

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О.М.БЕКЕТОВА

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та
транспортної інфраструктури

Кафедра альтернативної електроенергетики та електротехніки

Пояснювальна записка

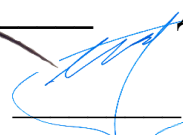
до дипломного проєкту (роботи)

бакалавра

на тему:

**«Особливості генерування електричної енергії асинхронним
вітрогенератором потужністю 7,5 кВт»**

Виконав: студент 4 курсу,
групи НВДЕ-2022
спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка
(Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії)

	Д.О. Серьогін
Керівник 	О.Б. Єгоров
Рецензент 	М.Л. Глєбова

Харків - 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

ННІ Енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури

Кафедра Альтернативної електроенергетики та електротехніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень Бакалавр

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

завідувач кафедри АЕЕ



доц. **О.Б. Єгоров**

“ 15 ” 06 2026 року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНТУ

Серьогіну Данилі Олеговичу

1. Тема проєкту: «Особливості генерування електричної енергії асинхронним вітрогенератором потужністю 7,5 кВт»

керівник проєкту Єгоров Олексій Борисович, к.т.н., доцент

затверджені наказом вищого навчального закладу 22.05. 2026 року № 440-03

2. Строк подання студентом проєкту 14 червня _____ 2026 року.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи): Дані режимів роботи генераторів, та його характеристики, ДСТУ 2843-94, ДСТУ 3440-96 Системи енергетичні, Правила улаштування електроустановок, Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Аналіз автономних генераторів, Специфіка застосування систем генерування електроенергії автономних об'єктів, Визначення умов самовозбудження і стійкості роботи асинхронного генератора, Метод імітаційного моделювання для опису електромеханічних систем, Охорона праці.

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

- 1) Цілі та завдання проєктування.

- 2) Математичне опис процесу самозбудження

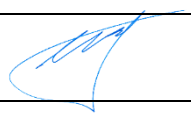
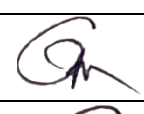
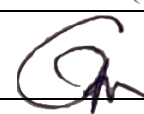
- 3) Принципова схема АГ з конденсаторним збудженням

4) Стабілізація амплітуди напруги асинхронного генератора із батареєю конденсаторів.

5) Принципова схема АГ з автономним інвертором напруги

6) Результати моделювання

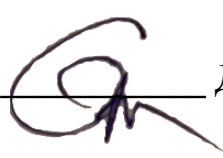
6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розрахункова частина	Єгоров О.Б., доц. каф. АЕЕ		
Охорона праці	Серіков Я.О., доц. каф. ОП та БЖД		

7. Дата видачі завдання 25 травня 2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	2	3	4
1	Аналіз автономних генераторів	25.05.2026-30.05. 2026	
2	Визначення умов самовозбудження і стійкості роботи асинхронного генератора. Розробка методу імітаційного моделювання для опису електромеханічних систем	31.05.2026-05.06. 2026	
3	Розробка заходів з охорони праці	07.06.2026-10.06. 2026	
4	Підготовка та подання дипломного проєкту до захисту.	11.06. 2026-14.06. 2026	

Студент  Д.О. Серьогін

Керівник роботи  О.Б. Єгоров

ЗМІСТ

ВСТУП	6
ГЛАВА 1 АНАЛІЗ АВТОНОМНИХ ГЕНЕРАТОРІВ	9
1.1 Специфіка застосування систем генерування електроенергії автономних об'єктів	9
1.2 Огляд виконаних досліджень асинхронних генераторів	14
Висновки.	39
ГЛАВА 2 ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ САМОВОЗБУДЖЕННЯ І	
СТІЙКОСТІ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА	40
2.1 Метод імітаційного моделювання для опису електромеханічних систем	41
2.2 Опис електромеханічних систем з позицій теорії автоматичного керування системам	42
2.3 Параметричний резонанс.....	56
Висновки	61
ГЛАВА 3 ОХОРОНА ПРАЦІ	63
ВИСНОВКИ	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	75
ДОДАТОК	77

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

МСГ – мехатронна система генерування

АІН – автономний інвертор напруги

СГЕЕ – система генерування електроенергії

ЕМ – електрична машина

ККД – коефіцієнт корисної дії

АМ – асинхронна машина

АГ – асинхронний генератор

СГ – синхронний генератор

СГПМ - синхронний генератор із постійними магнітами

СГГ - синхронно-гістерезисний генератор

ААГ – автономний асинхронний генератор

ХХ - холостий хід

ТАУ – теорія автоматичного управління

ГПТ – генератор постійного струму

ППП - напівпровідниковий перетворювач

ДУ - диференціальні рівняння

АФЧХ – амплітудно-фазова частотна характеристика

ЕД – експериментальне дослідження

ІМ – імітаційне моделювання

ВСТУП

Постійне зростання обсягів електроспоживання, розширення промислового виробництва, а також збільшення кількості автономних об'єктів, зокрема електрифікованих транспортних засобів, зумовлюють необхідність удосконалення автономних систем генерування електричної енергії. За цих умов особливої актуальності набувають завдання підвищення потужності систем генерування, а також поліпшення їх енергетичних, масогабаритних та економічних характеристик. Одним із ключових чинників, що визначають ефективність таких систем, є тип електромеханічного перетворювача, який використовується у складі генераторної установки.

На сучасному етапі в автономних системах електропостачання найбільшого поширення набули генератори на основі синхронних машин і машин постійного струму. Проте, незважаючи на їх очевидні переваги, зазначені типи електричних машин мають низку обмежень, які знижують ефективність їх застосування у специфічних умовах експлуатації. До таких умов належать підвищена пожежо- та вибухонебезпечність, аварійні режими, пов'язані з короткими замиканнями, вплив вібрацій, робота в розрідженій атмосфері та інші несприятливі чинники, характерні, зокрема, для автономних об'єктів різного призначення.

На цьому тлі особливий інтерес становить асинхронна машина, яка є одним із найпоширеніших типів електричних машин завдяки простоті конструкції, технологічності виготовлення, високій експлуатаційній надійності та відсутності щітково-колекторного вузла. Водночас, попри зазначені переваги, асинхронні машини тривалий час не набували широкого застосування як автономні генератори. Основними причинами, що стримували їх використання в генераторних установках, були необхідність застосування громіздких і дорогих джерел ємнісної реактивної потужності, а також складність побудови систем регулювання та стабілізації параметрів генерованої напруги.

Часткове розв'язання проблеми, пов'язаної з формуванням джерела реактивної потужності, стало можливим на початку XXI століття завдяки

створенню високоефективних плівкових самовідновлюваних конденсаторів серій K78-98 і СВВ60, які характеризуються поліпшеними масогабаритними показниками порівняно з виробами попередніх поколінь.

У зв'язку з цим значний теоретичний і практичний інтерес становить система генерування електроенергії, побудована за схемою «асинхронна машина — автономний інвертор напруги». У такій системі автономний інвертор напруги виконує функцію джерела регульованого реактивного струму для асинхронної машини, що працює в генераторному режимі. Джерелом реактивного струму в цьому випадку є конденсатор, увімкнений у коло постійного струму інвертора, а сам інвертор функціонує як перетворювач із широтно-імпульсною модуляцією вихідної напруги. Така структура відкриває можливості для підвищення якості генерованої електроенергії, поліпшення регульовальних властивостей системи та розширення сфери застосування асинхронних генераторних установок.

Водночас наявні розбіжності в теоретичних підходах до пояснення явища самозбудження асинхронного генератора ускладнюють формулювання однозначних рекомендацій, які б забезпечували гарантоване збудження системи типу «асинхронна машина — автономний інвертор напруги». Оскільки функціонування асинхронної машини, як і інших електромеханічних перетворювачів, підпорядковується загальним законам електродинаміки, процес генерації в машинах змінного та постійного струму може розглядатися з єдиних методологічних позицій. Це створює підґрунтя для застосування класичних методів дослідження електромеханічних систем з метою аналізу впливу параметрів системи генерування на перехідні процеси самозбудження, а також на її роботу в динамічних режимах.

Дослідження електромагнітних процесів у мехатронній системі генерування на базі асинхронної машини та автономного інвертора напруги має важливе наукове й практичне значення. Такий аналіз дає змогу виявити умови стійкого самозбудження, визначити закономірності функціонування системи в перехідних, статичних і динамічних режимах, а також сформулювати рекомендації щодо вибору та оптимізації її параметрів. Реалізація зазначених

завдань потенційно забезпечує підвищення стабільності роботи системи та поліпшення якості генерованої напруги в різних експлуатаційних умовах.

Метою дипломної роботи є комплексне дослідження електромагнітних процесів у мехатронній системі генерування типу «асинхронна машина — автономний інвертор напруги» з акцентом на вивчення умов самозбудження системи, а також особливостей її функціонування в робочих та аварійних режимах.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовано та розв'язано такі завдання:

- визначено умови самозбудження асинхронного генератора за конденсаторного збудження, а також у складі мехатронної системи генерування електроенергії;
- розроблено рекомендації щодо проектування мехатронної системи генерування на основі асинхронної машини з метою забезпечення умов самозбудження та вибору раціональних режимів її функціонування;
- створено математичну та імітаційну моделі асинхронного генератора з конденсаторним та інверторним збудженням, призначені для дослідження особливостей роботи мехатронної системи «асинхронна машина — автономний інвертор напруги» у штатних та аварійних режимах.

Об'єктом дослідження є мехатронна система генерування електроенергії, що містить асинхронну машину та автономний інвертор напруги, який виконує функцію джерела реактивного струму.

Предметом дослідження є електромагнітні процеси в мехатронній системі генерування типу «асинхронна машина — автономний інвертор напруги», зокрема процеси самозбудження, а також особливості генерування електроенергії в перехідних режимах роботи.

ГЛАВА 1 . АНАЛІЗ АВТОНОМНИХ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ З САМОЗБУДЖЕННЯМ

1.1 Специфіка застосування систем генерування електроенергії автономних об'єктів

Одним із ключових завдань сучасної енергетики є розроблення високонадійних та енергоефективних систем генерування електричної енергії. Найбільшої значущості це завдання набуває для об'єктів, до яких висуваються підвищені вимоги щодо експлуатаційної надійності, стійкості функціонування та електробезпеки. До таких об'єктів належать авіаційна техніка, морські та річкові судна, автомобільні енергетичні комплекси, а також інші автономні технічні системи.

Особливості автономних систем генерування електроенергії, зокрема тих, що використовуються на літальних апаратах, визначаються специфічними умовами їх експлуатації. До таких умов належать широкий діапазон робочих температур, розріджена атмосфера, значні механічні навантаження, необхідність узгодження потужності генератора з параметрами навантаження, змінна частота обертання приводного двигуна, можливість роботи за різних режимів електричного навантаження, а також потреба в забезпеченні стійкості та безпечності електричної машини в разі виникнення коротких замикань.

Крім того, джерела електроенергії, призначені для автономних систем, повинні відповідати комплексу жорстких техніко-експлуатаційних вимог. До основних із них належать конструктивна простота, технологічність обслуговування, компактність, високі питомі масо-потужні показники, надійність, стабільність вихідних електричних параметрів, а також узгодженість потужності генератора з характеристиками навантаження, що забезпечує високий коефіцієнт корисної дії системи загалом. Особливого значення при цьому набувають робочі характеристики генераторної установки, які відображають залежність частоти, ковзання, коефіцієнта корисної дії та коефіцієнта потужності від величини корисної потужності.

Для автономних електромеханічних систем маса та габаритні розміри мають принципове значення, оскільки саме ці показники значною мірою визначають ефективність їх застосування на рухомих і транспортних об'єктах. З цієї причини вимоги до питомої маси та габаритів автономних систем є значно жорсткішими порівняно зі стаціонарними наземними енергетичними установками. Одним із поширених способів зменшення маси та габаритів електрогенерувального обладнання є підвищення робочої частоти генерованої напруги. Однак такий підхід супроводжується низкою негативних наслідків, зокрема скороченням терміну служби обладнання, необхідністю застосування інтенсивніших систем охолодження, а також використанням високоякісних ізоляційних і магнітних матеріалів, здатних витримувати підвищені теплові, механічні та електромагнітні навантаження.

