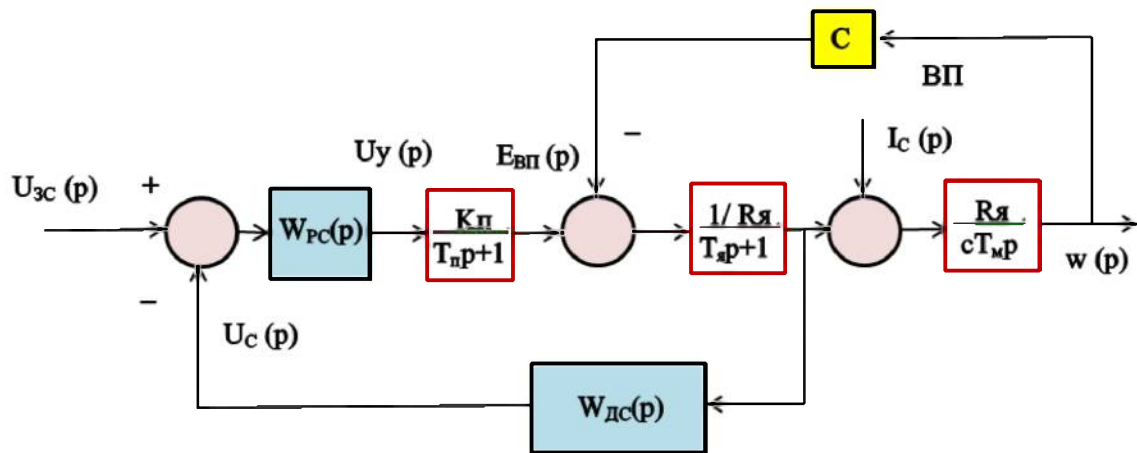


Рисунок 4.2 – Структурна схема контуру РС з урахуванням складової зустрічної електрорушійної сили електродвигуна

Для виконання аналізу цієї схеми, потрібно її перетворити до вигляду зручного для розрахунку, як на рис 4.2. Для цього були використані базові правила курсу «Теорії автоматичного керування» [18].

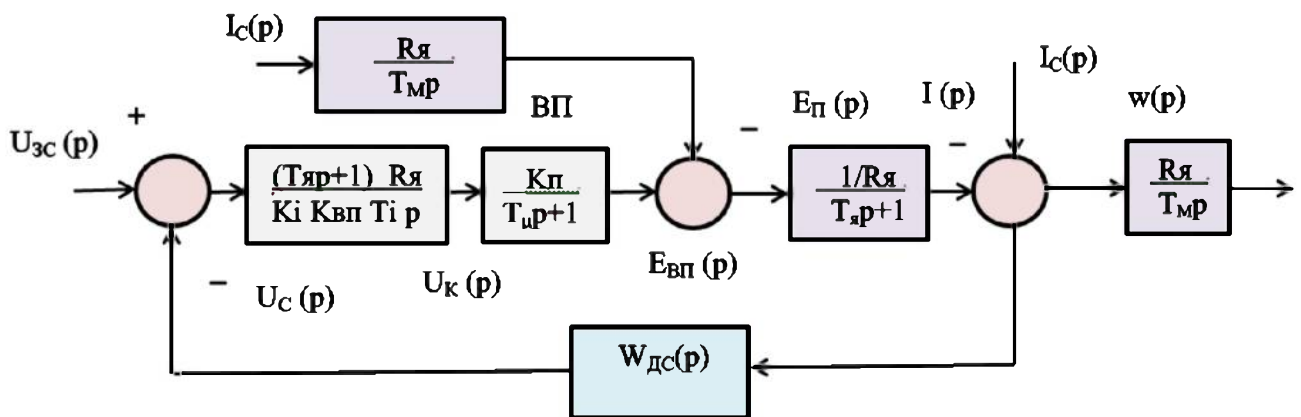


Рисунок 4.3 – Структурна схема контуру РС з урахуванням складової значення зустрічного ЕРС електродвигуна, у перетвореному вигляді

Для такої, перетвореної схеми, передатна функція контуру РС, який розімкнено, за керуючим впливом буде мати вигляд як на (4.9).

$$\begin{aligned}
W_{\kappa c}(p) &= \frac{R_{\text{я}} \cdot (T_{\text{я}}p + 1)}{k_i \cdot k_{\text{БП}} \cdot T_i p} \cdot \frac{T_M p}{R_{\text{я}}(T_{\text{я}}T_M p^2 + T_M p + 1)} \cdot \frac{k_{\text{БП}} \cdot k_i}{(T_{\mu}p + 1)} = \\
&= \frac{(T_{\text{я}} + 1) \cdot T_M}{(T_M \cdot T_{\text{я}}p^2 + T_M p + 1) \cdot T_i \cdot (T_{\mu}p + 1)} = \\
&= \frac{(0.02p + 1) \cdot 0.03}{(0.0006p^2 + 0.03p + 1) \cdot (0.005p + 1) \cdot 0.0125}
\end{aligned} \tag{4.9}$$

Зі схеми (рис 4.3) стає зрозуміло, що узгоджено з принципом суперпозиції, вид струму якоря виходить, як значення суми реакції контуру РС на вхідне завдання ($U_{\text{зс}}(p)$) та вплив за збуренням ($I_C(p)$) і з цього можна отримати вираз (4.10).

$$I(p) = K_i^I(p) \cdot I_C(p) + K_i(p) \cdot U_{\text{зс}}(p) \tag{4.10}$$

Тоді передатна функція за керуючим впливом, виражається в (4.11).

$$K_i(p) = \frac{I(p)}{U_{\text{зс}}(p)} = \frac{(T_{\text{я}}p + 1) \cdot T_M}{T_i k_i \cdot (T_{\text{я}} \cdot T_{\mu}p^2 + T_M p + 1)(T_{\mu}p + 1) + T_M \cdot (T_{\text{я}}p + 1)} \tag{4.11}$$

В той же час передатна функція за впливом збурення виглядає, як наведене рівняння у (4.12).

$$K_{i,IC}(p) = \frac{I(p)}{I_C(p)} = \frac{(T_{\mu}p + 1) \cdot T_i}{(T_{\text{я}} \cdot T_{\mu}p^2 + T_M p + 1) \cdot T_i \cdot (T_{\mu}p + 1) + T_M (T_{\text{я}}p + 1)} \tag{4.12}$$

Значення усталеного струму під час розгону електричного приводу можливо знайти за (4.13)

$$I_{\text{ycm}} = K_{i,IC}(0) \cdot I_C + K_i(0) \cdot U_{\text{зс}} = \frac{I_C \cdot T_i}{T_i + T_M} + \frac{T_M}{(T_i + T_M)} \cdot \frac{U_{\text{зс}}}{k_i} \tag{4.13}$$

Вплив внутрішньої компоненти зворотної електрорушійної сили двигуна виразився у тому, що струмовий контур став статичним, як за впливом керування, тому що інтегральна складова регулятора струму компенсує диференційною ланкою самого електродвигуна, так і за збуренням.

Було встановлено, що навіть під час відсутності навантаження усталений струм($I_{уст}$) різниться від заданого параметра в $\frac{T_M}{T_i + T_M}$ разів. Тому і вплив зустрічної електрорушійної сили на статичні властивості контуру РС буде знижуватися при зростанні відношення $-\frac{T_M}{T_i}$.

За даними проведених розрахунків були побудовані ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнених контурів регулювання РС, при першій побудові (рис 4.4(а)) ЕРС електродвигуна не враховувався, а при другій (рис 4.4(б)), цей вплив вже був врахованим [16,17].

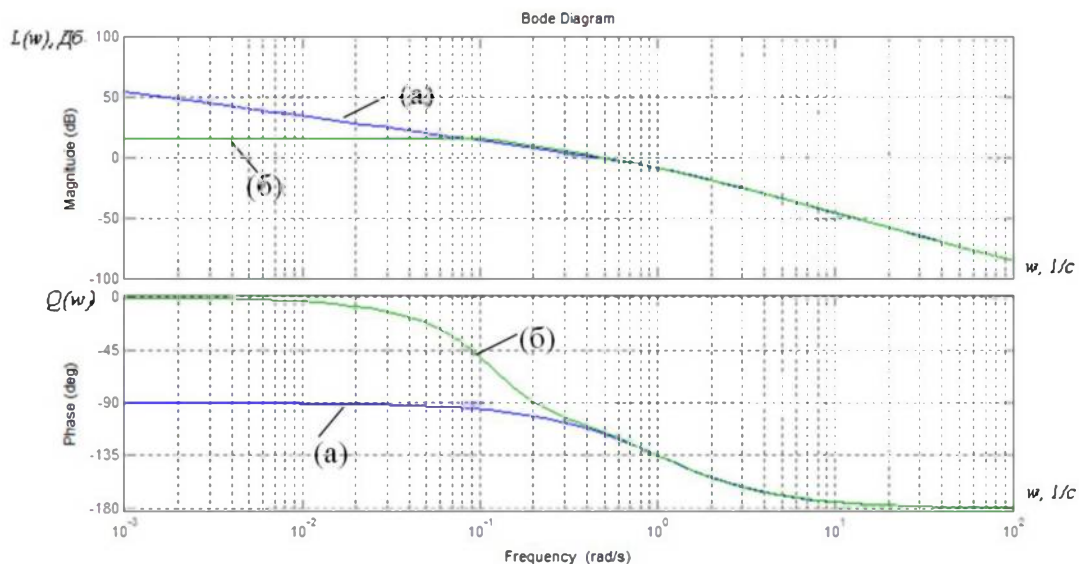


Рисунок 4.4 – Побудова ЛФЧХ та ЛАЧХ в пакеті Matlab розімкненого контуру регулювання струмом без урахування зворотної електрорушійної сили двигуна (а) та з її урахуванням (б)

Отже перехідна функція контуру РС з оптимізацією та без врахування зворотної електрорушійної сили машини буде мати вигляд (4.14)

$$h_c(t) = k_i^{-1} \left[1 - \frac{e^{-\frac{t}{2T_\mu}} \cdot \sin(\frac{t}{2T_\mu} + \frac{\pi}{4})}{\sin(\pi / 4)} \right] \quad (4.14)$$

Побудована функція рис. 4.5 має наступні показники якості:

– Показник пере регулювання (4.15)

$$\sigma = \frac{|h_m - h_{уст}|}{h_{уст}} \cdot 100 = \frac{|1.043 - 1|}{1} \cdot 100 = 4.3\% \quad (4.15)$$

– Час досягнення максимального значення: $t_M = 6,25 \cdot T_\mu$

– Час першого погодження з сталим значенням: $t_{cl} = 4,7 \cdot T_\mu$

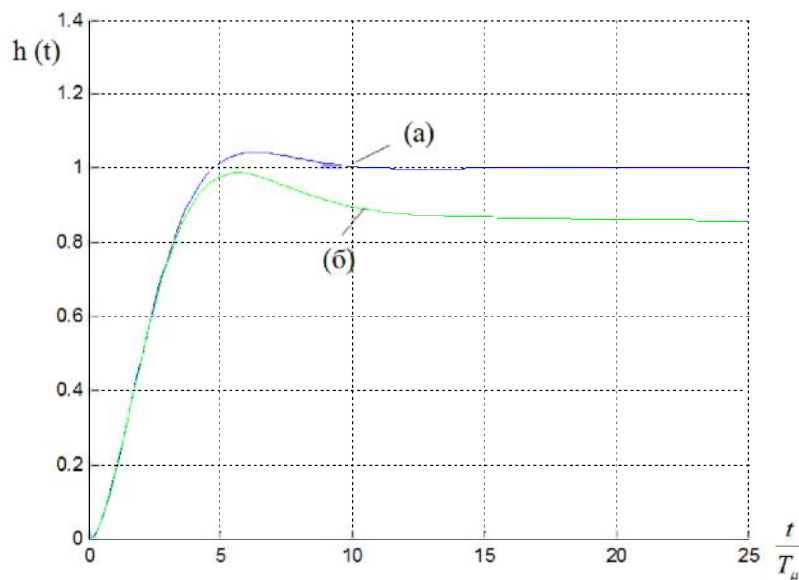


Рисунок 4.5 – Перехідні функції контуру РС без врахування електрорушійної сили двигуна (а) та з урахуванням цієї складової (б)

До підвищення значення параметру перерегулювання струму (σ), призводить значний вплив величини ЕРС у момент стрибка завдання, яке прикладене до контуру регулювання струмом.