Зростання зазначених навантажень неминуче призводить до збільшення втрат енергії в елементах системи, що, своєю чергою, спричиняє зниження коефіцієнта корисної дії. Отже, задача зменшення маси та габаритних розмірів автономних систем генерування електроенергії має розв'язуватися у нерозривному зв'язку із забезпеченням їх енергетичної ефективності, теплової стійкості, експлуатаційної надійності та безпечності [16].

Таблиця 1.1 - Співвідношення масо -енергетичних параметрів електричних машин промислового та авіаційного призначення

Параметр	Типи електричних машин					
	Асинхронні		Синхронні		Постійного струму	
	Н	А	Н	А	Н	А
Частота, Гц	50	400	50	400	66,7	267
Відносна повна вага, кг/кВт	16	2	17,3	1,3	13,2	2
Співвідношення ваги	8		13,3		6,6	

Зіставлення масогабаритних характеристик регульованих систем генерування електроенергії показує, що генераторні установки на основі асинхронної машини, навіть за необхідності використання додаткового джерела реактивної енергії, у низці випадків мають менші масу та габаритні розміри порівняно із системами, побудованими на базі синхронних машин із роторною обмоткою збудження. Ця обставина свідчить про перспективність застосування асинхронних генераторів в автономних енергетичних системах, де зниження маси та габаритів обладнання має важливе практичне значення.

Генератори на основі машин із постійними магнітами також характеризуються високими енергетичними показниками та сприятливими масогабаритними параметрами. Однак забезпечення регулювання вихідної напруги в таких системах, як правило, потребує застосування додаткових силових перетворювачів, зокрема інверторів. Це призводить до ускладнення структури генераторної установки, а також до збільшення її маси, габаритних розмірів і вартості [5].

Щодо трикаскадних генераторних систем, то асинхронний генератор з інверторним регулятором напруги, на думку автора, може становити їм серйозну конкуренцію за сукупністю експлуатаційних, енергетичних і конструктивних показників [10].

У таблиці 1.2 наведено порівняння маси сучасних електричних машин середньої потужності. Подані дані свідчать, що за порівнянних значень потужності електричних машин різних типів найменшою масою характеризується асинхронна машина. Водночас слід враховувати, що в разі вибору інших конструктивних виконань, матеріалів і технологій виготовлення фактичні значення маси електричних машин можуть змінюватися в певних межах [12].

Таблиця 1.2 – Порівняння ваги електричних машин потужності 15-16кВт

Тип двигуна	Модель	Потужність, кВт	Вага, кг	Відносна вага, кг/кВт
Асинхронний	АІР160 5 2	15	116	7,74
Синхронний	СМС-200-16/4-У2	16	160	10
Постійного струму	4ПНМС180МО4	15	180	12

В умовах, коли до систем електропостачання висуваються підвищені вимоги щодо надійності, безпеки та стійкості функціонування, застосування генераторів постійного струму є суттєво обмеженим. Основною причиною цього є наявність щітково-колекторного вузла, який являє собою конструктивно вразливий і порівняно малонадійний ковзний контактний елемент. Особливо несприятливим є його використання в умовах розрідженої атмосфери, де експлуатаційні характеристики такого вузла помітно погіршуються.

На сучасному етапі найбільш затребуваними та енергетично ефективними у складі бортових систем електроустаткування є комплекси, побудовані на основі синхронних генераторів із постійними магнітами. Дослідженню таких систем, що функціонують спільно з перетворювально-регулювальними пристроями — напівпровідниковими перетворювачами, автономними інверторами та випрямлячами, — присвячено значну кількість наукових праць [8]. До основних переваг синхронних генераторів із постійними магнітами належать висока керованість, достатня жорсткість зовнішньої характеристики, а також сприятливі масогабаритні показники [15].

Водночас, незважаючи на очевидні переваги, системи генерування електроенергії на основі синхронних генераторів із постійними магнітами мають низку суттєвих недоліків. До найбільш значущих із них належать недостатня механічна міцність окремих видів магнітотвердих оксидних магнітів, процеси старіння феритових і термостабільних магнітів на основі сплавів Al–Ni–Co–Fe, можливість розмагнічування за підвищених температур, висока вартість

постійних магнітів, а також складність побудови ефективного захисту в разі коротких замикань. Останній недолік зумовлений насамперед значним запасом електромагнітної енергії, зосередженим у роторі, що обертається.

В аварійних режимах зазначений запас електромагнітної енергії, який практично неможливо оперативно усунути, становить потенційну небезпеку для елементів системи. З цієї причини вказані недоліки певною мірою знижують практичну цінність переваг синхронних генераторів із постійними магнітами та обмежують сферу їх ефективного застосування в автономних енергетичних установках.

Як альтернатива системам генерування на основі синхронних генераторів із постійними магнітами можуть розглядатися установки, що використовують електричні машини із самозбудженням, зокрема асинхронні та синхронно-гістерезисні генератори. Якщо системи з асинхронними генераторами достатньо широко представлені в науково-технічній літературі, то системи на основі синхронно-гістерезисних генераторів досліджено значно меншою мірою.

Особливий інтерес становить асинхронний генератор, який має низку експлуатаційних переваг у складі автономних установок. Зокрема, його робота в несиметричних і динамічних режимах, за значної зміни частоти обертання та/або навантаження, характеризується більшою стійкістю порівняно з низкою інших типів генераторів. Це значною мірою зумовлено демпфувальними властивостями короткозамкненого ротора. Крім того, асинхронні генератори допускають порівняно просту організацію паралельної роботи, тоді як для синхронних генераторів у разі паралельного ввімкнення необхідне суворе узгодження частоти обертання.

Під час паралельної роботи асинхронних генераторів допускається певна різниця частот обертання окремих машин. У цьому випадку в системі встановлюється струм такої частоти, яка відповідає резонансному стану повної еквівалентної схеми, що охоплює кола навантаження, збудження та обмотки електричної машини. При цьому ступінь навантаження окремих асинхронних генераторів може відрізнятися [17].

Слід також зазначити, що на сьогодні відсутній спеціально затверджений державний стандарт, який регламентує показники якості електроенергії автономних джерел живлення. У зв'язку з цим під час проєктування таких систем електропостачання доцільно орієнтуватися на положення ДСТУ 32144–2013 «Електрична енергія. Електромагнітна сумісність технічних засобів. Норми якості електричної енергії у системах електропостачання загального призначення» [9]. Стосовно автономних систем цей стандарт може бути використаний як орієнтир для оцінювання допустимих меж відхилення частоти: зміна частоти не повинна перевищувати ± 5 Гц протягом усього часу роботи та ± 1 Гц протягом 95 % робочого часу.

1.2 Огляд виконаних досліджень асинхронних генераторів

Системи генерування електроенергії, побудовані на основі асинхронних машин, становлять значний науковий і практичний інтерес як перспективний напрям розвитку автономної енергетики. Історичні передумови їх застосування пов'язані з 1889 роком, коли М. О. Доливо-Добровольський створив першу трифазну асинхронну машину та трифазний трансформатор, заклавши тим самим фундаментальні основи теорії та практики проєктування електричних машин цього типу. Ним було визначено ключові підходи до вибору конструкції пазів, застосовуваних матеріалів, а також технологічних принципів виготовлення асинхронних машин [12].

Надалі асинхронні генератори набули розвитку як автономні джерела електроенергії для різних галузей техніки. Одним із відомих напрямів їх застосування є мікрогідроелектростанції. В автономному режимі, особливо під час роботи на навантаження зі змінним коефіцієнтом потужності, суттєві переваги демонструють мікроГЕС, побудовані на базі асинхронної машини у поєднанні з дволанковим перетворювачем частоти, активним випрямлячем та автономним інвертором напруги. Такі технічні рішення забезпечують гнучкіше регулювання режимів роботи та підвищення якості виробленої електроенергії. За

кордоном також випускаються різні модифікації генераторних установок і спеціально розроблені асинхронні машини, призначені для експлуатації у складі вітроенергетичних систем [18].

Асинхронні генератори з ємнісним збудженням знайшли застосування як аварійні джерела живлення, а також як високошвидкісні генератори, що використовуються в системах кінетичного акумулювання енергії [7]. Крім того, вони застосовуються для електроживлення систем телеуправління й автоматики, а також у складі захисних систем детандерів, де реалізується електричне гальмування [11]. У таких установках механічна енергія, що виробляється турбодетандером, перетворюється на електричну. На етапі пуску асинхронна машина функціонує в руховому режимі, забезпечуючи розгін детандера до заданої частоти обертання, після чого переходить у генераторний режим, використовуючи батарею конденсаторів для самозбудження. Аналогічний принцип може бути реалізований і в стартер-генераторних турбінних установках автономних об'єктів, зокрема літальних апаратів, де необхідний розгін ротора з подальшим переходом у режим генерування електроенергії.

Певний інтерес становить також асинхронний зварювальний генератор, запропонований у 1986 році німецькими інженерами Е. Юлке і Ю. Дасселем. У цій конструкції зварювальна дуга як навантаження підключалася до обмотки статора через випрямляч. До характерних особливостей такого генератора належать наявність верхньої та нижньої критичних частот самозбудження, а також висока механічна міцність і стійкість до дії відцентрових навантажень [22].

Ще одним напрямом застосування асинхронних генераторів є імпульсні енергетичні установки, зокрема системи живлення потужних лазерів. У таких випадках використовуються асинхронні генератори з масивним ротором, виготовленим з алюмінієвого сплаву з мідною оболонкою. Накопичувачем енергії в таких системах, як правило, є батарея конденсаторів, що дає змогу розглядати асинхронну машину як електромеханічний перетворювач енергії. На відміну від традиційних систем електропостачання, де наявність конденсаторів

часто призводить лише до збільшення маси та вартості установки, в імпульсних генераторних системах ємнісний накопичувач виконує подвійну функцію: забезпечує умови збудження та одночасно бере участь у накопиченні й віддаванні енергії.

Водночас імпульсні асинхронні генератори не позбавлені недоліків. Одним із найбільш суттєвих є наявність значних втрат потужності на холостому ході за великої шпаруватості робочих імпульсів струму. Ці втрати зумовлені електричною несиметрією обмоток статора та дією обертового магнітного поля. У разі збільшення насичення магнітного кола зазначені втрати зростають, що негативно впливає на енергетичну ефективність установки [19].

Крім зазначених сфер застосування, асинхронні генератори використовуються як занурювальні генератори для глибинних приладів, джерела живлення тягових електродвигунів електровозів, а також автономні джерела електроенергії в сільському та рибному господарстві й інших галузях. Стосовно автономних енергетичних установок особливо перспективним є використання асинхронних електричних машин у поєднанні з контролером реактивно-ємнісної енергії та випрямляючим пристроєм за наявності зарядно-акумуляторних елементів [10]. У такій системі координуючий регулятор, враховуючи параметри навантаження і частоту обертання вала, формує керуючий вплив, що забезпечує стабілізацію амплітуди та частоти генерованої напруги.

Дослідження систем генерування електроенергії на основі асинхронних машин із напівпровідниковим збудженням проводяться як в Україні, так і за кордоном. Розробленням та вивченням таких систем займалися, зокрема, у Німеччині компанії Siemens AG, AEG та AKW, у Норвегії — ABB Kraft AS та Corporate Research, у Швейцарії — Liaisons Electroniques Mecaniques [3, 5–7]. Інтенсивний розвиток напівпровідникової техніки, розширення її функціональних можливостей і зростання інтересу до перетворювальних пристроїв сприяли активному вдосконаленню систем генерування, у яких як електромеханічний перетворювач використовується асинхронна машина.