Залежність $h_c(t)$, яка зображена на рис. 4.5, можна охарактеризувати наступними якісними показниками:

– Показник пере регулювання (4.16).

$$\sigma = \frac{|h_m - h_{уст}|}{h_{уст}} \cdot 100 = \frac{|1.0432 - 1|}{1} \cdot 100 = 4.32 \quad \% \quad (4.16)$$

– Часове значення першого узгодження з усталеною величиною (4.17)

$$t_{c1} = 4.7 \cdot T_\mu \quad (4.17)$$

– Часове значення під час досягнення амплітудної величини (4.18)

$$t_M = 6.35 \cdot T_\mu \quad (4.18)$$

4.2 Аналіз динаміки контуру РС із урахуванням зустрічної ЕРС електродвигуна.

Зворотна ЕРС впливає на процес в електричному приводі та викликає збільшення величини пере регулювання за струмом під час стрибку навантаження, що прикладене до об'єкту керування. Через те, що фізичні перехідні процеси не сильно відрізняються за значеннями від розрахункових,

тоді у випадку де параметр T_M перевищує у декілька разів T_γ впливом можливо знехтувати зворотною ЕРС, адже це буде на зрівняно малою величиною.

Якщо умова, яка описана вище, не виконується тоді у системі відбувається наступне – перехідні процесу у контурі РС будуть мати низьким значенням швидкодією, а також похибкою за швидкістю. Також низький показник швидкодії спостерігається і при розгоні та гальмуванні електродвигуна.

Однак, якщо виконувати збільшення значення коефіцієнту у П-частині регулятора швидкості, як це зазвичай робиться у подібних випадках, то це призведе тільки до зросту коливання самого перехідного процесу.

Тому, у випадку коли є перехід граничних значень параметрів електроприводу та його властивості динамічні не задовольняють початковим критеріям, необхідно виконувати компенсацію впливу на роботу системи зворотної електрорушійної сили двигуна.

Зображення перехідних процесів вже синтезованого контуру РС із урахуванням величини зворотної ЕРС електродвигуна були наведені на рис. 2.7 (б). Із аналізу цих даних виникає висновок, що у цьому випадку вплив в системі зворотної ЕРС необхідно врахувати, адже система відпрацьовує завдання з помилкою та не виходить на встановлене значення.

А динамічні характеристики цієї залежності будуть мати наступний вигляд:

Знаходження показника перерегулювання у системі наведено на (4.19).

$$\sigma = \frac{|h_m - h_{есм}|}{h_{есм}} \cdot 100 = \frac{|0.98 - 0.865|}{0.85} \cdot 100 = 14.8 \quad \% \quad (4.19)$$

Значення часу першого узгодження з усталеною величиною:

$$t_{e1} = 3.7 \cdot T_{\mu}$$

Значення часу досягнення максимальної величини: $t_M = 5.35 \cdot T_{\mu}$

Проаналізувавши декілька джерел [14,15,19], в яких визначаються методи компенсації величини зворотної електрорушійної сили, було вирішено, що найбільш оптимальним серед них є метод в якому забезпечується компенсація впливу у всіх режимах на характер перехідних процесів та відбувається застосування, ще й додаткового зворотного зв'язку за електрорушійною силою двигуна, він подається на вхід регулятора струму.

Потрібно звернути уваги, що така реалізація компенсації впливу пов'язана з певними перешкодами.

Такий метод можливо застосувати тільки для електроприводів у яких виконана компенсації самих двигунів. Проте це не є перешкодою, адже потреба у зниженні впливу електрорушійною сили з'являється у випадку малих значень T_M , а це переважно виникає в електроприводах з двигунами великої та середньої потужності, які й досліджується у даній роботі та виготовляються, з компенсаційною обмоткою.

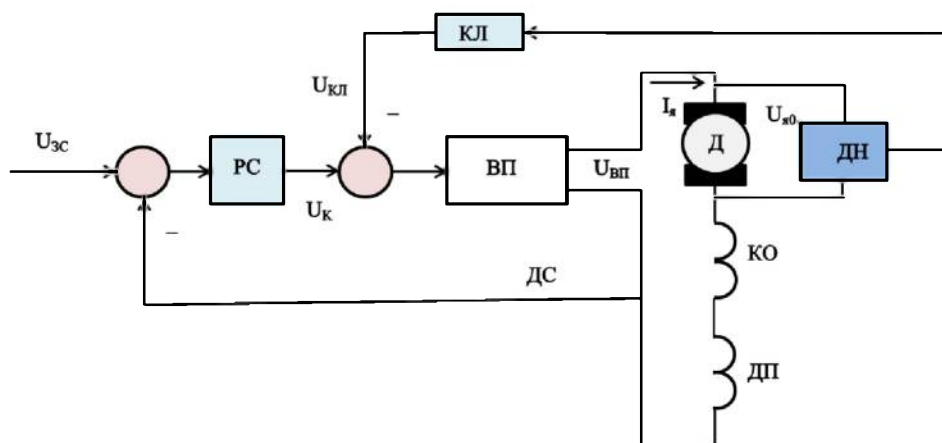


Рисунок 4.6 – Компенсація впливу величини зворотної ЕРС електродвигуна

Зображена на рис. 4.6 на функціональній схемі компенсаційна ланка [12,15], демонструє, як за допомогою зворотного зв'язку за величиною напруги якоря електродвигуна, можливо досягти бажаний результат.

За схемою видно, що передатна функція корегувальної ланки (на схемі, рис 4.6 – блок «КЛ»):

$$W_K(p) = 1 + T_{ВП} p, \quad (4.20)$$

де $T_{ВП}$ – еквівалентна стала часу вентильного перетворювача.

Тоді структурна схема прийме вигляд рис 4.7, адже з (4.20) зворотний зв'язок можливо згорнути до одного блоку, а об'єкт регулювання в свою чергу в новому контурі регулювання може бути представлений значенням опору та сталою часу, що показано у (4.21).

$$\begin{aligned} R'_я &= -R_{яО} + R_я \\ T'_я &= \frac{-L_{яО} + L_я}{R_я - R_{яО}} = \frac{R_я \cdot (1 - L_{яО}) \cdot T_я}{L_я \cdot (1 - R_{яО})} \end{aligned} \quad (4.21)$$

Тоді і передатна функція усього контуру регулювання струму, вже приймає вигляд (4.22)

$$W_{PC}(p) = \frac{R'_я \cdot (1 + T'_я p)}{k_i \cdot k_{ВП} \cdot T_i p} \quad (4.22)$$

При такій передатній функції відбувається ідеальна компенсація зворотної електрорушійної сили, а також перехідні процеси набувають режиму технічного оптимуму, як і за збуренням, так і за керуючим впливом.

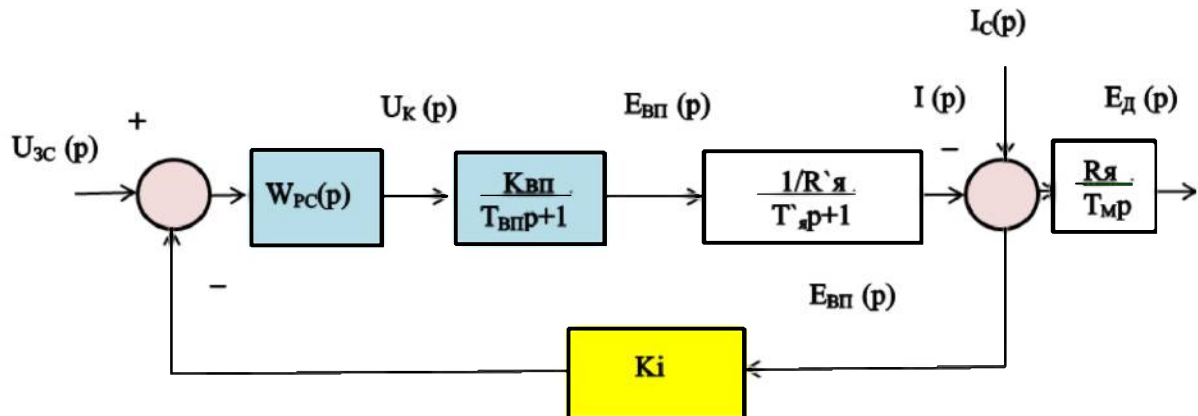


Рисунок 4.7 – Структурна схема компенсації впливу зворотної ЕРС електричного двигуна

Отже, при дослідженні та обранні даного методу в роботі, було доведено, що, якщо в систему, яка проектується, додати контур РС з інтегральною складовою, тоді величина зворотної електрорушійної сили вже не буде мати вплив на усталене значення струму. Цього й вимагає електричний привід в системі керування лопатями.

Такий спосіб уникнення впливу має свої переваги – і головним з них є те що він не потребує у вирішенні завдання ніякого вимірювальних приладів та датчиків.

Проте варто згадати і про недолік – введення в систему додаткового контуру РС призводить до зменшення значення швидкодії, через власну інертність, а це в свою чергу призводить до зменшення швидкодії електропривода в цілому.

Проте в системі, яка розглядається в даному дипломному проекті, за параметром швидкодії є певний запас, який застосування даного метода не перевищує. Головне в роботі – унеможливити помилки в регулюванні положенням, з чим розглянутий метод успішно справляється, отже його й було вирішено застосувати.

4.3 Реалізація спроектованого контуру РС з використанням операційного підсилювача

Пропонується реалізовувати регулятор струму, згідно з рекомендаціями [12], саме на найбільш масовій системі даного типу, якою є уніфікована блочна система регулювання. А основним вузлом такої системи є операційний підсилювач (ОП), зазвичай має він сигнал уніфікації значенням 10 (В), а струм при цьому 5 (мА), піл час використання ланок розв’язання є можливість придати йому різних характеристик у широкому діапазоні.

В попередньому розділі, було представлено та доведено переваги у застосуванні в контурі регулювання струмом ПІ-регулятора, тому його передатна функція на ОП буде мати вигляд (4.23)

$$W_{PC}(p) = \frac{(1 + T_{\text{Я}}p) \cdot R_{\text{Я}}}{T_i p \cdot k_{\text{БП}} \cdot k_i} \quad (4.23)$$

З передатною функцією (4.23) регулятор струму можливо реалізувати за схемою рис. 4.8.

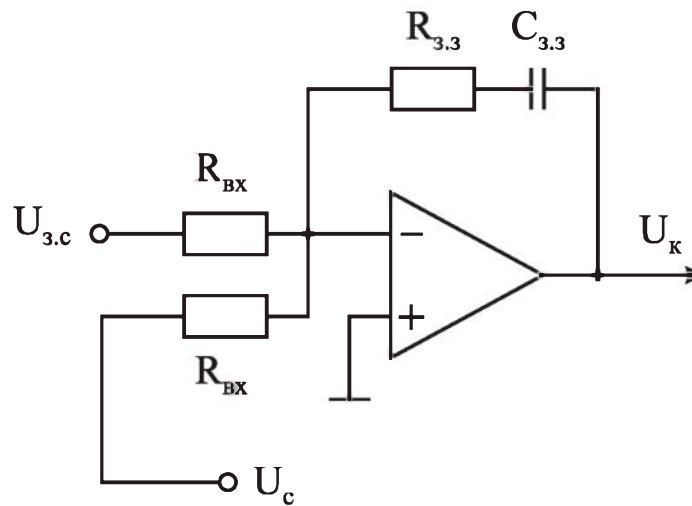


Рисунок 4.8 – Схема реалізації на операційному підсилювачі ПІ-регулятора струму

Як можна побачити, для системи з рис. 4.8, необхідно ще й мати значення усіх параметрів представлених схемі. Для реалізації необхідно обрати вхідний опір $R_{вх}$ у ланці зворотного зв'язку та каналу завдання рівними між собою. Тоді передатна функція РС в цих каналах має вигляд (4.24).

$$W_{оп.РС}(p) = \frac{1 + T_3 p}{T p}, \quad (4.24)$$

де: невідомими, виступають наступними значенням –

$$T_3 = C_{зз} \cdot R_{зз}; \quad T = C_{зз} \cdot R_{вх}$$

З цього можна одержити такі дані для підбору параметрів елементів схеми рис. 4.8

Значення конденсатору $C_{зз} = 10(\mu\text{кФ})$, а значення опорів, в свою чергу приймають вигляд та значення (4.25).

$$R_{ex} = \frac{k_{BP} \cdot k_i \cdot \frac{1}{R_J}}{\frac{1}{T_i} \cdot C_{3.3}} = \frac{0.0642 \cdot 25 \cdot 12.5 \cdot 10^{-3}}{0.5 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 4.25 \quad (\kappa Om) \quad (4.25)$$

$$R_{3.3} = \frac{T_J}{C_{3.3}} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-6}} = 2 \quad (\kappa Om)$$

Для виконання умови стійкості у роботі ОП варто інтегрувати корегувальні зв'язки різного роду, що, в свою чергу, виконують обмеження частоти та його пропускну здатності. Через це ідеалізовані передатні функції регуляторів трохи відрізняються від реальних. Тому ідеалізовані регулятори необхідно скорегувати для того, щоб врахувати вище зазначені обставини. У проаналізованих системах [18], було показано, що необхідно ввести додаткову величину інерційності, яка буде враховувати час на виконання операцій згідно з «законами регулювання». Значення такого коефіцієнту грає роль за аналогією передатним функціям, що були отримані в роботі раніше, де відбувалось множення самих передатних функцій на ПФ аперіодичної ланки зі сталою часу. І ось саме ця величина (стала часу) і несе в собі функцію інерційності процесів ОП, а її значення залежить, відповідно, до серії та типу уніфікованих пристроїв у [16] є вказівка, що це, зазвичай, часові межі від 0.02–0.05 (мс) до 2–3 (мс).