Проблематиці асинхронних генераторів присвячено значну кількість

наукових досліджень. Важливе місце в цих роботах займає вивчення фізичної природи процесу самозбудження, аналіз впливу параметрів електричної машини на область самозбудження, визначення робочих діапазонів частоти обертання і ємності батареї конденсаторів, а також розв'язання низки часткових задач, зумовлених практичними потребами експлуатації та проектування автономних енергетичних установок.

Разом із тим, незважаючи на значний обсяг виконаних досліджень, низка фундаментальних питань аналітичної теорії роботи асинхронних генераторів у перехідних і усталених режимах протягом тривалого часу залишалася недостатньо розробленою. Істотними труднощами були неможливість повного врахування впливу магнітного насичення, зміна частоти генерованої напруги, варіація параметрів блока збудження, а також відсутність єдиної аналітичної теорії, яка давала б змогу досліджувати функціонування енергетичних систем на базі асинхронних генераторів як у стаціонарних, так і в перехідних режимах. Зазначені обставини значною мірою стримували розвиток таких систем і обмежували розширення сфер їх практичного застосування.

1.2.1 Тракткування явища самозбудження асинхронних генераторів

Найбільша кількість досліджень, присвячених асинхронним генераторам, пов'язана з вивченням явища самозбудження [14]. У процесі розвитку теорії асинхронного генератора методологічні підходи до аналізу цього процесу, а також уявлення про його фізичну природу істотно змінювалися. У науковій літературі можна виокремити кілька основних інтерпретацій самозбудження: енергетичну, класичну, що ґрунтується на явищі залишкової намагніченості, а також трактування, засновані на уявленнях про класичний і параметричний резонанс.

Згідно з енергетичним трактуванням, самозбудження розглядається як процес, можливий за умови, що енергія, яка надходить до коливального контуру, перевищує втрати енергії в системі [21]. Однак це положення слід розглядати лише як необхідну, але недостатню умову виникнення самозбудження. Воно є

справедливим для широкого кола фізичних процесів і вказує лише на те, що за невиконання енергетичного балансу будь-які коливання в системі будуть загасати.

Класичне трактування самозбудження асинхронного генератора базується на уявленні про залишкову намагніченість магнітної системи електричної машини. За такого підходу процес збудження асинхронного генератора зіставляється з процесом самозбудження генератора постійного струму паралельного збудження, у якому залишковий магнітний потік є початковим чинником розвитку електромагнітного процесу. Передбачається, що під час обертання ротора під дією зовнішнього механічного моменту в обмотці статора індукуються електрорушійна сила, величина якої визначається залишковим магнітним потоком. У разі підключення до затискачів статора батареї конденсаторів струм, що протікає в статорному колі, створює додатковий магнітний потік, напрямлений узгоджено із залишковим потоком. Це спричиняє збільшення результуючого магнітного потоку і, відповідно, подальше зростання напруги. Розвиток процесу триває до досягнення робочої точки, яка визначається перетином характеристики холостого ходу асинхронного генератора з вольт-амперною характеристикою конденсаторної батареї.

Водночас таке трактування не повною мірою узгоджується з фізичною сутністю електромеханічного перетворення енергії в асинхронній машині. Якщо виходити з наведеного пояснення, залишковий магнітний потік мав би формувати магнітне поле статора, що синхронно обертається. Однак в асинхронній машині режим генерування можливий лише за наявності відмінності між частотою обертання ротора та частотою обертання магнітного поля, тобто за наявності ковзання. Отже, пояснення самозбудження виключно через дію залишкової намагніченості є недостатнім і потребує глибшого теоретичного обґрунтування.

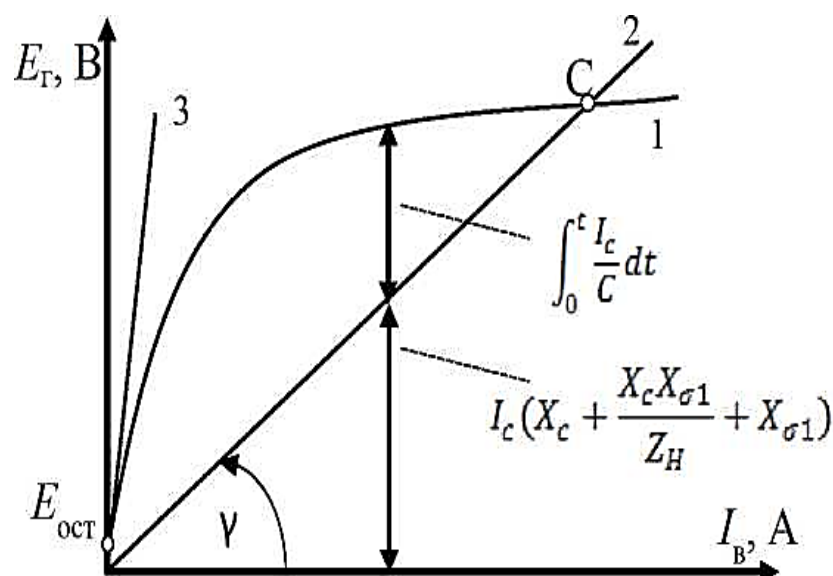


Рисунок 1.1. Характеристики асинхронного генератора: 1 - характеристика холостого ходу; 2 - вольтамперна характеристика конденсаторної батареї, 3 – критичне значення опору

У зазначеному експерименті генератор збуджувався за наявності гладкого немагнітного ротора, тоді як у разі значної залишкової намагніченості збудження, навпаки, не відбувалося. Більш того, асинхронні генератори зі спеціально намагніченим і розмагніченим ротором демонстрували однакові характеристики самозбудження, зокрема за частотою коливань, що виникають. Ці результати дозволяють зробити висновок про те, що залишкова намагніченість не є обов'язковою умовою виникнення самозбудження асинхронного генератора.

Разом про те залишковий магнітний потік вважатимуться повністю несуттєвим чинником. Його наявність здатна помітно інтенсифікувати процес формування напруги, що генерується, скоротити тривалість перехідного процесу самозбудження і зменшити величину енергії, яку необхідно внести в коливальний контур для запуску процесу збудження. Отже, залишкова намагніченість може розглядатися як фактор, що сприяє самозбудженню, але не як його обов'язкова фізична причина.

Відмова від класичного трактування, згідно з яким залишковий магнітний потік вважається необхідною передумовою самозбудження, обумовлює

необхідність більш глибокого аналізу реальних електромагнітних процесів, що визначають виникнення та розвиток даного явища в асинхронному генераторі.

Одна з наступних трактувань пов'язувала самозбудження з процесом звичайного резонансу лінійному індуктивно-ємнісному контурі. У цьому випадку резонанс розуміється як вибірковий відгук коливальної системи на зовнішній періодичний вплив, частота якого близька до частоти власних коливань системи. Для резонансного режиму характерне суттєве збільшення амплітуди вимушених коливань струму та напруги [9]. Саме явище резонансу вперше було описано Г. Галілеєм, а стосовно електромагнітних систем і коливальних контурів його розвиток отримав подальше теоретичне обґрунтування в працях Дж. Максвелла .

Для виникнення такого виду резонансу потрібна наявність незалежної збуджуючої ЕРС на затискачах статора, що працює на частоті власних коливань резонансного контуру:

$$f_{cob} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \quad (1.1)$$

де L – індуктивність АГ;

C – фазна ємність конденсатора.

Однак в автономних системах генерування електроенергії процес самозбудження асинхронного генератора спостерігався навіть за відсутності електродвигунів, що працюють у складі навантаження. Це переконливо свідчило про недостатню обґрунтованість зазначеного підходу до пояснення фізичної природи цього явища [8].

Найбільш обґрунтованим є трактування самозбудження асинхронного генератора як прояву параметричного резонансу — коливального процесу, що виникає внаслідок періодичної модуляції одного або кількох параметрів електричного контуру та набуває зростаючого характеру. Реалізація цього явища можлива за незначного перевищення частоти обертання ротора над частотою обертання магнітного поля. Найбільш виражено параметричний резонанс

проявляється за стрибкоподібною зміни реактивних елементів системи. При цьому можлива як окрема варіація індуктивності або ємності, так і їх спільна зміна, хоча одночасна модуляція реактивних параметрів не завжди є ефективнішою порівняно з їх окремою зміною.

Електрична машина може розглядатися як система з параметрами, що періодично змінюються. В асинхронній машині такими параметрами, здатними ініціювати параметричний резонанс, є індуктивні опори, величина яких залежить від взаємного розташування пазів статора та короткозамкнених стрижнів ротора. Істотною особливістю параметричного резонансу є відсутність потреби в постійному зовнішньому джерелі збуджувальної електрорушійної сили. Для виникнення процесу необхідні лише певний початковий запас енергії та періодична зміна величини реактивного параметра. Таким початковим енергетичним збуренням може бути залишковий магнітний потік машини, попередньо заряджений конденсатор або інше джерело початкової енергії. При цьому ефективність передавання енергії до коливального контуру значною мірою визначається глибиною модуляції відповідного реактивного параметра.

Математичний опис параметричного резонансу в асинхронному генераторі, що працює на навантаження, пов'язаний із суттєвими труднощами. Ці труднощі зумовлені громіздкістю отримуваних аналітичних виразів та складністю їх фізичної інтерпретації. Крім того, розглянуте явище тісно пов'язане з поняттям нестійкості за Ляпуновим. У роботах [19–23] здійснювалися спроби узагальненого опису цього процесу, однак переважно для режиму холостого ходу. Це пояснюється обмеженими можливостями обчислювальної техніки на момент проведення відповідних досліджень, оскільки аналіз параметричного резонансу приводить до систем диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами.

Розв'язання таких систем є складною математичною задачею і можливе лише для обмеженої кількості окремих випадків. В окремих ситуаціях застосовується перетворення Блонделя, яке дає змогу звести систему лінійних рівнянь зі змінними коефіцієнтами до системи диференціальних рівнянь із

постійними коефіцієнтами [21]. Однак цей підхід не повністю усуває труднощі, пов'язані з дослідженням навантаженого асинхронного генератора в реальних умовах експлуатації.

З позицій розглянутого трактування стійкість процесу генерування електроенергії визначається енергією, накопиченою в реактивних елементах електричного кола. Для підтримання та розвитку коливального процесу необхідно, щоб енергія, яка надходить до контуру, перевищувала її витрати. При цьому підведення енергії має бути узгоджене в часі з процесом її споживання. У результаті формується умова амплітудного балансу. Отже, збільшення енергії, запасеної в контурі, може бути забезпечене за рахунок стрибкоподібної зміни індуктивності, ємності або обох реактивних параметрів системи. Миттєві значення запасеної енергії в реактивних елементах конденсатор та котушка індуктивності визначаються відповідними виразами:

$$\begin{aligned} W_C &= \frac{q^2}{2C} = \frac{C \cdot U^2}{2}, \\ W_L &= \frac{\Phi^2}{2L} = \frac{L \cdot I^2}{2}, \end{aligned} \quad (1.2)$$

де C – ємність контуру;

L – індуктивність контуру;

I – величина сили струму;

U – напруга;

Φ – магнітний потік;

q – заряд між пластинами.

Баланс фаз визначається кратністю зміни параметра системи щодо частоти вільних коливань. Однак, можливі випадки параметричного резонансу при асинхронній зміні реактивних параметрів. Якщо при асинхронній зміні реактивності контур (рисунок 1.2) стійкий, то при синхронній зміні цей контур буде стійкішим. Оцінка стійкості коливань може бути визначена будь-яким із можливих критеріїв стійкості, так і іншими методами, наприклад прийомами енергетичного підходу.

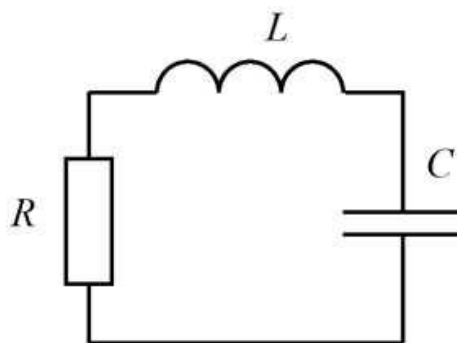


Рисунок 1.2. Послідовний резонансний контур

Збільшення енергії відбувається при максимальному запасі заряду на конденсаторі чи максимальному потоці індуктивності. Як відомо, під час роботи АГ немає варіації значення ємності конденсатора. Як зазначалося вище, варто вважати, що збудження пов'язане з періодичною зміною індуктивності електричної машини. Це співвідноситься з характерними для ЕМ параметрами, що періодично змінюються, за рахунок виражених пазів і зубців. З викладеного прояснюється механізм вкладення енергії контур шляхом зміни реактивних елементів. Для наростання коливань потрібно, щоб енергія, що вкладається в контур, перевершувала енергію, яка витрачається на втрати. Ця умова буде виконуватися за таких нерівностей:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta C}{C} &> \frac{\pi}{Q}, \\ \frac{\Delta L}{L} &> \frac{\pi}{Q}, \end{aligned} \quad (1.3)$$

де Q – добротність контуру;

ΔL , ΔC - зміна реактивного параметра індуктивності та ємності.

З наведеного співвідношення випливає, що необхідна глибина модуляції перебуває у прямій залежності від величини реактивного параметра та у зворотній залежності від добротності коливального контуру [22]. За виконання зазначених умов амплітуди струму й напруги, що виникають у системі, набувають зростаючого характеру. Це свідчить про розвиток параметричного

коливального процесу.

Для систем цього типу в лінійному наближенні може бути використаний принцип суперпозиції, який вказує на відсутність жорсткого однозначного зв'язку між амплітудою зовнішнього параметричного впливу та амплітудою вимушених коливань, що виникають у системі [10]. Іншими словами, зміна параметрів системи здатна ініціювати наростання коливань, інтенсивність яких визначається не лише рівнем зовнішнього впливу, а й внутрішніми властивостями самого коливального контуру.

Усталений режим роботи параметричних машин значною мірою визначається ступенем насичення магнітної системи. Саме магнітне насичення обмежує подальше зростання амплітуд струму та напруги, задаючи тим самим межі стаціонарного режиму. Унаслідок цього поведінка системи набуває нелінійного характеру, який необхідно враховувати під час аналізу процесів самозбудження та подальшого функціонування асинхронного генератора.

1.2.2 Математичне опис процесу самозбудження АГ

Крім дослідження фізичних процесів самозбудження асинхронного генератора, значна кількість наукових праць присвячена питанням моделювання його роботи та підвищення точності математичного опису електромеханічних процесів в асинхронній машині. Слід зазначити, що в більшості публікацій розв'язання задач моделювання ґрунтувалося на аналізі наявних схем заміщення, розробленні нових їх варіантів, а також на описі процесів електромеханічного перетворення енергії. Окрема частина досліджень була спрямована на розрахунок статичних характеристик із використанням графічних і графоаналітичних методів.

Для дослідження асинхронного генератора на основі аналізу запропонованих схем заміщення необхідно знати такі параметри: активні опори фаз статора, ротора та гілки намагнічування (R_1), (R_2), (R_m), а також відповідні індуктивні опори розсіювання і намагнічування (X_1), (X_2), (X_m) (рис. 1.3). Зазначені параметри є необхідними для моделювання перехідних

процесів, налаштування та регулювання системи збудження, розрахунку пускових режимів асинхронного генератора, аналізу його експлуатаційних режимів, а також визначення основних характеристик електричної машини.

У низці досліджень для підвищення точності опису електромеханічних процесів застосовуються ускладнені схеми заміщення. Однак використання таких схем потребує попереднього визначення їхніх параметрів, що можливе лише за наявності відомостей про геометричні розміри активної зони електричної машини та її обмотувальні дані. На практиці така інформація нерідко є недоступною для розробників електромеханічних систем, що суттєво ускладнює застосування деталізованих математичних моделей.

У зв'язку з цим у науково-технічній літературі представлено низку робіт, присвячених визначенню параметрів схем заміщення за допомогою розрахункових, експериментальних та ідентифікаційних методів. Розроблення таких підходів має важливе значення для підвищення точності математичного моделювання асинхронних генераторів, удосконалення методів аналізу їх робочих режимів і розширення можливостей практичного проектування автономних електромеханічних систем генерування електроенергії. [18].

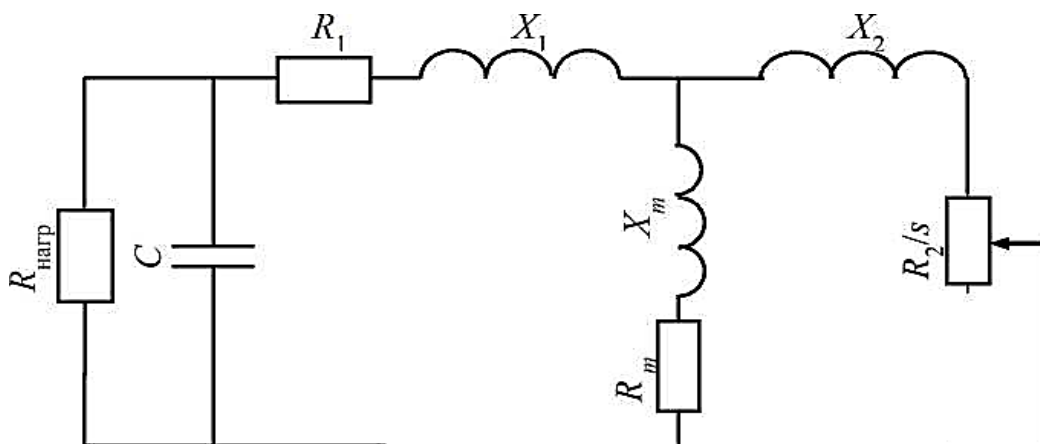


Рисунок 1.3. Т-подібна схема заміщення АГ з ємнісним збудженням, що працює на активне навантаження

Подібні методи забезпечували достатньо високу точність аналізу моделі асинхронного генератора в режимі холостого ходу. Однак під час переходу до розгляду роботи генератора на статичне активно-індуктивне або динамічне

навантаження математичний опис істотно ускладнювався. Унаслідок цього ставало проблематичним визначення умов самозбудження, необхідних для стійкого підтримання процесу генерування електричної енергії. В останні роки інтерес до математичного моделювання асинхронних генераторів знову посилюється. У низці опублікованих праць аналіз самозбудження виконувався на основі дослідження частотних характеристик асинхронного генератора, що працює спільно з батареєю конденсаторів. Сучасний рівень розвитку інформаційно-обчислювальної техніки дає змогу під час моделювання процесів генерування враховувати значно більшу кількість впливових чинників, що сприяє підвищенню достовірності отримуваних результатів.

Важливе значення для визначення параметрів схем заміщення та верифікації математичних моделей мають нормативні методи випробувань електричних машин. Так, ДСТУ 11828–86 поширюється на обертові електричні машини постійного та змінного струму без обмеження за потужністю, напругою і частотою та встановлює загальні методи випробувань, які застосовуються до електричних машин різних типів. При цьому спеціальні вимоги до випробування окремих типів машин мають визначатися технічними умовами на конкретні вироби. Слід зазначити, що дія цього стандарту не поширюється на електричні машини, які використовуються у бортових системах рухомих засобів наземного, водного та повітряного транспорту, а також на машини, для яких у встановленому порядку затверджено спеціальні вимоги. У межах зазначеного стандарту регламентовано методи вимірювання опору обмоток постійному струму, визначення обертових моментів і пускових струмів, що використовуються під час розрахунку параметрів схем заміщення [4].

Державний стандарт 7217-87 поширюється на трифазні асинхронні двигуни без обмеження за потужністю, напругою і частотою, а також на однофазні асинхронні двигуни та двигуни спеціального виконання тією мірою, якою передбачені в ньому методи випробувань можуть бути застосовані до машин цих типів. У стандарті наведено методи експериментального визначення параметрів схеми заміщення за результатами дослідів холостого ходу і короткого

замикання, а також способи визначення обертових моментів і частотних характеристик, які входять до складу розрахункових процедур встановлення параметрів еквівалентної схеми [6].

Інший підхід до математичного дослідження асинхронного генератора ґрунтується на описі трифазної машини з конденсаторним самозбудженням системою диференціальних рівнянь. Класичний метод, заснований на використанні систем диференціальних рівнянь, є найбільш загальним і універсальним, оскільки дає змогу описувати електромагнітні та електромеханічні процеси в їх взаємозв'язку. Завдяки своїй абстрактності математичні моделі широко застосовуються в системних дослідженнях і є ефективним інструментом аналізу режимів роботи складних технічних об'єктів.

Разом із тим будь-яка математична модель є ідеалізованим описом реального об'єкта. З цієї причини під час складання рівнянь і дослідження перехідних процесів зазвичай приймаються загальновживані припущення та обмеження, пов'язані з ідеалізацією властивостей електричної машини. Спрощення об'єкта неминуче зумовлює необхідність подальшого налаштування моделі на реальні умови функціонування. Зміст такого налаштування полягає у визначенні значень параметрів, за яких результати розрахунку найбільшою мірою відповідають експериментальним даним.

Математичний опис процесів електромеханічного перетворення енергії в електричних машинах ґрунтується на складанні та розв'язанні систем диференціальних рівнянь, що формуються на основі узагальнених законів Ома та Кірхгофа. Істотне ускладнення такої задачі зумовлене необхідністю врахування нелінійних явищ, зокрема магнітного насичення, витіснення струмів та інших чинників, які впливають на характер перебігу електромагнітних процесів. Порядок отримуваних рівнянь визначається кількістю взаємопов'язаних електромеханічних контурів, що розглядаються, а також наявністю нелінійностей у параметрах системи.

Робота асинхронного генератора під навантаженням може супроводжуватися несиметрією кіл статора і ротора. Унаслідок цього для

математичного аналізу доцільно використовувати систему рівнянь в осях α і β або в еквівалентній ортогональній системі координат. Перехід від реальної трифазної машини до її ідеалізованого математичного подання детально розроблений у загальній теорії електромеханічного перетворення енергії. У результаті відповідних перетворень вихідна трифазна система замінюється еквівалентною моделлю, що містить по дві взаємно ортогональні обмотки на статорі та роторі. Це істотно спрощує аналіз електромагнітних та електромеханічних процесів.

Під час побудови такої математичної моделі зазвичай приймається низка припущень, пов'язаних з ідеалізацією електромеханічного перетворювача. Передбачається, що в повітряному зазорі машини створюється кругове магнітне поле, відсутні вищі гармонічні складові магніторушійної сили та магнітного потоку, магнітна система працює в ненасиченому режимі, фазні обмотки є повністю симетричними, а втрати в сталі не враховуються. Такі припущення дають змогу отримати математичну модель, зручну для аналітичного дослідження та чисельного моделювання.

Для аналізу системи генерування у відносних одиницях систему рівнянь напруги асинхронної машини необхідно доповнити рівняннями електричної рівноваги зовнішніх контурів, що охоплюють коло навантаження та ємнісне коло збудження генератора. Такий підхід дає змогу розглядати асинхронний генератор як елемент складнішої енергетичної системи та досліджувати його функціонування з урахуванням взаємодії внутрішніх електромагнітних процесів машини з параметрами зовнішньої електричної схеми.