4.4 Аналіз та синтез контуру регулювання швидкості.

Для виконання інтегрувальної системи потрібна наявність ще одного інтегратора у контурі РШ, тому що один вже встановлений у об'єкті регулювання. Тоді передатна функція регулятора швидкості буде мати вигляд (4.26)

$$W_{PШ}(p) = \frac{c \cdot K_i \cdot T_M}{R_{я} \cdot T_{ш} \cdot k_{ш}}; \quad (4.26)$$

де $T_{Ш} = 0.4 \cdot T_{\mu} = C_1$ – значення сталої інтегрування контуру регулювання швидкості, якій розімкнено.

А тоді з врахуванням виразу (4.25) контур РШ має вигляд, який наведено на рис. 4.9.

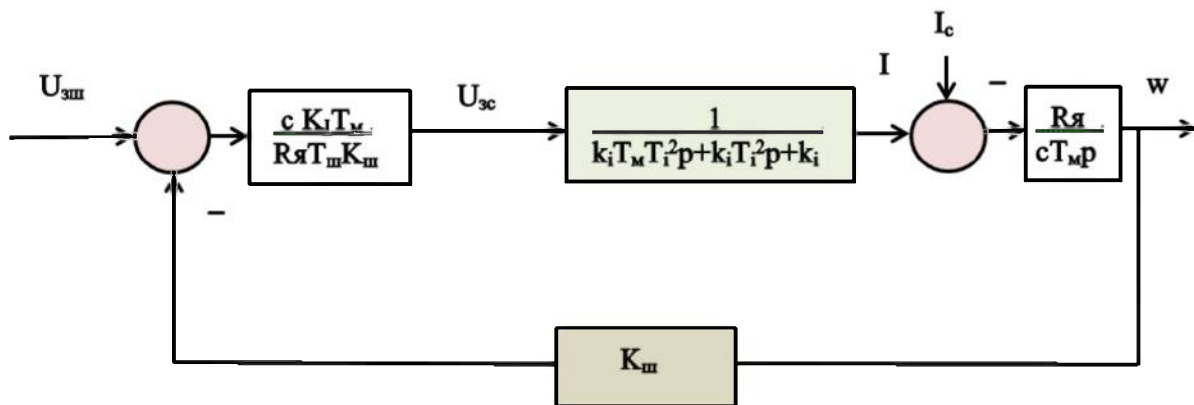


Рисунок 4.9 – Структурна схема для розрахунку контуру регулювання швидкості

Тож тепер потрібно зробити аналіз динаміки КРШ, для цього необхідно передатну функцію контуру РШ (4.27), який розімкнений.

$$W_{PШ}(p) = \frac{1}{(T_i T_{\mu} p^2 + 1 + T_i p) \cdot T_{Ш} p} \quad (4.27)$$

Для регулятора швидкості була побудована ЛАЧХ з передатною функцією, результати представлені на рис. 4.10. Тут можна побачити те, що середньо частотна ЛАЧХ вимогам не задовольняє. Тож варто змінити РШ так, щоб передавальна функція виглядала:

$$W_{PII3}(p) = \frac{(1 + T_2 p)}{R_{\pi} \cdot T_{II} \cdot k_{\omega}} \cdot \frac{K_i \cdot T_M \cdot c}{(1 + T_1 p)} \quad (4.28)$$

У виразі (4.28) значення сталі часу T_1 та T_{II} можна знайти за методом максимального резонансного.

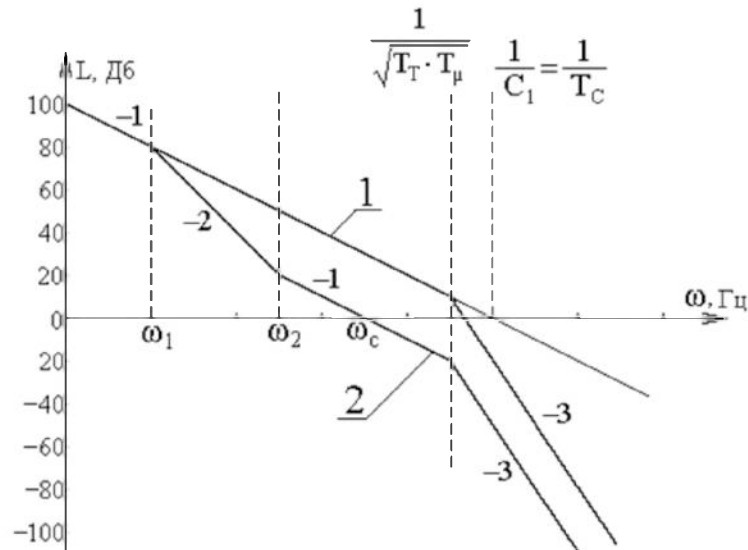


Рисунок 4.10 – ЛАЧХ для контуру регулятора швидкості, що розімкнено (1 – діюча ЛАЧХ, 2- необхідна ЛАЧХ)

Оскільки $T_{\omega}=0$, тоді передатна функція регулятора швидкості виглядає наступним чином:

$$K_{\omega} = \frac{U_{\max}}{\omega_{\max}} = \frac{8}{55} = 0.145 \quad B \cdot c \quad (4.29)$$

$$\omega_{\max} = \frac{U_H}{c} = \frac{220}{4.4} = 50 \quad \frac{1}{c},$$

де: K_{ω} – значення коефіцієнту зворотного зв'язку за швидкістю.

Також вже можна розрахувати параметр частоти зрізу (ω_c) за (4.30)

$$\omega_c = \frac{\Sigma T_n \cdot \omega_c}{T_i} = \frac{1}{2.22 \cdot 10^{-3} \cdot 12.5} = 35,85 \frac{1}{c} \quad (4.30)$$

Та розрахувати значення $\Sigma \omega_n$, а після цього і сталі часу вже є можливість знайти, весь процес математичного знаходження значень приведений в ДОДАТКУ Г.

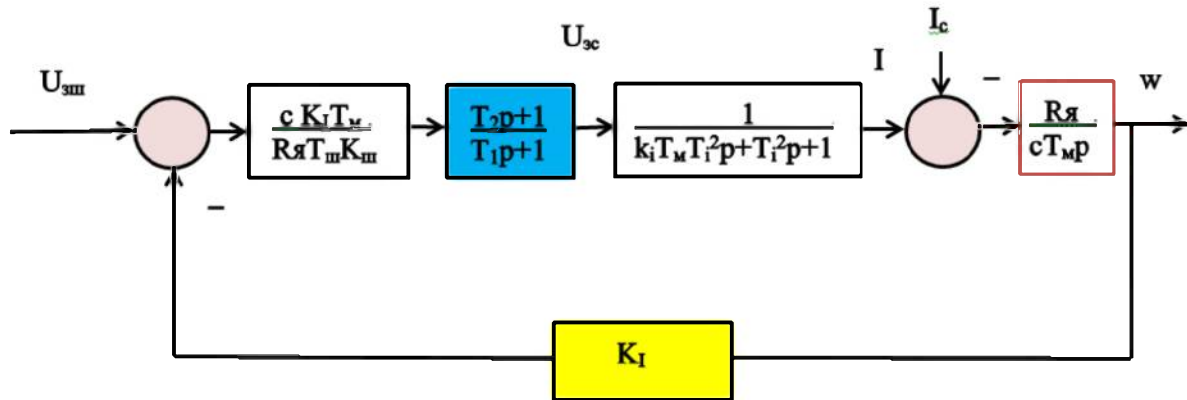


Рисунок 4.11 – Структурна схема для розрахунку контуру РШ з зворотнім зв'язком за швидкістю без інерції

За аналогією визначаються параметри і при ненульовому значенні T_w . Передатна функція контуру РШ, який розімкнений, у цих умовах, буде мати вигляд (4.31).

$$W_{\text{РШ2}}(p) = \frac{c \cdot K_I \cdot T_m}{R_{\text{я}} \cdot k_{\omega} \cdot T_c} \cdot \frac{1 + T_2 p}{1 + T_1 p} \cdot \frac{1}{T_{\omega} p + 1}, \quad (4.31)$$

де значення сталих часу інерційності контуру регулювання швидкості будуть мати значення $T_{\omega} = T_{\mu} \cdot 2 = 10 \text{ мс}$.

Тепер, за аналогією з попереднім розділом, можливо визначити параметри T_1 і T_2 (4.32) використовуючи метод максимального резонансу для випадку зворотного зв'язку за швидкістю з інерцією.

$$\Sigma T_{\Pi} = T_{\omega} + T_I = (12.5 + 10) \cdot 10^{-3} = 22.5 \text{ мс} \quad (4.32)$$

Підрахунки значень $\Sigma\omega_{\Pi}$ та ω_c , аби не нагромаджувати основний текст роботи, були також поміщені у (ДОДАТОК Г).

Закінчивши аналіз перехідних процесів у контурі регулювання швидкості було вирішено на основі отриманих значень у математичному пакеті Matlab побудувати, за аналогією із контуром регулювання струмом ЛАЧХ (рис. 4.12) для двох раніше розглянутих випадків, коли $T_{\omega}=0$ та $T_{\omega}\neq 0$.

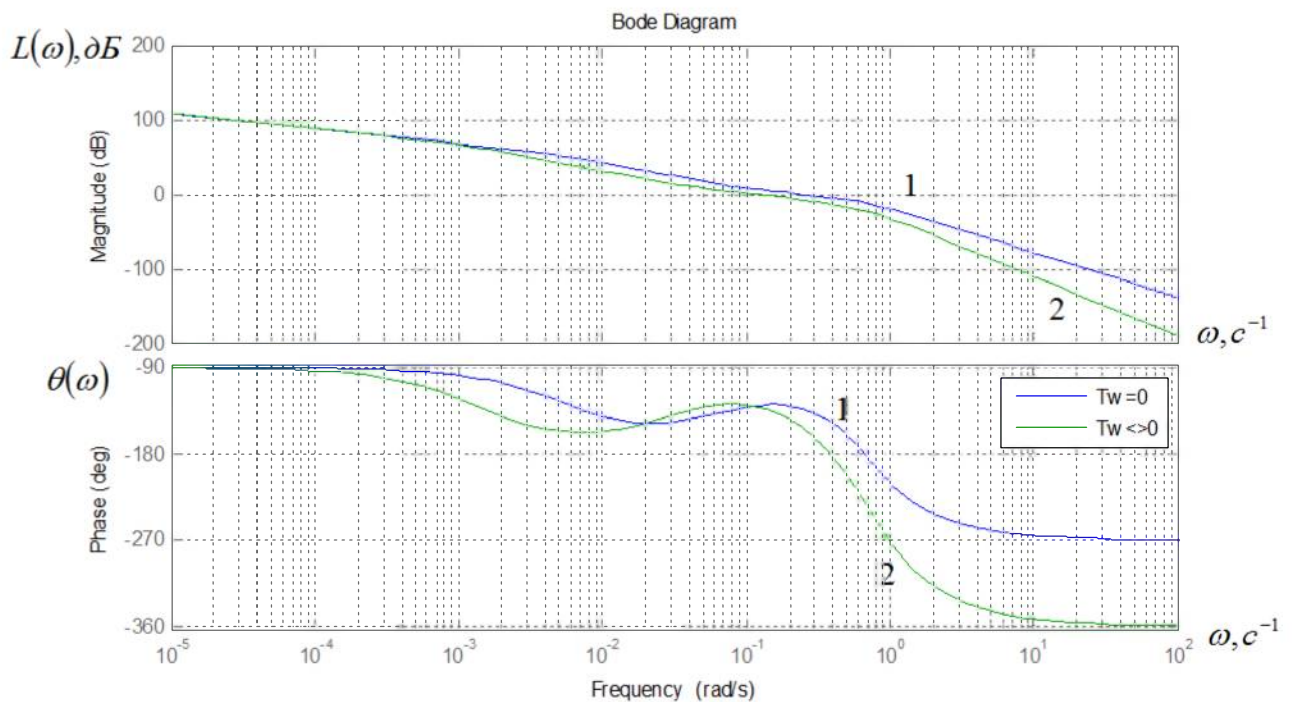


Рисунок 4.12 – Дійсні ЛАЧХ контуру регулювання швидкості контуру, що розімкнено

Якщо проаналізувати протікання в контурі РШ перехідних процесів (рис. 4.13) то можна зробити висновок, що присутність зворотної інерційної складової може призвести до зростання часу перехідного процесу, тому потрібно більший запас часу для проведення розгону електродвигуна, до усталеного значення швидкості.

Також варто відзначити, що присутність інерційного зв'язку у зворотній ланці на астатизм всієї системи за керуючим збуренням не впливає. Це означає, що під час режиму $T_{\omega}=0$ так і при $T_{\omega}\neq 0$ регулюючий контур за струмом

залишається астатичного порядку другого роду за дією керування та буде без наявної похибки відпрацьовувати лінійно наростаючий та стрибковий вхідний сигнал.

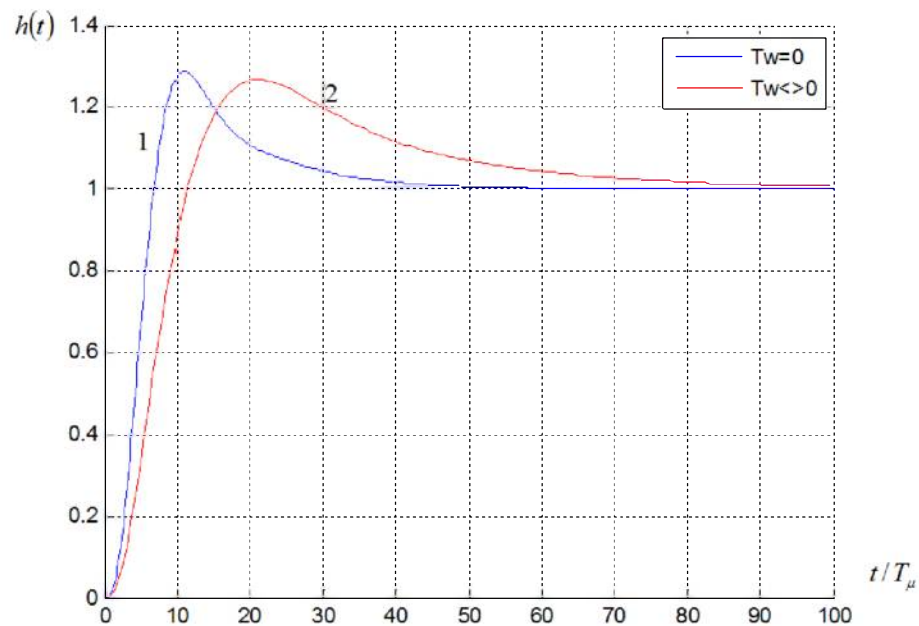


Рисунок 4.13 – Графіки переходних процесів в контурі регулювання швидкості, побудовані за допомогою математичного пакету Matlab

Аналізуючи переходні функції рис. 4.13 $h_c(t)$ (під час виконання умови $T_\omega=0$, графік 1) може характеризуватися наступними якісними показниками:

– Показник перерегулювання:

$$\sigma = \frac{|h_{уст} - h_{\max}|}{h_{уст}} \cdot 100\% = \frac{|1 - 1.295|}{1} \cdot 100\% = 29.5\%$$

– Час першого узгодження:

$$t_{yз1} = 6.75 \cdot T_\mu = 6.75 \cdot 0.005 = 34(\text{мс})$$

А функція $h_c(t)$ (під час виконання умови $T_\omega \neq 0$, графік 2) може характеризуватися наступними якісними показниками:

– Показник перерегулювання

$$\sigma = \frac{|h_{уст} - h_{\max}|}{h_{уст}} \cdot 100\% = \frac{|1 - 1.255|}{1} \cdot 100\% = 25.5\%$$

– Час першого узгодження:

$$t_{y31} = 11.45 \cdot T_{\mu} = 11.45 \cdot 0.005 = 58(\text{мс})$$

4.5 Реалізація спроектованого контуру РШ з використанням операційного підсилювача.

Як і під час дослідження контуру регулювання струмом, не можна оминати увагою, такий важливий аспект, як реалізацію контуру РШ за допомогою операційних підсилювачів

Тож, регулятор швидкості, має передатну функцію, яку вже було наведено у виразі (4.26), тому його є можливим реалізувати за структурною схемою рис. 4.14.

Тоді вже передатна функція такого регулятора буде мати вигляд (4.33).

$$W_{PШ}(p) = \frac{(R_1 + R_2) \cdot (\lambda \cdot p + \frac{1}{T})}{(R \cdot p + \frac{R}{T})}, \quad (4.33)$$

де: – стала часу та коефіцієнт вхідного опору можуть бути визначені за виразом:

$$\begin{aligned} T &= C \cdot R_1 \\ \lambda &= \frac{1}{\frac{R_1}{R_2} + 1} \end{aligned} \quad (4.34)$$

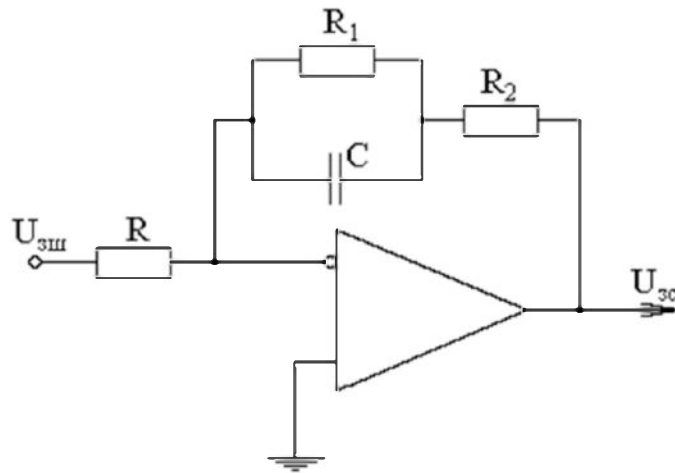


Рисунок 4.14 – Реалізація контру РШ на операційних підсилювачах

Тепер необхідно визначити значення усіх параметрів схеми рис 4.14, як і для контуру РШ, необхідно для початку задатися $C=20$ (мкФ). Для приведення РШ необхідно виконувати наступні умови (4.35).

$$\left\{ \begin{array}{l} T = T_1 \\ T_2 = \lambda \cdot T \\ R = \frac{R_{\text{я}} \cdot K_{\omega} \cdot T_c \cdot (K_I)^{-1}}{T_M \cdot c \cdot (R_1 + R_2)^{-1}} \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} T_1 = C \cdot R_1 \\ T_2 = \frac{T_1}{\frac{R_1}{R_2} + 1} \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} R_1 = \frac{T_1}{C} = 23.8(\kappa O M) \\ R_2 = \frac{R_1}{\left(\frac{T_1}{T_2} - 1 \right)} = 0.5 \\ R = 4.61(\kappa O M) \end{array} \right. \quad (4.35)$$

Під час виконання аналізу динамічної роботи спроектованої системи підпорядкованого регулювання від давача інтенсивності, було вирішено знову вдатися до моделювання в пакеті Matlab. Після цього були отримані з осцилографів характеристики перехідних процесів $\omega(t)$, $I(t)$, $U_{зи}(t)$, від моменту пуску до виходу на усталене значення.

Отже перший випадок моделювання відбувся, коли значення сталої часу (T_{ω}) та струму стопоріння звернені до нуля. За цих умов графік моделювання наведений на рис.4.15. Значення по обох осях вимірюється у відносних одиницях.

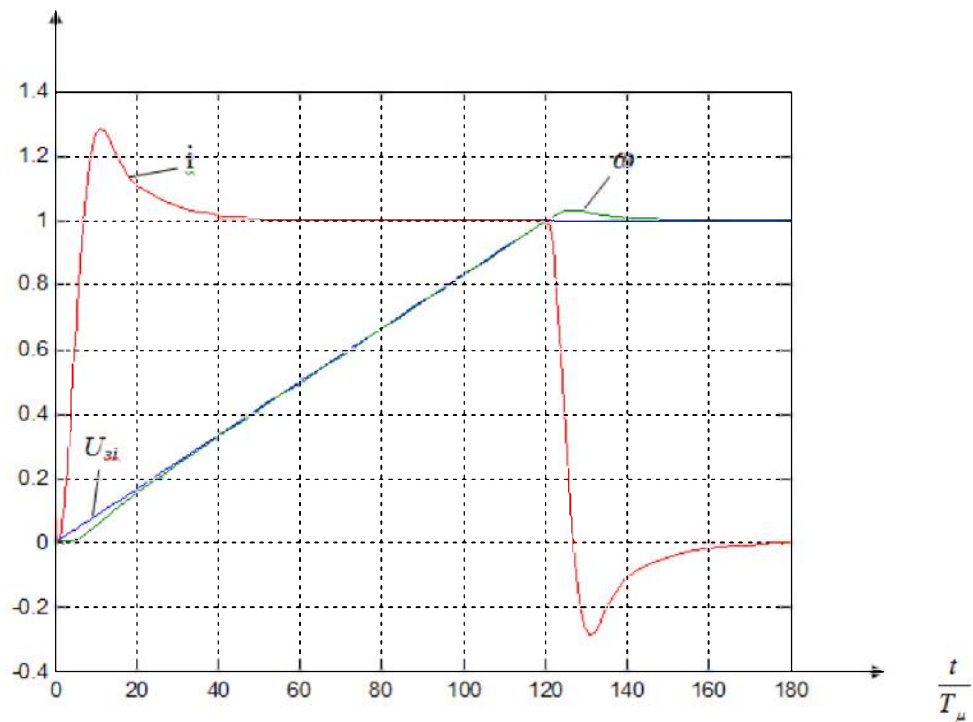


Рисунок 4.15 – Відпрацювання системи ПР від нульового значення T_ω та I_c

Варто відзначити динамічні характеристики за значенням струму під час пуску без навантаження:

– Показник перерегулювання

$$\sigma = \frac{|h_m - h_{уст}|}{h_{уст}} \cdot 100 = \frac{|1.285 - 1|}{1} \cdot 100 = 28.5 \quad \%$$

– Час першого узгодження та досягнення максимуму:

$$t_{уз1} = 6.82 \cdot T_\mu = 6.82 \cdot 0.005 = 34.25 \text{ (мс)}$$

$$t_{макс} = 10.88 \cdot T_\mu = 10.88 \cdot 0.005 = 54.75 \text{ (мс)}$$

Другий випадок моделювання відбувався, при значеннях $T_\omega \neq 0$, $I_c = 0$. За цих умов графік моделювання наведений на рис.4.16. Значення по обох осях також вимірюється у відносних одиницях.