Наведемо рівняння струмів та напруг схеми трифазного асинхронного генератора при ємнісному збудженні та несиметрією ротора в α , β осях:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_H = u_A - u_B, \\ u_H = i_H R_H + \frac{L_H di_H}{dt}, \\ u_\alpha = \frac{2}{3} \left(u_A - \frac{u_B + u_C}{2} \right), \\ u_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} (u_B - u_C), \\ i_A + \frac{C_A du_A}{dt} - i_H = 0, \\ i_B - \frac{C_B du_B}{dt} - i_H = 0, \\ i_C = \frac{C_C du_C}{dt}, \\ i_A + i_B + i_C = 0, \\ i_H = \frac{u_H}{R_H}, \\ i_A = i_\alpha, \\ i_B = -\left(\frac{1}{2}\right) i_\alpha + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) i_\beta, \\ i_C = -\left(\frac{1}{2}\right) i_\alpha - \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) i_\beta. \end{array} \right. \quad (1.4)$$

Для вирішення систем диференціальних рівнянь, що описують динамічні процеси в електротехнічних об'єктах, широкого поширення набув метод Ейлера та його модифіковані різновиди. Разом з тим стосовно задач моделювання електротехнічних систем особливо часто використовуються методи Рунге-Кутти, оскільки вони забезпечують більш високу точність чисельного інтегрування при дослідженні перехідних процесів. У сучасних математичних пакетах, як правило, реалізовані методи другого, четвертого і вищих порядків, що дозволяє вибирати обчислювальну процедуру в залежності від необхідної точності та складності моделі, що досліджується.

Повна система диференціальних рівнянь, що описує перехідний процес трифазного асинхронного генератора, що працює на навантаження, включає рівняння для поточозчеплень, співвідношення, що визначають струми навантаження, вирази для зчеплення потоку в повітряному зазорі, а також рівняння миттєвих значень фазних напруг. Сукупний розгляд зазначених залежностей дозволяє адекватно описувати електромагнітні процеси в генераторі та дослідити особливості його функціонування у перехідних режимах

при різних параметрах навантаження та збудження:

$$\left\{ \begin{array}{l} p\Psi_{\alpha} = -u_{\alpha} - R_{\alpha}i_{\alpha}, \\ p\Psi_{\beta} = -u_{\beta} - R_{\beta}i_{\beta}, \\ p\Psi_{\alpha R} = w\Psi_{\beta R} - R_R i_{\alpha R}, \\ p\Psi_{\beta R} = -w\Psi_{\alpha R} - R_R i_{\beta R}, \\ i_{\alpha} = \frac{\Psi_{\delta\alpha}}{x_m} - i_{\alpha R}, \\ i_{\beta} = \frac{\Psi_{\delta\beta}}{x_m} - i_{\beta R}, \\ i_{\alpha R} = \frac{1}{x_{\delta R}}(\Psi_{\alpha R} - \Psi_{\delta\alpha}), \\ i_{\beta R} = \frac{1}{x_{\delta R}}(\Psi_{\beta R} - \Psi_{\delta\beta}), \\ \Psi_{\delta\alpha} = \Psi_{\alpha} - x_{\delta s}i_{\alpha}, \\ \Psi_{\delta\beta} = \Psi_{\beta} - x_{\delta s}i_{\beta}, \\ pu_A = x_{CA}(i_A - i_H), \\ pu_B = x_{CB}(i_B + i_H), \\ pu_C = x_C i_C. \end{array} \right. \quad (1.5)$$

Таким чином, повна система рівнянь електромеханічних перехідних процесів трифазного асинхронного генератора описується виразами (4) (5). У цій моделі не враховується насичення магнітного кола. Однак застосована форма виразів для струмів дозволяє здійснити як одночасний, так і глибокий облік насичення шляхом основного магнітного потоку і шляху потоків розсіювання статора і ротора. Для обліку насичення магнітного потоку потрібно вирази струмів i_a , i_r використовувати залежні від насичення значення опору взаємодукції x_m , яке може бути визначено за кривою намагнічування машини в залежності від результуючого потокозчеплення в повітряному зазорі машини.

Слід зазначити, що моделі не враховують геометрію ротора, що в певній мірі обмежує можливості точного визначення електричних параметрів рухомої частини машини. Проте прийняті математичні уявлення дозволяють розраховувати реальні значення струмів у роторних стрижнях, і навіть вирішувати завдання, пов'язані з регулюванням частоти обертання електричної машини з фазним ротором і визначенням граничного навантаження

асинхронного двигуна.

1.2.3 Способи збудження асинхронних генераторів

Під час роботи асинхронної машини в генераторному режимі виникає потреба у створенні намагнічувального струму, необхідного для формування магнітного потоку збудження. У зв'язку з цим для забезпечення процесу генерування електроенергії необхідне зовнішнє джерело реактивної потужності. За відсутності початкового магнітного поля збудження асинхронного генератора може бути реалізоване за допомогою конденсаторів, підключених паралельно до фаз статорної обмотки, або шляхом використання напівпровідникових перетворювачів енергії, які можуть вмикатися як у статорне, так і в роторне коло.

Конденсаторне самозбудження асинхронної машини здійснюється шляхом підключення батареї конденсаторів до статорної обмотки. У цьому випадку конденсатори виконують функцію джерела реактивної потужності, необхідної для створення магнітного поля, підтримання намагнічувального струму та подальшого розвитку процесу генерування електричної енергії (Рисунок 1.4).

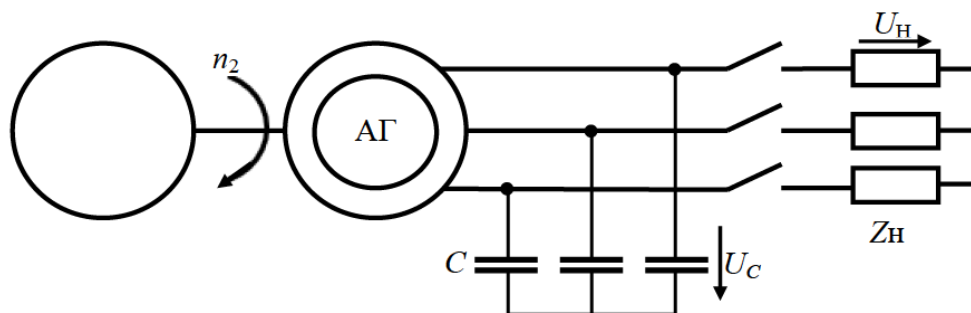


Рисунок 1.4. Принципова схема АГ з конденсаторним збудженням

Дослідження процесу конденсаторного самозбудження асинхронної машини в часовій області є досить складною задачею, оскільки під час розв'язання відповідних диференціальних рівнянь необхідно враховувати насичення магнітної системи. Саме потреба в урахуванні цього чинника істотно ускладнює математичний опис перехідних процесів і зменшує можливість

отримання простих аналітичних залежностей.

Протягом тривалого часу необхідність застосування батареї конденсаторів залишалася одним з основних чинників, що обмежували широке використання асинхронних генераторів. Це пояснюється тим, що конденсаторна батарея не лише збільшує масу, габаритні розміри та вартість генераторної установки, а й не забезпечує достатньо ефективного регулювання амплітуди та частоти генерованої напруги.

Додатковою особливістю є те, що ємність фазного конденсатора, необхідна для виникнення процесу самозбудження, має перебувати в певному діапазоні, обмеженому нижньою та верхньою межами. Вихід значення ємності за межі зазначеної області призводить до порушення умов збудження та зриву процесу генерування електроенергії. Унаслідок цього вибір параметрів батареї конденсаторів потребує ретельного розрахункового обґрунтування з урахуванням характеристик електричної машини та режиму її роботи [23].

Використання конденсаторного збудження пов'язане з низкою умов та особливостей. По-перше, для реалізації процесу самозбудження необхідно застосовувати конденсатор, ємність якого перевищує певне критичне значення. Загальна ємність батареї конденсаторів за схемою з'єднання «трикутник», необхідна для збудження асинхронного генератора, може бути описана співвідношенням: $C > 1/\omega x_1$ де x_1 і ω - відповідно індуктивний опір статора асинхронної машини і частота обертання .

Під час роботи асинхронного генератора на активно-ємнісе навантаження необхідна для самозбудження ємність батареї конденсаторів зменшується пропорційно величині реактивної провідності навантаження. Навпаки, за активно-індуктивного характеру навантаження, порівняно з режимом холостого ходу, для забезпечення самозбудження необхідно збільшувати ємність фазних конденсаторів. Отже, характер навантаження безпосередньо впливає на параметри вихідної напруги генератора, що слід враховувати під час вибору умов його експлуатації.

Протягом тривалого часу необхідна ємність конденсаторної батареї як для

режиму холостого ходу, так і для роботи під навантаженням визначалася переважно емпіричним шляхом. Це зумовлювало необхідність використання довідкових даних, отриманих на основі експериментальних досліджень. Приклад такого довідкового матеріалу наведено в таблиці 1.3.

Надалі була встановлена залежність фазної ємності батареї конденсаторів, необхідної для самозбудження асинхронного генератора до заданого рівня напруги при номінальній частоті обертання ротора від параметрів вихідної напруги в режимі холостого ходу. Значення фазної ємності (мкФ), що забезпечує збудження асинхронного генератора в режимі холостого ходу визначається таким виразом:

$$C_{\phi} = \frac{I_{xx} \cdot \sin \varphi \cdot 10^6}{\omega \cdot U_{xx}} \quad (1.6)$$

де $I_{xx} U_{xx}$ - струм і напруга холостого ходу генератора ;

ω – частота обертання ротора.

Таблиця 1.3. Ємність фазних конденсаторів асинхронних генераторів з числом пар полюсів $p = 2$

Потужність генератора, кВт	Необхідна для збудження ємність конденсатора, мкФ		
	XX	Номінальне навантаження	
		$\cos \varphi = 1$	$\cos \varphi = 0,8$
2	28	36	60
5	60	75	138
7	74	98	182
10	92	130	245
15	120	172	342

Інша залежність, що дозволяє розрахувати величину фазної ємності в залежності від необхідної напруги та частоти обертання, визначається формулою:

$$C = \frac{1-s}{\Omega} \cdot \frac{I}{U} \quad (1.7)$$

де Ω – кутова частота обертання ротора;

I, U - номінальні параметри вихідного струму та напруги;

S – ковзання.

По-друге, наявність залишкового магнітного потоку в машині чи початкової напруги на конденсаторах сприяє скороченню часу збудження генератора. При конденсаторному збудженні асинхронного генератора нерідко спостерігається помітне підвищення напруги з його затискачів, що зумовлює необхідність оцінки зміни магнітного опору магнітопровода. Така оцінка може бути виконана на основі параметрів гілки намагнічування еквівалентної Т-подібної схеми заміщення електричної машини.

По-третє, процес наростання напруги пов'язаний із коливальним обміном енергією між електричною машиною та електричним полем батареї конденсаторів. Частина енергії магнітного поля витрачається заряд конденсаторної батареї. При цьому амплітуда результуючого вектора магнітного потоку в повітряному проміжку пропорційна максимальній енергії, що запасється в системі. Зростання струму та напруги не є необмеженим, оскільки зі збільшенням рівня збудження починає проявлятися нелінійність магнітної системи, обумовлена насиченням сталі. Режим, що встановився, настає в той момент, коли вся енергія, що відповідає механічному моменту на валу ротора, розсіюється в електромагнітних ланцюгах машини. З урахуванням зазначених особливостей особливого значення набуває дослідження стійкості роботи систем генерування електроенергії.

По-четверте, істотний вплив на величину вихідної напруги надає схема з'єднання фаз електричної машини та батареї конденсаторів. Так, при перемиканні обмотки статора зі схеми трикутник на схему зірка значення фазної

ємності змінюється в 1,73 рази. Це призводить до зміни кута нахилу вольт-амперної характеристики конденсатора щодо осі струму, зміщення точки її перетину з кривою намагнічування і, як наслідок, зміну величини індукованої електрорушійної сили. При такому перемиканні напруга зростає не строго в 1,73 рази, як це характерно для синхронних генераторів, а пропорційно величині 1,73 К, де коефіцієнт К визначається параметрами схеми заміщення і кутової швидкістю обертання ротора електричної машини.