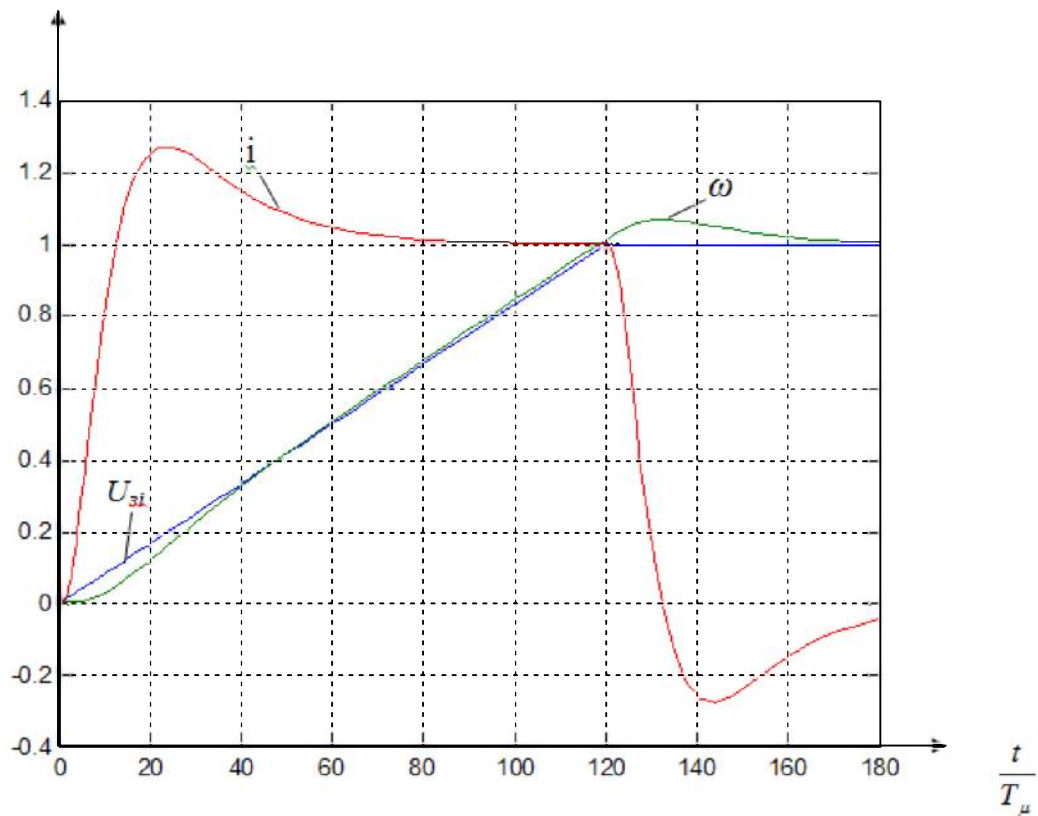


Рисунок 4.16 – Відпрацювання системи ПР при $I_c=0$ та $T_\omega=0$

І для цього випадку були враховані характеристики динамічної складової:

– Показник перерегулювання

$$\sigma = \frac{|h_{\max} - h_{\text{уст}}|}{h_{\text{уст}}} \cdot 100 = \frac{1.269 - 1}{1} \cdot 100 = 26.9 \quad \%$$

– Час першого узгодження та досягнення максимуму:

$$t_{\text{узл}} = 12.89 \cdot T_\mu = 61.45 \text{ (мс)}$$

$$t_{\text{макс}} = 24.75 \cdot T_\mu = 123.75 \text{ (мс)}$$

У третьому досліді вже обидві величини дослідних параметрів були ненульовими: $I_c = 0.5I_n, T_\omega \neq 0$. Вже ці умови дають графік моделювання, який представлений на рис.4.17. Значення по обох осях, як і в інших дослідіх вимірюється у відносних одиницях.

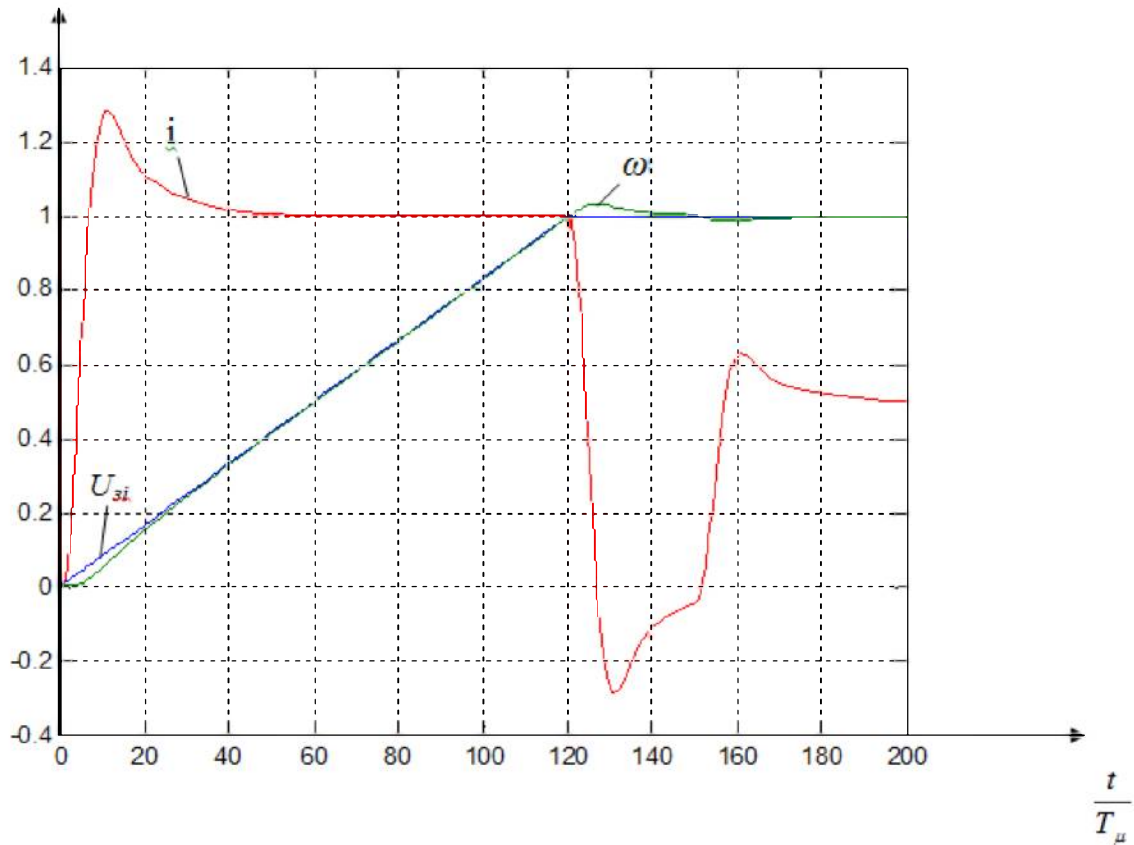


Рисунок 4.17 – Відпрацювання системи ПР при $I_c = 0.5I_n, T_\omega \neq 0$

Як можна побачити при порівнянні рис 4.17 та рис. 4.15, саме у пусковому режимі, характеристики обох дослідів однакові, а отже для цього випадку характеристики динамічної складової будуть теж однакові з першим дослідом. Це можна пояснити компенсацією через ненульовий струм стопоріння. Проте, варто звернути увагу, що робота в усталеному режимі у двох дослідіх моделювання різна. Для ненульових значень – просадка за струмом є більшою, до того ж випадку, коли електричний двигун вийшов на усталений режим протікає ненульовий струм.

4.6 Аналіз та синтез контуру регулювання положенням. Виконання моделювання.

Контур положення розраховується за аналогією з контуром швидкості, рис. 4.18. Структурна схема представлена на рис. 4.18

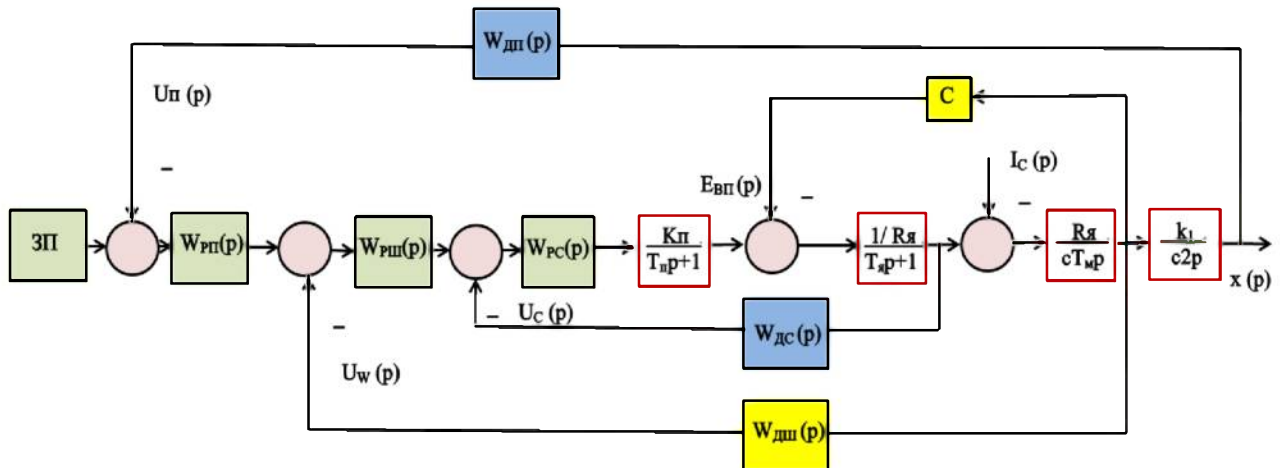


Рисунок 4.18 – Структурна схема регулювання за положенням електричного двигуна

Після побудови основної системи було вирішено також перевірити роботу в спроектованій системі спостерігачів стану. Для цього, в кожний контур за регулюванням своєї координати були поміщені відповідні спостерігачі стану, звичайно, попередньо розраховані за [19].

У контурі регулювання положення було вирішено дослідити і роботу П регулятора і ПІ регулятора. Адже, як було зазначено в [14, 18], можливо досягти показників перехідних процесів, під час використання П регулятора положення таких, як і ПІ, за умови, що у першу систему буде встановлено спостерігачі стану.

Розглянемо розрахунок коефіцієнтів корекції стану спостерігача знаходимо з урахуванням його характеристичного полінома:

$$P(z) = z^3 + z^2 \cdot p_2 + z \cdot p_1 + p_0, \quad (4.36)$$

де: значення коефіцієнтів з рівняння (4.36) дорівнює $p_0 = 2 \cdot h_3 + \frac{h_2 \cdot T}{2} - 1$,

$$p_1 = -4 \cdot h_3 + \frac{k_m \cdot h_1 \cdot T}{2} - 3, \quad p_2 = 2 \cdot h_3 + \frac{h_2 \cdot T}{2} - \frac{h_1 \cdot T \cdot k_m}{2} - 3,$$

З умов процесу кінцевої тривалості з максимальною швидкістю, тобто під час, коли $p_2 = p_1 = p_0 = 0$, шляхом застосування прикладного пакету Mathcad15, можна отримати (4.37).

$$\begin{aligned} h_i &= \frac{7}{8} \\ h_w &= \frac{3}{T \cdot 2} \\ h_\sigma &= \frac{-1}{k_m \cdot T}, \end{aligned} \quad (4.36)$$

де: - h_i , h_w , h_σ – коефіцієнти спостерігачів стану відповідної координати положення, швидкості, струму.

Тоді коефіцієнт передатної ланки в контурі положення, можна розрахувати за (4.37).

$$K_{PI}(p) = \frac{(df^2 - 2 \cdot df + 1)}{(kf_1 + 3 \cdot kf_2 + df \cdot kf_1 - df \cdot kf_2) \cdot kfm}, \quad (4.37)$$

де: – kf_1 , kf_2 , df є параметрами, які відображають зв'язок середніх величин електричного двигуна та ідентифікованого спостерігачу, із завданням струму двигуна.

Модель досліджуваної системи (рис. 4.18), була зібрана у пакеті Matlab, що й показано на рис. 4.19.

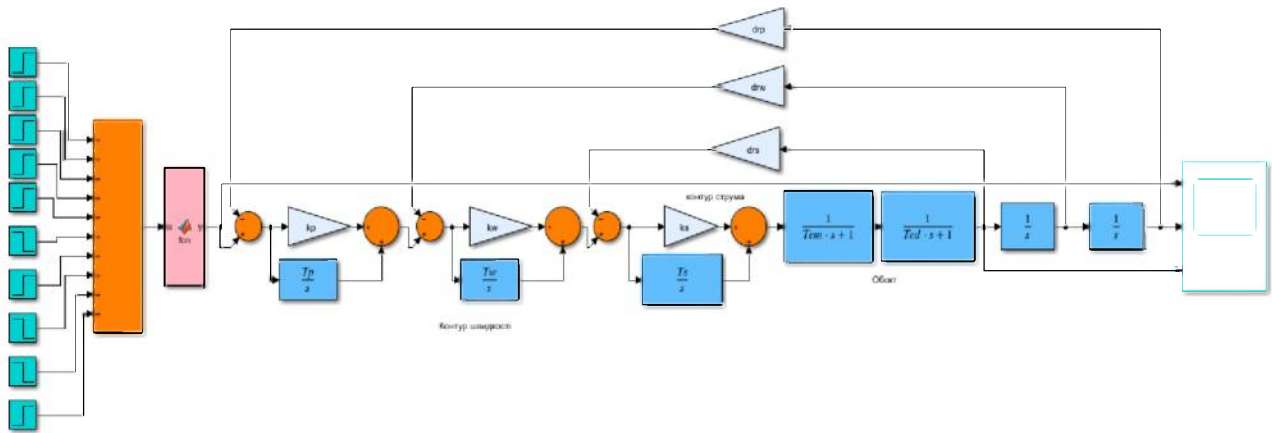


Рисунок 4.19 – Система підпорядкованого регулювання керування лопатями вітрогенератора

В той же час при моделюванні перехідних процесів у багатоконтурній системі регулювання за положенням були отримані характеристики (рис. 4.19). Тут наведені і струмові характеристики самого вітрогенератора і регулювання його лопатей за положенням та коефіцієнт використання потужності в ідеальному випадку без інерційності системі (σ_{Π}) та у спроектованій системі ($\sigma_{\text{Д}}$). Як можна побачити під час невеликих змін вітру, система має високий коефіцієнт використання (в межах 96-98%) максимальної потужності при відповідних погодних умовах (швидкості вітру). Якщо ж швидкість змінюється швидко, тоді значення використання потужності зменшується. Під час зниження швидкості вітру можна побачити, що функція ($\sigma_{\text{Д}}$) вища за (σ_{Π}), однак це не означає, що значення коефіцієнту стає більшим за одиницю (що не можливо), такий графік відповідає номінальному значенню. Адже, як було розглянуто ще у першому розділі, під час швидкості вітру 13-15 м/с вітрогенератор виходить на свою номінальну потужність і вже більше за це значенню при будь-якому підвищенні швидкості вже не буде.

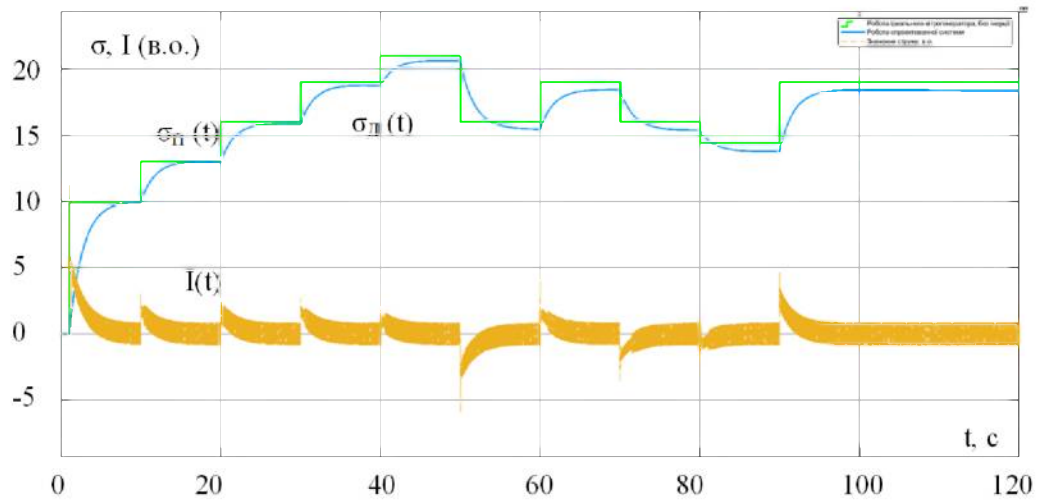


Рисунок 4.20 – Перехідні процеси в багатоконтурній системі регулювання за положенням

У той же час і була зібрана модель самого вітрогенератора та промодельована у пакеті Matlab (рис. 4.21).

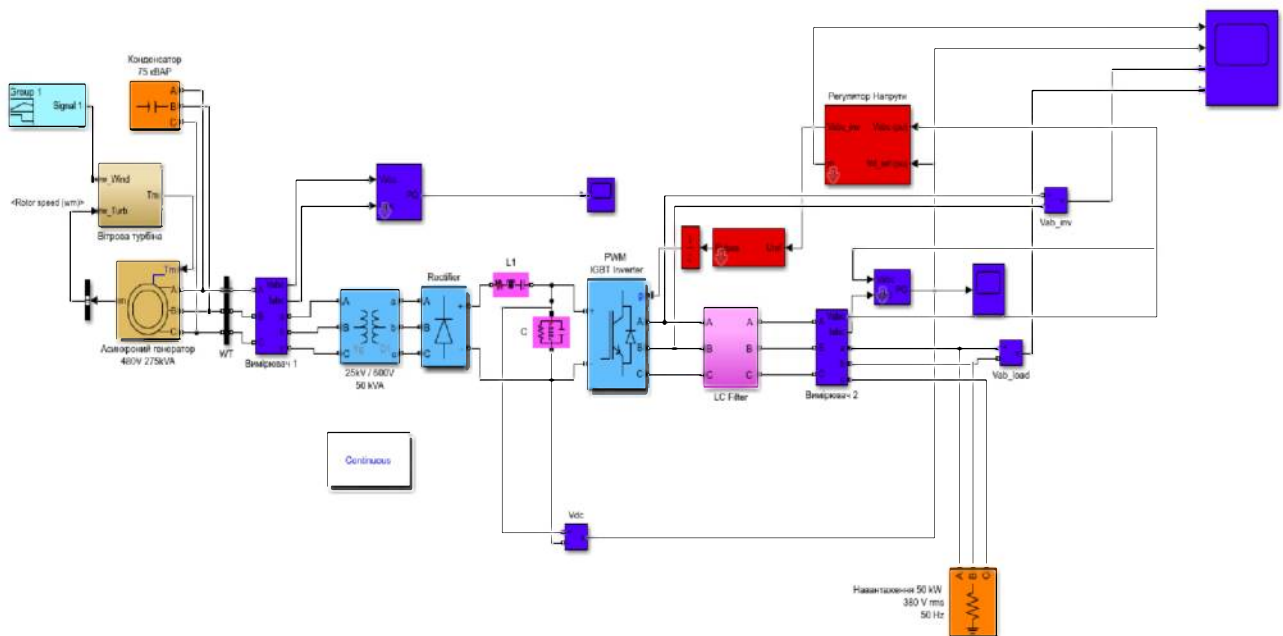


Рисунок 4.21 – Моделювання роботи від етапу генерації вітрогенератором електричної енергії до її передавання та споживання електрообладнанням

І на останок, схему регулювання координат електроприводу(рис. 4.20.), було доповнено спостерігачами стану, а також в контурі регулювання

швидкості, як і зазначалось при розгляді. замість ПІ-регулятора, був використаний П-регулятор. Описана модель представлена на рис. 4.22.

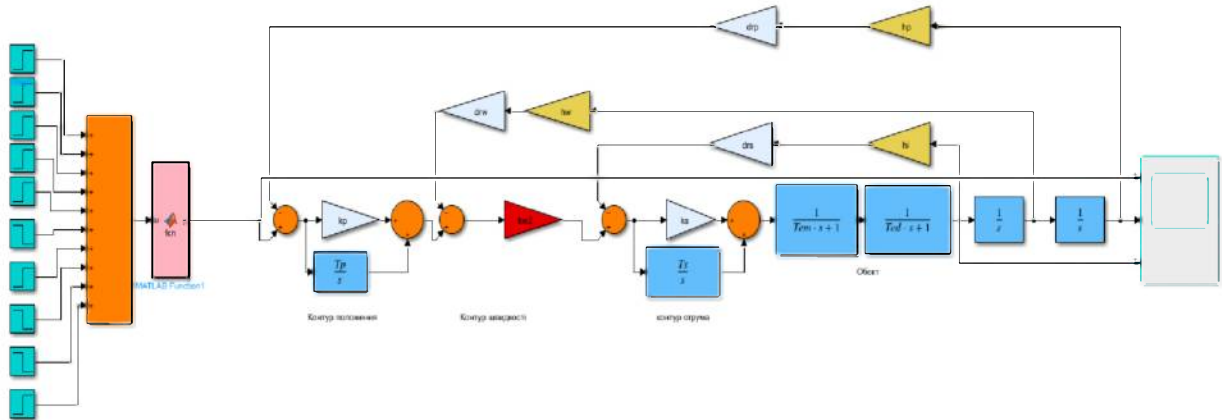


Рисунок 4.22 – Система підпорядкованого регулювання керування лопатями вітрогенератора з використанням спостерігача стану

Після моделювання були побудовані в одній площині, для порівняння, характеристики двох систем, перша з ПІ-регулятором швидкості, а друга з П-регулятором швидкості та спостерігачем стану, щоб додати інтегральну складову, яка буде компенсувати помилку під час регулювання.

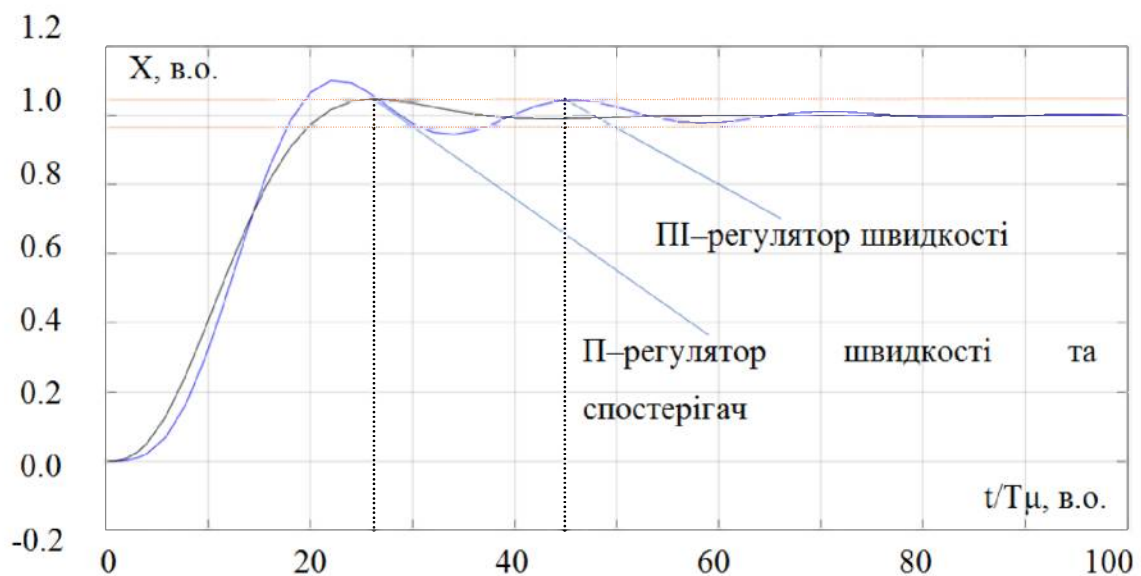


Рисунок 4.23 – Часові діаграми перехідного процесу під час здійснення регулювання положення з використанням ПІ-регулятора швидкості та П регулятором швидкості з додаванням спостерігача при впливі, що обурює

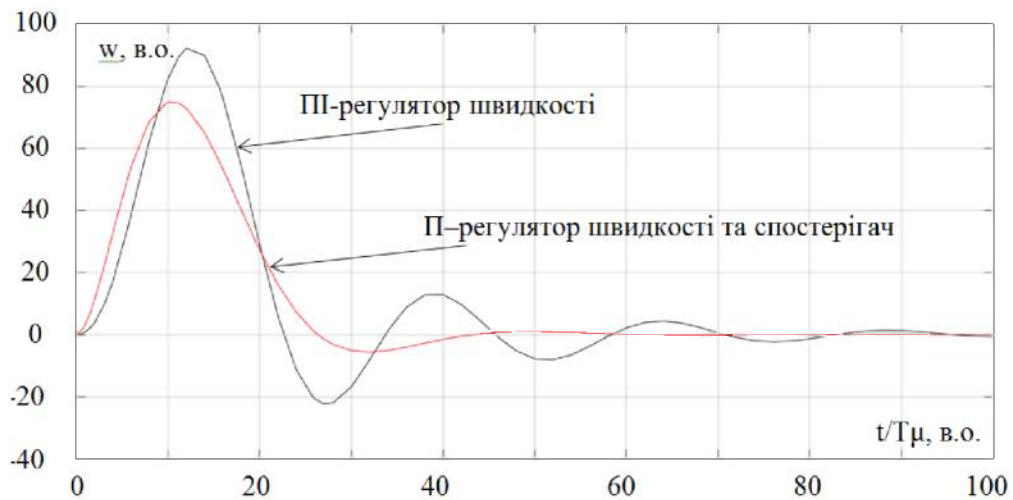


Рисунок 4.24 – Часові діаграми перехідного процесу під час здійснення регулювання швидкості з використанням ПІ-регулятора швидкості та П регулятором швидкості з додаванням спостерігача

Отже, зробивши аналіз роботи двох систем, а саме оцінивши їх за показниками – перерегулювання, час першого узгодження, час виходу на усталений режим, робота під час впливу ззовні та швидкодію в цілому, було прийнято рішення, що краще застосовувати в системі П-регулятор швидкості та спостерігач стану. Тому, що швидкодія при такій схемі регулювання підвищується в приблизно 1.5 рази. При цьому система справляється при виникненні помилки так само вдало, як і під час застосування ПІ-регулятор швидкості, через те, що в спостерігачі знаходиться інтегральна складова, проте з меншим значенням інерційності, ніж у регуляторі.