Однією з найважливіших завдань під час експлуатації асинхронних генераторів є забезпечення стабільної частоти вихідної напруги за умов зміни частоти обертання і навантаження. Це завдання ще більше ускладнюється при необхідності паралельної роботи кількох генераторів або їхньої спільної роботи з електричною мережею. Зміна навантаження при постійній частоті обертання призводить до відхилення як частоти, і амплітуди синусоїдальної напруги. Компенсація відхилення частоти може бути досягнута шляхом регулювання швидкості обертання ротора або зміни величини ковзання. Практична реалізація таких способів можлива, наприклад, рахунок застосування автобаласного навантаження, що впливає на ковзання машини. Підтримка постійної частоти при змінній швидкості обертання ротора може бути забезпечено використанням приводу постійної швидкості, або застосуванням послідовного перетворення енергії змінного струму в постійний і назад. Однак обидва зазначені підходи призводять до ускладнення системи, збільшення її вартості та зниження загальної експлуатаційної надійності.

Не менш складним завданням є стабілізація амплітуди напруги асинхронного генератора із батареєю конденсаторів. Для її вирішення необхідно змінювати величину збуджуючої реактивної потужності шляхом варіювання ємності конденсаторної батареї. В одній із запропонованих схем (рисунк 1.5) поряд з основною батареєю конденсаторів застосовуються додаткові конденсатори, що підключаються паралельно або послідовно до навантаження. Таке рішення забезпечує підведення додаткової реактивної потужності. При цьому ємність основної батареї визначається виходячи з умов роботи генератора

в режимі холостого ходу, тоді як додаткова ємність забезпечує можливість самозбудження генератора при навантаженні близької до номінальної.

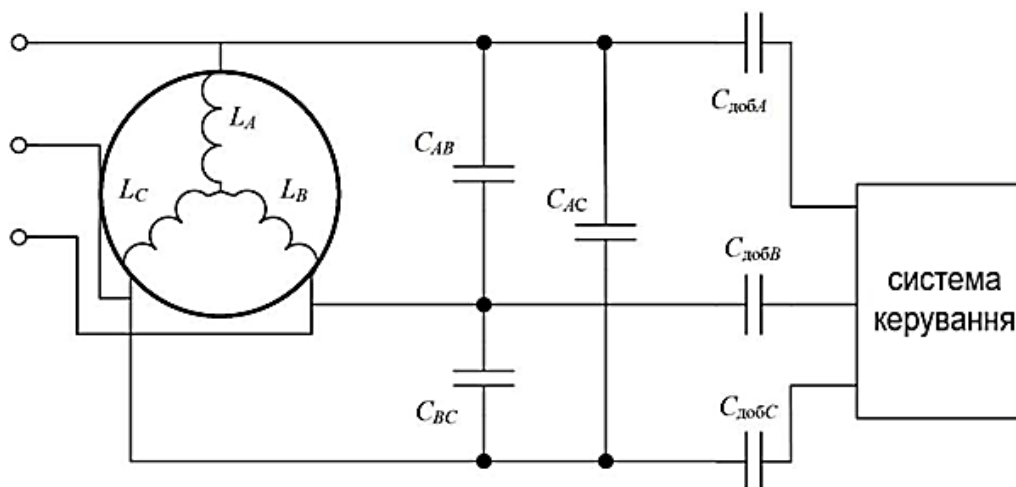


Рисунок 1.5. Схема стабілізації напруги та частоти АГ

Розглянута схема забезпечує стійке самозбудження асинхронного генератора в усьому номінальному діапазоні навантажень, а також високий рівень стабілізації генерованої напруги як за амплітудою, так і за частотою.

Поряд із ємнісними схемами стабілізації застосовуються також пристрої, у яких регулювання реактивного струму здійснюється за рахунок спільного використання конденсаторів і насичуваних дроселів, що компенсують реактивну потужність конденсаторної батареї асинхронного генератора. У таких системах вибір основної батареї конденсаторів здійснюється з урахуванням потреби в реактивній енергії за максимально можливого навантаження генератора. Водночас таке технічне рішення має низку суттєвих недоліків. До них належать наявність нелінійних елементів, які ускладнюють налаштування та керування системою, а також збільшення маси пристрою стабілізації внаслідок застосування дроселів, призначених для компенсації надлишкової реактивної потужності.

Таким чином, конденсаторне збудження асинхронного генератора супроводжується низкою характерних труднощів, пов'язаних насамперед із регулюванням електричних параметрів вихідної напруги. Необхідність розв'язання цих задач значною мірою знижує переваги асинхронного генератора

як електричної машини, зокрема його конструктивну простоту, надійність та відносно сприятливі масогабаритні показники.

Як альтернативне джерело реактивної потужності може бути використаний автономний інвертор напруги. У складі системи генерування він здатний виконувати функцію компенсатора індуктивної реактивної потужності, необхідної для роботи асинхронного генератора (рис. 1.6), а за певного значення коефіцієнта потужності — також функціонувати в режимі випрямляча [19]. Для забезпечення необхідних параметрів вихідної напруги в такій системі необхідно застосовувати зворотні зв'язки, які впливають на алгоритм керування та забезпечують регулювання фазового зсуву й амплітуди струму збудження.

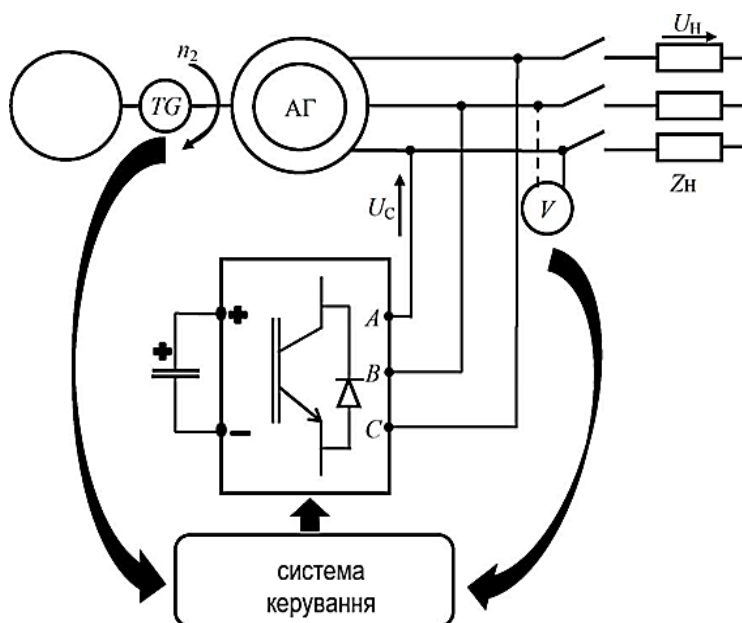


Рисунок 1.6. Принципова схема АГ з інверторним збудженням та контролем частоти обертання ротора, вихідної напруги

Перший генератор, збудження якого здійснювалося від напівпровідникового тиристорного перетворювача частоти, був випущений фірмою Siemens AG у 1969 році та використовувався для живлення тягових двигунів електровоза. Уже в 1972 році компанією Westinghouse Electric Corporation було розроблено асинхронний генератор, у якому функції джерела реактивної енергії виконував безпосередній перетворювач частоти, підключений до статорного кола електричної машини [2–5]. Поява та подальше вдосконалення

сучасних напівпровідникових елементів створили передумови для подальшого розвитку асинхронних генераторів цього типу.

Протягом тривалого часу генератори зі збудженням від напівпровідникового перетворювача, зокрема інвертора напруги, застосовувалися переважно у поєднанні з асинхронними машинами з короткозамкненим ротором. Подальший розвиток алгоритмів керування дав змогу використовувати безпосередні перетворювачі частоти також у генераторах із фазним ротором, що забезпечувало можливість отримання напруги сталої частоти в широкому діапазоні зміни частоти обертання ротора. Однак цей тип генераторів, у яких збудження підводилося до фазного ротора, не набув широкого поширення через складність побудови системи керування. Крім того, застосування асинхронної машини з фазним ротором значною мірою нівелює одну з основних переваг асинхронного генератора — відсутність контактних струмознімальних вузлів.

Використання напівпровідникової техніки в асинхронних генераторах із короткозамкненим ротором відкрило можливості для ефективного регулювання параметрів генерованої електроенергії за нестабільної частоти обертання та змінного навантаження. Стабілізація частоти й напруги за інверторного збудження може здійснюватися шляхом зміни фазового зсуву струму відносно напруги, а також регулюванням частоти та амплітуди збуджувального струму.

Додаткові переваги забезпечує застосування частотних перетворювачів, випрямляча та інвертора у складі єдиного перетворювального комплексу типу АС–DC–АС. Така структура практично повністю розв'язує задачу підтримання сталих значень амплітуди й частоти генерованої електроенергії, оскільки параметри вихідної напруги інвертора в цьому випадку визначаються переважно системою керування. Формування вихідної напруги, форма якої максимально наближена до синусоїдальної, не становить істотних труднощів за умови використання широтно-імпульсної модуляції. Вищі гармонічні складові, що виникають за такого способу формування сигналу, можуть бути пригнічені за допомогою порівняно простих фільтрів, що дає змогу знизити коефіцієнт

гармонічних спотворень до прийнятного рівня. Висока якість і стабільність вихідної напруги, у свою чергу, створюють умови для паралельної роботи генераторів між собою, а також для їхньої спільної роботи з електричною мережею.

Висновки до 1 глави.

1. В автономних системах генерування електроенергії доцільно розглядати асинхронні машини з короткозамкненим ротором як ефективні електромеханічні перетворювачі енергії. Інтерес до машин цього типу зумовлений сукупністю їхніх конструктивних та експлуатаційних переваг, до яких належать висока надійність, сприятливі масогабаритні й енергетичні показники, здатність до самозбудження, а також порівняно проста організація паралельної роботи як між окремими асинхронними генераторами, так і за їх спільного функціонування з електричною мережею.

2. Процес самозбудження асинхронного генератора слід розглядати як наслідок динамічної нестійкості електромеханічної системи. Обмеження зростання коливань при цьому зумовлюється нелінійністю магнітної системи, передусім її насиченням. Дослідження цього явища доцільно здійснювати на основі аналізу систем диференціальних рівнянь, які враховують насичення сталі, а також із застосуванням частотних методів, зокрема побудови та дослідження годографа на комплексній площині.

3. Аналіз диференціальних рівнянь і частотних характеристик дає змогу встановити необхідні умови самозбудження асинхронного генератора, всебічно дослідити електромагнітні процеси в системі та визначити критичні режими навантаження. Для забезпечення гарантованого збудження генератора і вибору раціональних способів регулювання параметрів генерованої напруги необхідно дослідити сам процес самозбудження, визначити його граничні умови та оцінити ступінь впливу чинників, що визначають характер і стійкість перебігу цього процесу.

ГЛАВА 2 . ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ САМОВОЗБУДЖЕННЯ І СТІЙКОСТІ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ВІТРОГЕНЕРАТОРА

Теорія електромеханічних систем сформувалася як узагальнення фундаментальних положень і закономірностей, що дають змогу застосовувати класичні методи аналізу до електротехнічних об'єктів з метою дослідження властивостей, параметрів та режимів функціонування складних технічних систем. На сучасному етапі методологія вибору науково-технічних рішень охоплює широкий спектр підходів до проєктування електромеханічних систем [4]. Вибір конкретного способу проєктування, як правило, визначається необхідністю отримання результату, що відповідає вихідним технічним вимогам, за умови забезпечення достатньої точності та раціональної трудомісткості розрахунків.

До основних методів отримання необхідних характеристик електромеханічних систем належать аналітичний опис процесів на основі систем диференціальних рівнянь, а також візуально-імітаційне моделювання структурних схем із використанням спеціалізованих пакетів прикладних програм. Зазначені підходи дають змогу досліджувати як усталені, так і перехідні режими роботи, а також оцінювати вплив параметрів окремих елементів на поведінку системи загалом.