ВИСНОВКИ

В ході роботи над даним дипломним проектом було виконано синтез системи підпорядкованого регулювання за положенням лопатей вітрогенератора, яка задовольнила всім необхідним вимогам та умовам.

На початку дослідження було проаналізовано стан справ на сьогодні у вітровій енергетиці усього світу та України. Також були розглянуті сучасні конструкції вітрових генераторів, а особливо типи виконання їх лопатей. Були досліджені й електричні приводи, які застосовують у вітряках. Оскільки, завданням дипломної роботи є регулювання положення, то було вивчено питання інтеграції в системі спостерігачів стану, а також й різновиди датчиків положення, які потрібно встановлювати безпосередньо у вітрогенератор, для того, аби користувач (оператор) мав змогу отримувати інформацію у реальному часі.

Під час дослідження роботи самого вітрогенератора, було зазначено, чому краще застосовувати ДПС в електричному приводі, який буде виконувати регулювання за положення. Адже, при аналізі джерел був зроблений висновок, що й електроприводи змінного та постійного струму можна використовувати для цього завдання у вітряках.

Обравши структурну схему, метод регулювання та тип електроприводу було спроектовано та потім й налагоджено контур регулювання струму, та виконаний розрахунок постійної часу даного контуру, що розрахована згідно з методом модульного оптимуму. В результаті виконання дослідження, було визначено основні параметри контуру РС.

Надалі проектуванню був підпорядкований також і контур регулювання швидкості. Приймаючи до уваги параметри обладнання, яке підлягало дослід, було спроектовано регулятор швидкості та реалізовано його створення (розраховано та описано) на операційних підсилювачах. Під час розрахунку параметрів регулятора швидкості використовувався метод резонансного

максимуму. Також було досліджено вплив інерційного зворотного зв'язку на перехідні процеси у контурі регулювання швидкості.

Також аналіз та синтез були проведені вже у зовнішньому контурі регулювання – за положенням. А після цього, аби перевірити вірність усіх раніше викладених теоретичних та розрахункових тверджень, відбулося моделювання у пакеті Matlab. Зі зробленої побудови характеристик систем управління, було зроблено висновок, що спроектована система відповідає усім основним умовам завдання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вітроенергетика: сьогодення і майбутнє, [Режим доступу] - електронний ресурс. Доступно: <https://tridentenergy.ua/wind-power-present-and-future/> Дата звернення: 25.04.21
2. ТОП 7 найпотужніших ВЕС України, [Режим доступу] - електронний ресурс. Доступно: <https://getmarket.com.ua/ru/news/> Дата звернення: 22.04.21
3. «Вітроенергетика України: потенціал і перспективи розвитку» - електронний ресурс. Доступно: [Режим доступу]. <http://www.electrician.com.ua/posts/1280> Дата звернення: 28.04.21
4. «Українська вітроенергетична асоціація» - електронний ресурс. Доступно: [Режим доступу]. <http://uwea.com.ua/ru/news/> Дата звернення: 30.04.21
5. «Технологія вітрогенератора. Вітрогенератор, пристрій, що використовується для перетворення кінетичної енергії вітру в електрику.» - електронний ресурс. Доступно: [Режим доступу]. <https://www.britannica.com/technology/wind-turbine> Дата звернення: 03.05.21
6. «Дискусія з Карою Роджерс про те, як наукова модель вітрового генератора використовується для перевірки гіпотези чи представлення теорії.» - електронний ресурс. Доступно: [Режим доступу]. <https://www.britannica.com/science/science/images-videos> Дата звернення: 03.05.21
7. «Потенціал вітроенергетики в Україні» Доступно: [Режим доступу]. <http://www.biowatt.com.ua/analitika/potentsial-vetroenergetiki-v-ukraine/> Дата звернення: 01.05.21
8. Morfin, O. A., Ornelas-Tellez, F., Ruiz-Cruz, R., Campos-Valdillez, A., Ramirez-Betancour, R., & Gandara, J. A., 2018, «Maximum wind energy capture in a wind system using a doubly-fed induction generator». 2018 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), 6 p.

9. Dong L., Liao M., Wang S., & Jin L., 2009, «Study on Rotational Speed Feedback Torque Control for Wind Turbine Generator System», 2009 International Conference on Energy and Environment Technology.
10. Hossein R. G., Hassan Z. M., & Abedi, M., 2016, «Rotor-Speed Stability Improvement of Dual Stator-Winding Induction Generator-Based Wind Farms By Control-Windings Voltage Oriented Control».
11. Nishikata, S., & Tatsuta, F., 2017, “Studies on characteristics of PMSGs used for current-source type wind farm composed of series-connected wind generators”, 2017, 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS).
12. Urasaki, N., Howlader, A. M., Yona, A., Senjyu, T., Saber, A. Y., & Funabashi, T., “Output power leveling of wind generation system using inertia for PM synchronous generator”, 2009 year, International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 1289-1294p.
13. Liu S., Yao, X.-J., Guo C.-C., Wang X.-D., Jiang H.-L. & Xing Z.-X., 2009 year, “Doubly-fed induction generator control for variable-speed wind power generation system. 2009 International Conference on Mechatronics and Automation” 855-859p.
14. Кривцов В.С., Яковлев А.І., Олейников А.М., Яковлев А.І. “Невичерпна енергія”, книга 1. Вітрогенератори: Навч - Харків: Нац. аерокосмічний ун-т Харк. авіація. ін-т - Севастополь: СевНТУ, 2003
15. Кривцов В. С., Яковлев А. І., Олейников А. М., «Невичерпна енергія» книга 2. Вітрогенератори: Навч - Харків: Нац. аерокосмічний ун-т Харк. авіація. ін-т - Севастополь: СевНТУ, 2004.
16. Белей В. Ф. «Вітроенергетичні установки: тенденції розвитку, проблеми підключення і експлуатації в складі електроенергетичних систем» / Белей В.Ф. // Мала енергетика. 2005. - № 1-2. - С. 6.
17. Матвієнко О.В. «Моделювання на ЕОМ динамічної складової швидкості вітру в залежності від часу» / О. В. Матвеєнко, І. М. Кирпичникова // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. - 2010. - № 1.

18. Петренко Ю. М., Санкевич С. А., «Оптимізація режимів роботи вітроенергетичної установки». Збірник «Системний аналіз і прикладна інформатика», № 1-2, 2013, с. 26-31.

19. Санкевич С.А., Петренко Ю.М., "Моделювання системи управління вітроелектричної установки", Білоруський національний технічний університет, №1 2015, с 35-40.

ДОДАТОК А.
«ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА ДО
ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ»

Студента Сліпченко М.О. групи ЕЛКзп–18

Призначення документа	Документ	Умовні позначення	Зміст зауваження

Дата _____

Підпис _____

(ПІБ)

ДОДАТОК Б

«Охорона праці. Правила експлуатації систем з альтернативними джерелами енергії, які включають в свій комплекс вітрогенератори»

Перед початком огляду хотілось би нагадати про сам термін вітрогенератору. Отже це обладнання, призначене для перетворення кінетичної енергії вітрового потоку в електричну енергію. Дозволяє успішно вирішувати проблему енергопостачання цілих селищ, заміських будинків чи будь-яких об'єктів, віддалених від центральних електромереж.

Використання вітрових генераторів вносить величезний внесок в захист навколишнього середовища, сприяючи скороченню викидів парникових газів і забруднюючих атмосферу речовин.

Вітрогенератори, як правило, використовуються в комплексі з іншими видами обладнання, утворюючи вітроелектричної установки (систему).

Принцип роботи вітроелектричної установки: обертання лопатей, закріплених на осі пристрою, призводить до обертальних рухів ротора генератора, завдяки чому виробляється електроенергія [11].

Одержуваний змінний струм надходить в контролер, де перетворюється в постійну напругу, здатне зарядити акумуляторні батареї. Після них струм надходить на інвертор, де перетворюється в змінну напруга з показником 220/380В і йде до електричної мережі, а вже потім споживачів.

- Вітрогенератор може використовуватися тільки як «мала вітроелектричної установки» для генерації потужності.
- Вітрогенератор може працювати тільки відповідно до номіналами і затвердженим класом вітру.

Отже дотримання первинних інструкцій і дотримання інструкцій з технічного обслуговування і ремонту є необхідними попередніми умовами використання за призначенням.

Основні причини аварій при експлуатації вітрогенераторних установок це :

- Робота поза специфікації виробника
- Всі зміни без письмового дозволу виробника!
- Використання деталей, відмінних від оригінальних деталей.
- Робота в явно не дозволені класах SWTS.
- Робота при сильних вітрах або урагани. [18]

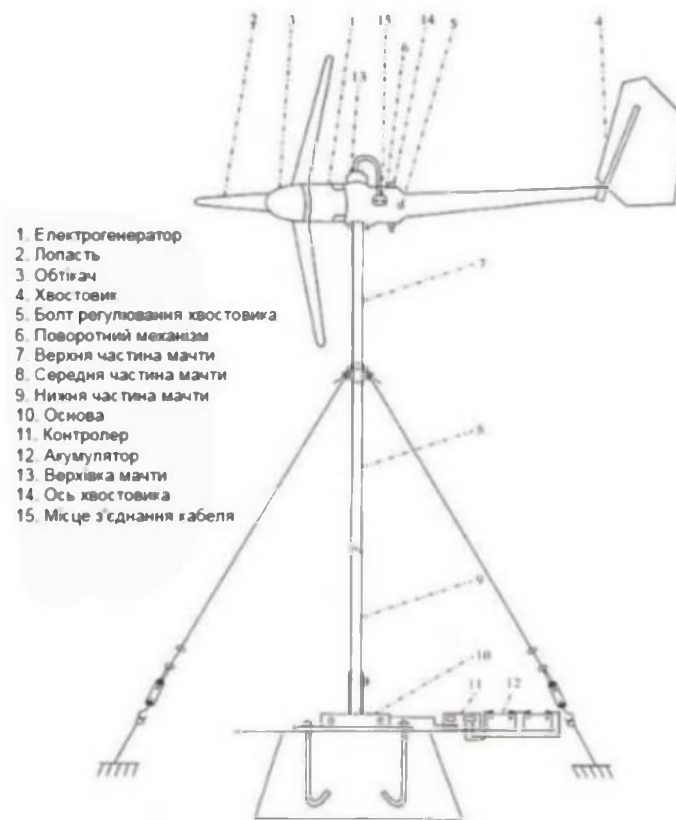


Рисунок Б.1 – Конструкція вітрогенератору середньої потужності з електричним обладнанням [16]

Вимоги до місця установки. Від місця установки вітрогенератора безпосередньо залежить продуктивність електростанції. Одним з найважливіших правил забезпечення ефективної роботи вітрогенератора є виняток завихрення повітряного потоку поблизу турбіни. Тому необхідно прагнути забезпечити ламінарний потік повітря, що обдуває вітроколесо і виключити турбулентність.

Зона турбулентності збільшується в залежності від розмірів перешкоди. Зазвичай довжина зони турбулентності повітряного простору до 20 разів

більше, ніж ширина перешкоди, а висота зони до 2-х рази більше, ніж висота перешкоди.

Вітрогенератор повинен бути встановлений максимально високо і далі від перешкод щоб досягати максимальної швидкості обертання. Грунт під щоглою не повинна бути занадто м'якою - піщаної або болотистій, або схильною до сильним зміни в залежності від кліматичних змін. Довжина струмопровідних кабелів від вітрогенератора до контролера і АКБ повинна бути мінімальною з метою уникнення втрат.