Умови та режими самозбудження генераторів, зокрема асинхронних машин і генераторів постійного струму, розглядаються в багатьох наукових статтях, підручниках і монографіях з електричних машин, зокрема в роботах [8]. Однак виведення відповідних умов у більшості випадків має подібний характер і значною мірою ґрунтується на евристичних підходах. Фактично електромеханічні системи генерування електроенергії, здатні до самозбудження, підпорядковуються загальним закономірностям теорії стійкості. Їх функціонування визначається виконанням умов балансу фаз і амплітуд, наявністю контурів позитивного зворотного зв'язку та коефіцієнта петльового підсилення, що перевищує одиницю. Подібні ознаки характерні не лише для

електротехнічних об'єктів, а й для систем іншої фізичної природи.

Цей розділ присвячено питанням математичного опису та моделювання асинхронного генератора відповідно до схеми заміщення, наведеної на рис. 1.3. Параметри схеми заміщення визначено за алгоритмом, запропонованим у роботі [16], стосовно електричних машин середньої потужності з урахуванням рекомендацій [17].

2.1 Метод імітаційного моделювання для опису електромеханічних систем

Сучасний етап розвитку електротехнічної промисловості характеризується не лише ускладненням електромеханічних систем, а й зростанням кількості функціональних зв'язків та взаємодій між їх окремими вузлами і підсистемами. За таких умов особливої значущості набувають методи моделювання, які дають змогу досліджувати структуру, динаміку та режими функціонування складних технічних об'єктів ще на етапах їх проєктування й аналізу.

Одним із найбільш доступних і широко застосовуваних підходів є метод візуального моделювання. Його сутність полягає в поетапному відтворенні процесів перетворення сигналів, енергії та керуючих впливів із використанням структурних блоків, кожен з яких має певне функціональне призначення. Такий підхід дає змогу формувати модель досліджуваного об'єкта в наочній формі та суттєво спрощує аналіз взаємозв'язків між елементами системи.

До основних переваг візуального моделювання належать висока швидкість розроблення моделей, зручність їх модифікації, а також можливість проведення обчислювальних експериментів у темпі, близькому до реального часу або такому, що перевищує його. Важливе значення має також наявність спеціалізованих мов і середовищ візуального моделювання, які істотно спрощують процес створення програмних моделей порівняно з використанням універсальних мов програмування.

На сучасному етапі в різних галузях техніки та управління застосовуються різноманітні мови й нотації візуального моделювання. Найбільш відомими серед

них є BPMN та UML. Поряд із цим існують інші засоби моделювання, орієнтовані на спеціалізовані сфери застосування, зокрема моделювання телекомунікаційних систем, організаційних структур і бізнес-процесів. До таких засобів належать SADT/IDEF0, IDEF1x, SDL, MSC та інші.

Стосовно задач дослідження електромеханічних систем найбільшого поширення набуло середовище Simulink, яке є інструментом візуального моделювання, заснованим на використанні стандартних блок-діаграм. Це середовище дає змогу будувати моделі динамічних систем різної природи, зокрема безперервних, дискретних і нелінійних об'єктів. Суттєвою перевагою Simulink є поєднання відносної простоти освоєння з широкими функціональними можливостями. Використання стандартних бібліотек забезпечує моделювання механічних, електротехнічних, силових і гідравлічних систем, а також реалізацію розвинуеного модельно-орієнтованого підходу під час проєктування систем керування.

Додатковою перевагою сучасних програмних засобів є наявність розширень, що забезпечують повний цикл розроблення моделей — від їх побудови й аналізу до тестування, верифікації та автоматичної генерації програмного коду для реалізації на нижньому рівні керування. Це робить візуальне моделювання важливим інструментом дослідження та проєктування сучасних електромеханічних систем [10].

2.2 Опис електромеханічних систем з позицій теорії автоматичного керування

Одним із найбільш загальних підходів до моделювання науково-технічних систем є застосування методів теорії автоматичного керування. Їх використання дає змогу описувати динамічні об'єкти як у безперервному, так і в дискретному часі, що робить цей математичний апарат універсальним засобом дослідження процесів функціонування складних технічних систем.

Для реалізації моделі, яка відтворює поведінку системи в часі, необхідно побудувати її функціональну схему, у якій окремі елементи подаються

відповідно до їхнього призначення з використанням типових ланок теорії автоматичного керування. До таких ланок належать безінерційні, аперіодичні ланки першого та другого порядку, диференціювальні, інтегрувальні та інші стандартні елементи. У межах такого підходу процес перетворення в системі описується як послідовність елементарних явищ і впливів, що формують її логічну та часову структуру.

Таке подання дає змогу отримувати інформацію про стан системи в будь-який заданий момент часу, а також оцінювати її характеристики на різних етапах перетворення енергії, сигналів або керуючих впливів. Отже, методи теорії автоматичного керування забезпечують можливість аналізу не лише усталених режимів, а й перехідних процесів, що має особливе значення під час дослідження електромеханічних систем.

Разом із тим застосування цього підходу потребує глибокого розуміння фізичних процесів, що відбуваються в об'єкті, та їх адекватного математичного опису. Необхідною умовою є також знання закономірностей перетворення фізичних величин під час функціонування системи. У процесі моделювання складних об'єктів особливого значення набуває системний підхід, який передбачає поділ вихідної системи на простіші функціональні вузли. Це дає змогу виконувати точніше налаштування моделі, аналізувати кожен етап перетворення окремо і, зрештою, формувати достовірне уявлення про роботу системи загалом.

2.2.1 Визначення умов самозбудження АГ

Визначення умов генерування електроенергії не завжди потребує безпосереднього розв'язання складних систем диференціальних рівнянь. Одним із найбільш наочних і зручних з погляду подання моделі є апарат теорії автоматичного керування. Побудова структурної схеми в межах цього підходу потребує розуміння процесів перетворення енергії та характеру взаємодії між основними контурами досліджуваного об'єкта.

Разом із тим методи теорії автоматичного керування дають змогу

описувати роботу системи в узагальненій формі, враховуючи лише найбільш суттєві чинники, що впливають на її функціонування. Використання цього підходу створює можливість формування структурної схеми об'єкта дослідження з метою визначення необхідних характеристик системи та аналізу умов її стійкої роботи.

Як відомо, класична схема асинхронного генератора містить батарею конденсаторів, яка виконує функцію джерела реактивної енергії. Асинхронний генератор як електромеханічна система поєднує електричний і магнітний контури, забезпечуючи зв'язок між механічним рухом ротора та процесом наростання електромагнітних коливань. Саме ця взаємодія визначає умови виникнення самозбудження та подальшого підтримання процесу генерування електричної енергії.

Для побудови структурної схеми асинхронного генератора доцільно використовувати рівняння струмів і напруги, записані в операторній формі. Електромагнітні процеси в симетричному асинхронному генераторі з конденсаторним збудженням описуються системою рівнянь (8), отриманої за таких припущень:

- Привідний двигун володіє нескінченно великою потужністю, а частота обертання ротора приймається постійною;
- на процес збудження впливають реактивні елементи схеми - індуктивні опори ланцюга намагнічування, розсіювання статора X_{cl} і повний опір навантаження Z_H , ємнісний опір збуджуючих конденсаторів X_C ;
- навантаження генератора не перевищує критичного значення генерації, що призводить до зриву $\{[R_2(s)](Z_H)\} < Z_H^*$.

$$\begin{aligned} i_C &= C \frac{du_C}{dt}, \\ i_{ct} &= i_C + i_H, \\ u_H &= u_C = \frac{d\psi_{ct}}{dt} - i_{ct} R_{ct} - L_{\sigma 1} \frac{di_{ct}}{dt} \end{aligned} \quad (2.1)$$

де $u_C, u_H(i_C, i_H)$ - напруги (струми) на конденсаторі та навантаженні;

A_{ct}, L_{cl} - активний опір та індуктивність обмотки статора;

Z_H^* – критична величина опору.

Наведена система відповідає структурної схеми "на фазу", представленої рисунку 1.3. Наявність енергії в системі, наприклад, як залишковий магнітний потік $\Phi_{ост}$ призводить при обертанні ротора до виникнення ЕРС E_z на виході генератора, що за принципом генерування електроенергії в машинах змінного струму обумовлюється швидкістю зміни магнітного потоку, пов'язане з частотою обертання ротора:

$$E_{\Gamma} = -\frac{d\Phi_{ост}}{dt} = C_{AG} \omega_{рот} \Phi_{ост} \quad (2.2)$$

де C_{AG} – конструктивний коефіцієнт, що характеризує АГ.

Процес самозбудження характеризується балансом фаз та амплітуд. Наявність батареї конденсаторів, представленої ланкою $-Kc^*p$ сприяє створенню контуру позитивного зворотного зв'язку по магнітному потоку. Виникає ємнісний струм збудження, пройшовши по обмотці статора з числом витків $\omega_{ст}$, створює магніторушуючу силу F і відповідний магнітний потік Φ в наведеній схемі (див. Рисунок 2.1). Амплітуда потоку та ЕРС обмежуються за рахунок нелінійності характеристики намагнічування генератора $\Phi(F)$. Умова балансу амплітуд у разі характеризується коефіцієнтом петльового посилення більше одиниці, чому сприяє ємнісний струм, який у кола ротора "підтримує" розвиток магнітного потоку. Таким чином, отримуємо структурну схему АГ [11]. У представлених схемах $p = d/dt$ – оператор диференціювання за часом.

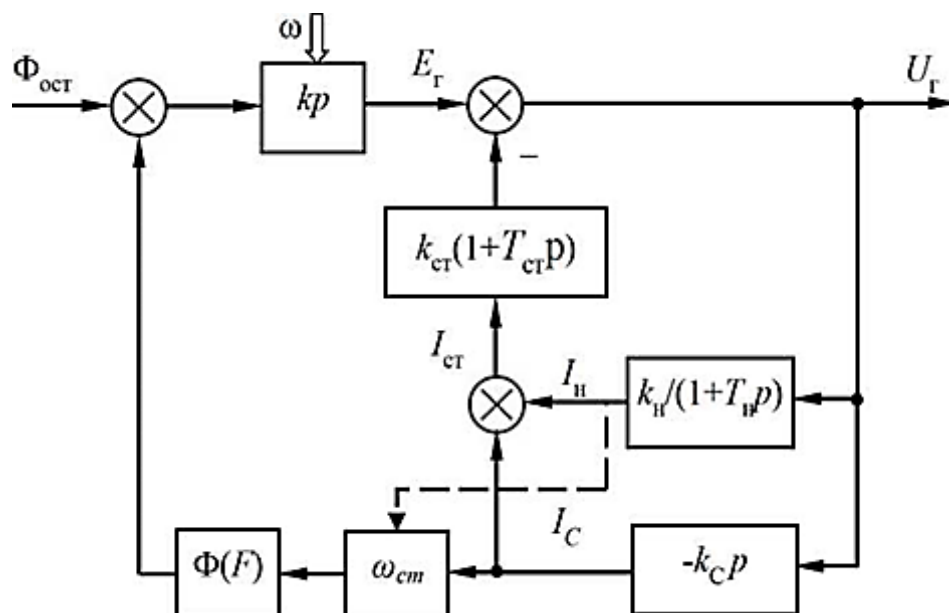


Рисунок 2.1. Структурна схема АГ із позиції ТАУ

Визначення коефіцієнта петльового посилення здійснимо з передавальної функції структурної схеми АГ. Для зручності перетворення застосуємо умовне позначення представлених ланок структурної схеми АГ. У таблиці 2.1. наведено позначення та призначення елементів, що використовуються у структурній схемі та математичних виразах.

Таблиця 2.1 – Умовні позначення ланок структурної схеми АГ

Вихідна ланка	kp	$\frac{1}{n} \left(1 + \frac{T_{ст} p}{n} \right)$	$\frac{1}{n} \left(1 + \frac{T_{н} p}{n} \right)$	$- \frac{1}{n} P$	$\Phi(C_{ст})$
Умовне позначення	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
Фізичне значення	$C_{АГ} \text{ ®}$	$\Gamma_{ст} + \frac{1}{n} \text{ стор}$	$A_{н} + L_{н} - P$	$з P$	$n_{ст} \cdot \frac{1}{n} \text{ до } \Gamma_{н}$
Перетворення або призначення, що виконується	ЕРС - обертання від $\Phi_{ост}$	Падіння напруги на опорі - статора	Падіння напруги на активно - індуктивному навантаженні	Фазний - конденсатор збудження	Функція намагнічування

Використання умовних позначень скорочує математичні викладки,

дозволяє швидко та узагальнено описати досліджуваний об'єкт. Це надалі дає можливість без зайвих зусиль модернізувати предмет дослідження введенням додаткових або заміною функціональних ланок, що використовуються, на будь-якому етапі перетворення енергії.