Засоби захисту обов'язково повинні відповідати вимогам державних стандартів, а також НАОП 1.1.10-1.07-8. Процес експлуатації вітроенергетичної установки вимагає уважного та відповідального ставлення. Пристрої, що входять до її складу можуть представляти при неправильній експлуатації або у важких погодних умовах джерела підвищеної небезпеки. Тому необхідно наступне:

- регулярно проводити технічне обслуговування обладнання;
- не намагатися виконувати ремонт або обслуговування вітроенергетичної установки без відповідних знань, самостійно. Роботи повинен виконувати професійний обслуговуючий персонал;
- перевірити стан основних вузлів устаткування при його отриманні;
- не допускати до місця експлуатації вітроенергетичної установки осіб, що не одержали необхідні інструкції з техніки безпеки;
- перед початком експлуатації необхідно ретельно оглянути вітрогенератор переконавшись в надійності кріплення лопатей, щогли, і всіх фланцевих з'єднань;
- перевірити, чи немає пошкоджень ізоляція проводів;
- під час роботи вітрогенератора не допускається торкатися до проводів, і працюючої турбіні;
- Запуск вітрогенератора повинен проводитися без підключеного навантаження;

Потужність передбачуваного навантаження не повинна перевищувати потужність підключеного до системи інвертора.

Вітрогенератор представляє особливу небезпеку при аномально сильних вітрах. Не дивлячись на те, що таке явище відбувається вкрай рідко, необхідно перед монтажем виділити зону відчуження для ВЕС. Зона відчуження – простір навколо станції, до якого не слід допускати людей, або тварин під час роботи турбіни (особливо при сильних вітрах).

Необхідно також звернути увагу на головне - електричний та механічний безпеці під час роботи з вітрогенератором.

Вітрогенератор обладнаний складними електронними пристроями, при розробці котрих забезпечувався захист від електричних джерел небезпеки, пов'язаних з надмірними струмами. При підключенні цих і будь-яких інших електротехнічних пристроїв необхідно пам'ятати, що існують ризики для людей, які обумовлені протіканням електричного струму.

Виділення теплової енергії в електротехнічних системах часто є результатом протіканням надмірного струму у проводах з недостатню площею перетину чи через погані контакти. Акумулятори можуть викидати струми небезпечної величини.

У разі короткого замикання в проводах, що йдуть від акумулятора, може виникнути пожежа. Щоб усунути цей ризик, необхідно встановити в ланцюгах, які підключаються до акумулятора, плавкі запобіжники або автоматичні вимикачі відповідного номіналу.

Відповідно до ГОСТ 12.3.032-84 забороняється експлуатація компонентів вітроенергетичної установки у вибухонебезпечному середовищі, так як в її електричних частинах можливе іскріння. Забороняється відключати акумуляторні батареї від додаткового обладнання при підключеному до нього генератору, тому що це призведе до виходу з ладу обладнання.

Обертові лопаті є найбільш серйозний механічний джерела небезпеки. Лопаті ротора вітрогенератора виготовлені з дуже міцного матеріалу. Швидкість руху лопатей по зовнішньому діаметру обертання може

перевищувати 250 км/год. При такій швидкості лопаті можуть нанести серйозну травму. Ні в якому разі не слід встановлювати турбіну в таких місцях, де можливий контакт людини з рухомими лопатями ротора. Не можна встановлювати турбіну таким чином, що б хто-небудь міг опинитися на шляху руху лопатей. Забороняється зупиняти вітрове колесо при роботі вітротурбіни, це дуже небезпечно. Необхідно проводити всі роботи по обслуговуванню вітрогенератора тільки при повній зупинці вітроколеса і в погоду без сильного та середнього за швидкістю вітру.

Потрібно строго дотримуватися в процесі установки і експлуатації таких вимог техніки безпеки, як у ДСТУ 2267-93, а саме:

- всі роботи по установці слід виконувати на рівні землі;
- під час всього процесу установки акумулятори повинні бути відокремлені від мережі;
- регулярно, принаймні 1 раз на рік, перевіряти опорні конструкції, лопаті і електричні системи;

Також необхідно пам'ятати, що лопаті ротора дуже міцні, однак, якщо вони увійдуть в контакт з твердим предметом, вони можуть зламатися. Для того, щоб забезпечити безпечну роботу, при виборі місця для турбіни необхідно уникати можливий контакт з будь-яким фізичним об'єктом.

Також потрібно пам'ятати, що для нових турбін потрібно короткочасний період обкатки, тобто роботи в режимі холостого ходу, при низьких швидкостях вітру. І лише після цього вони досягнуть пікового ефективности, під час обкатки може здаватися, що турбіна працює повільно.

ДОДАТОК В

«Код програми для побудову ЛФЧХ та ЛАЧХ системи, за допомогою математичного пакету Matlab у M-file»

```
close all, clear all,
k1=15;
k2=10;
T1=6e-3;T2=25e-3;
Kpa=0.004;
Ti_gr=725.8e-3;

Tf=T2;kcх=2;kp=1;To=1;
Ti_gr=12.85*725.8e-3;

Ti=Ti_gr;

k4=1;
[a,b,c,d]=linmod('mod2');
sys=ss(a,b,c,d);
figure(1)
subplot(211)
step(sys,15*(T1+T2)),grid on
subplot(212)
impulse(sys,15*(T1+T2)),grid on
figure(2)
k4=0;
[a,b,c,d]=linmod('mod2');
sys=ss(a,b,c,d);
bode(a,b,c,d)
[Mag,Phase,w]=bode(a,b,c,d);
margin(Mag,Phase,w);
Ti=2*Ti_gr;
k4=1;
[a,b,c,d]=linmod('mod2');
sys=ss(a,b,c,d);
figure(3)
subplot(211)
step(sys,15*(T1+T2)),grid on
subplot(212)
```

```

impulse(sys,15*(T1+T2)),grid on
figure(4)
k4=0;
[a,b,c,d]=linmod('mod2');
sys=ss(a,b,c,d);
bode(a,b,c,d)
[Mag,Phase,w]=bode(a,b,c,d);
margin(Mag,Phase,w);
Ti=Ti_gr/2;
k4=1;
[a,b,c,d]=linmod('mod2');
sys=ss(a,b,c,d);
figure(5)
subplot(211)
step(sys,15*(T1+T2)),grid on
subplot(212)
impulse(sys,15*(T1+T2)),grid on
figure(6)
k4=0;
[a,b,c,d]=linmod('mod2');
sys=ss(a,b,c,d);
bode(a,b,c,d)
[Mag,Phase,w]=bode(a,b,c,d);
margin(Mag,Phase,w);

//Налаштування на КД и ТО
Ti=19.5*725.8e-3;;
Tu.a=19.5*725.8e-3;
Ti_gr=12.85*725.8e-3;
k4=1;
[a,b,c,d]=linmod('mod2');
sys=ss(a,b,c,d);
figure(7)
subplot(211)
step(sys,15*(T1+T2)),grid on
subplot(212)
impulse(sys,15*(T1+T2)),grid on
Ti_gr=12.85*725.8e-3;
k4=1;
[a,b,c,d]=linmod('mod2');
sys=ss(a,b,c,d);
figure(8)
subplot(211)
step(sys,15*(T1+T2)),grid on

```

```
subplot(212)
impulse(sys,15*(T1+T2)),grid on
```

ЛАЧХ ЛФЧХ для ТО

```
k4=0;
figure(9)
[a,b,c,d]=linmod('mod2');
sys=ss(a,b,c,d);
bode(a,b,c,d)
[Mag,Phase,w]=bode(a,b,c,d);
margin(Mag,Phase,w);

for i=1:1:20
Tu=Ti_gr*i;
sigma=[1000 100 61 4.3 0];
ts=[17.4 25.6 38.7 172 1000];
figure(10)
subplot(211)
plot(Tu,sigma(i),'x'),grid on,hold on
ylabel('\sigma');
xlabel('Ti, ms');
subplot(212)
plot(Tu,ts(i),'x'),grid on, hold on
ylabel('ts, ms');
xlabel('Ti, ms');
end
```

Програма для налаштування ПІ-регулятора

```
close all, clear all,
k1=15;
k2=10;
T1=6e-3;T2=25e-3;
Kpa=0.004;
Tf=T2;
kcx=3;
Ti=1;
kp=1;
To=3600e-3;
To_opt=1800e-3;
Toc=900e-3;
k4=1;
[a,b,c,d]=linmod('mod2');
sys=ss(a,b,c,d);
```

```

figure(15)
subplot(211)
[y1,t]=step(sys,5*(T1+T2));
plot(t,y1),grid on
subplot(212)
impulse(sys,5*(T1+T2)),grid on
figure(1)
k4=0;
[a,b,c,d]=linmod('mod2');
bode(a,b,c,d)
[Mag,Phase,w]=bode(a,b,c,d);
margin(Mag,Phase,w);
To=To_opt;
k4=1;
[a,b,c,d]=linmod('mod2');
sys=ss(a,b,c,d);
figure(2)
subplot(211)
[y2,t]=step(sys,5*(T1+T2));
plot(t,y2),grid on
subplot(212)
impulse(sys,5*(T1+T2)),grid on
figure(3)
k4=0;
[a,b,c,d]=linmod('mod2');
bode(a,b,c,d)
[Mag,Phase,w]=bode(a,b,c,d);
margin(Mag,Phase,w);
To=Toc;
k4=1;
[a,b,c,d]=linmod('mod2');
sys=ss(a,b,c,d);
figure(4)
subplot(211)
[y3,t]=step(sys,5*(T1+T2));
plot(t,y3),grid on
subplot(212)
impulse(sys,5*(T1+T2)),grid on
figure(5)
k4=0;
[a,b,c,d]=linmod('mod2');
bode(a,b,c,d)
[Mag,Phase,w]=bode(a,b,c,d);
margin(Mag,Phase,w);

```

ДОДАТОК Г
«Розрахунок параметрів контуру РШ»

1) Для випадку, коли $T_w=0$:

$$\Sigma \omega_{\text{л}} \cdot T_i = \frac{1}{4} [\arccos(1/1,3)]^2 = 0,12$$

$$\Sigma \omega_{\text{л}} = \frac{\Sigma \omega_{\text{л}} \cdot T_i}{T_i} = \frac{\left[\arccos\left(\frac{1}{1.3}\right) \right]^2}{4 \cdot T_i} = \frac{0.12}{12.5 \cdot 10^{-3}} = 9.65 \frac{1}{c} \quad (\Gamma.1)$$

$$\begin{cases} \Sigma \omega_{\text{л}} = \omega_2 - \omega_1 \\ 1 = \frac{1}{T_1 \cdot \omega_c} \cdot \frac{T_2 \cdot \omega_c}{T_{III} \cdot \omega_c} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{\omega_1}{\omega_2 \cdot T_{III} \cdot \omega_c} = 1 \\ \Sigma \omega_{\text{л}} = \omega_2 - \omega_1 \end{cases} \quad (\Gamma.2)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \omega_1 = \omega_2 \cdot T_{III} \cdot \omega_c \\ \Sigma \omega_{\text{л}} = -T_{III} \cdot \omega_2 \cdot \omega_c + \omega_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} T_1 = \frac{1}{\omega_1} = \frac{1}{2.08} = 0.478c \\ T_2 = \frac{1}{\omega_2} = \frac{1}{11.32} = 0.0903c \end{cases}$$

2) Для випадку, коли $T_w \neq 0$:

$$\omega_c = \frac{1}{\frac{1}{\omega_c \Sigma T_n} \cdot \Sigma T_{\Pi}} = \frac{1}{2.22 \cdot 0.0225} = 20.25 c^{-1};$$

$$\Sigma \omega_{\text{л}} = \frac{\Sigma \omega_{\text{л}} \cdot T_i}{\Sigma T_{\Pi}} = \frac{0.096}{0.0225} = 4.27 c^{-1}; \quad (\Gamma.3)$$

$$\begin{aligned}
& \left\{ \begin{array}{l} \Sigma \omega_{\text{л}} = \omega_2 - \omega_1 \\ 1 = \frac{1}{T_{uu} \omega_c} \cdot \frac{T_2 \omega_c}{T_1 \omega_c} \end{array} \right\} \Rightarrow \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} 1 = \frac{\omega_1}{T_{uu} \cdot \omega_2 \cdot \omega_c} \\ \Sigma \omega_{\text{л}} = \omega_2 - \omega_1 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \omega_1 = T_{uu} \cdot \omega_2 \cdot \omega_c \\ \Sigma \omega_{\text{л}} = \omega_2 - T_{uu} \cdot \omega_2 \cdot \omega_c \end{array} \right\} \Rightarrow \\
& \left\{ \begin{array}{l} \omega_2 = \frac{\Sigma \omega_{\text{л}}}{1 - T_{uu} \cdot \omega_c} = 4.73c^{-1}; \\ \omega_1 = T_{uu} \cdot \omega_2 \cdot \omega_c = 0.473c^{-1}; \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} T_1 = \frac{1}{\omega_1} = 2,11c; \\ T_2 = \frac{1}{\omega_2} = 0,211c; \end{array} \right. \quad (\Gamma.4)
\end{aligned}$$