На рисунку 2.2 наведено схему АГ з позиції теорії автоматичного управління в умовних позначеннях. Враховуючи напрямки струмів та знаків зворотних зв'язків, цю схему можна перетворити на вигляд, представлений на рисунку 2.3.

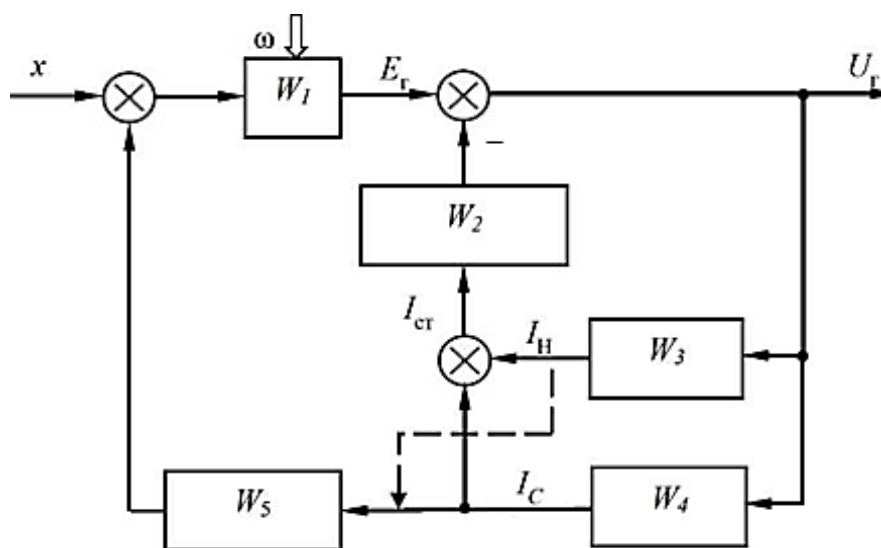


Рисунок 2.2. Структурна схема АГ із позиції ТАУ

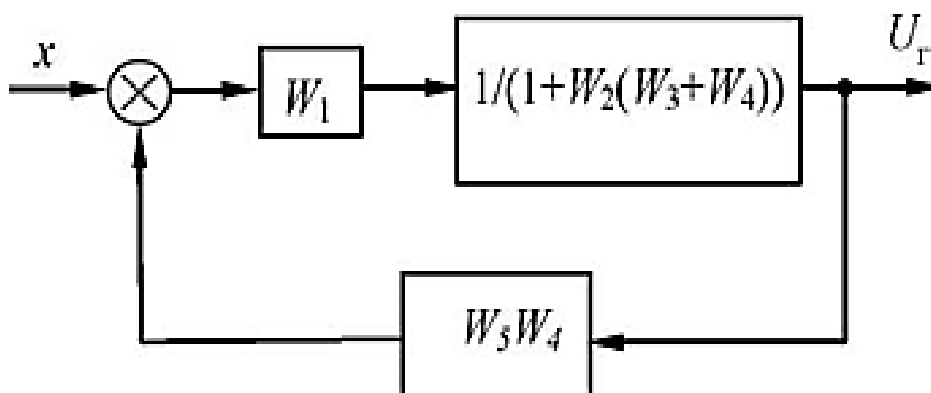


Рисунок 2.3. Перетворена структурна схема АГ із позиції ТАУ

Загальна передатна функція такого об'єкта визначається виразом:

$$W_{\text{заг}} = \frac{\frac{W_1}{1 + W_2(W_3 + W_4)}}{1 - \frac{W_1 W_4 W_5}{1 + W_2(W_3 + W_4)}} \quad (2.3)$$

Спростивши вираз (2.3), отримаємо вигляд:

$$W_{\text{загальне}} = \frac{W_1}{1 + W_2(W_3 + W_4) - W_1 W_4 W_5} \quad (2.4)$$

Коливальний процес об'єкта, що має передатну функцію такого типу, матиме наростаючий характер, якщо знаменник цієї функції буде менше одиниці або негативний. Найбільше значення передавальна функція матиме при знаменнику нуль. Дане формулювання у символічному вигляді відображається таким виразом:

$$W_1 \cdot W_4 \cdot W_5 \geq 1 + W_2(W_3 + W_4) \quad (2.5)$$

Первинний аналіз отриманої нерівності показує, що виконання умови самозбудження визначається трьома основними чинниками, що забезпечують достатнє значення коефіцієнта петльового посилення. До них відносяться частота обертання ротора, величина збудливої ємності фазного конденсатора та характер кривої намагнічування електричної машини. Саме сукупний вплив цих параметрів формує передумови для виникнення та сталого розвитку процесу самозбудження.

Отриманий результат добре узгоджується з даними практичних досліджень, згідно з якими основними умовами збудження асинхронного генератора є частота обертання ротора та ємність конденсаторної батареї. При цьому обидва вказані параметри повинні перебувати в певних межах, за межами яких процес збудження або не виникає або виявляється нестійким.

Після виконання зворотного переходу у виразі (2.5) від умовних позначень до вихідних параметрів, наведених у таблиці 2.1, отримуємо наступний вираз:

$$w_{\text{рот}} \cdot C_{\text{АГ}} \cdot C_p \cdot \frac{\omega_{\text{ст}}}{R_m} \geq 1 + r_{\text{ст}} \left(1 + \frac{L_{\text{ст}}}{r_{\text{ст}}} p \right) \left(\frac{1}{R_{\text{н}} \left(1 + \frac{L_{\text{н}}}{R_{\text{н}}} p \right)} - C_p \right) \quad (2.6)$$

де $r_{\text{ст}}, L_{\text{ст}}$ - активний та індуктивний опір статора електричної машини;

$R_{\text{н}}, L_{\text{н}}$ - активний та індуктивний опір навантаження;

$Z_{\text{АГ}}$ - постійний коефіцієнт, що характеризує цей генератор;

C – ємність фазного конденсатора.

Отримано вираз критичного опору, у якому відбувається зрив генерації:

$$Z_{\text{н}} \geq \frac{X_{\sigma} \cdot X_c}{X_{\text{АГ}}(Z_{\text{н}}) + X_{\sigma} - X_c} \quad (2.7)$$

Складова $X_{\text{АГ}}(Z_{\text{н}})$ відображає додаткову залежність індуктивного опору АГ, обумовленого дією реакції, що розмагнічує, реакції ротора (пунктирна лінія на рисунку 2.1). Зміна індуктивного опору АГ призводить до відхилення частоти струму, що генерується, що фактично проявляється в варіації ковзання при зростанні навантаження.

Представляючи АГ як резонансну систему, що генерує енергію на частоті, що відповідає вільним коливанням, можна зробити висновок: частота даних коливань залежить не тільки від реактивних параметрів електричної машини і батареї конденсаторів, але і від навантаження і може змінюватися щодо роботи на холостому ході, навіть при постійній швидкості.

На виході структурної схеми АГ (рисунок 2.1) знімається значення синусоїдальної напруги, що генерується (рисунок. 2.5). Для отримання характеристик були використані параметри асинхронного двигуна потужністю 7,5 кВт АИР132 S4 параметри якого наведені в таблиці 2.2, як джерело збудження враховувалася батарея конденсаторів з фазною ємністю 120 мкФ, при роботі на індуктивно-активне навантаження потужність порядку 2 кВт. Для забезпечення номінальної частоти напруги, що генерується, ротор асинхронної машини повинен обертатися з частотою трохи вище номінальної, для забезпечення

невеликої величини ковзання з негативним знаком.

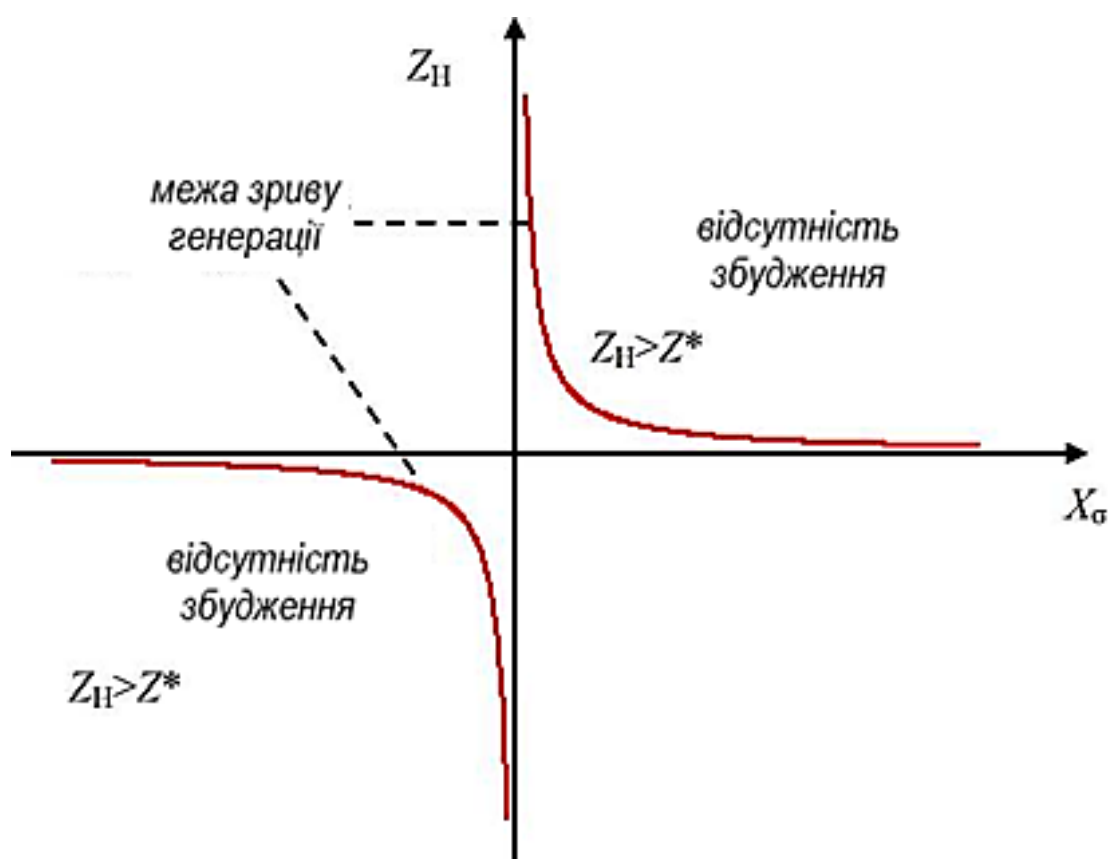


Рисунок 2.4. Графічна інтерпретація самозбудження

У моделі врахування насичення магнітного ланцюга по контуру основного магнітного потоку здійснюється з використанням функції намагнічування. Саме насичення магнітної системи виступає основним фактором, що обмежує подальше наростання амплітуди коливань і забезпечує перехід системи до режиму, що встановився.

Разом з тим у реальних генераторних установках на базі асинхронної машини в процесі самозбудження спостерігається не лише нелінійний характер зміни амплітуди коливань, а й зміна частоти напруги, що генерується. Отже, електромагнітні процеси, які у реальній системі, мають складніший характер, ніж це відбито у межах аналізованої моделі.

Таким чином, модель, побудована на основі методів теорії автоматичного управління, незважаючи на її наочність та зручність для аналізу загальних

закономірностей процесу самозбудження, не враховує зміну частоти напруги, що генерується в перехідному режимі. Це обмежує її можливості щодо реальних режимів роботи асинхронного генератора і вказує на необхідність застосування більш повних математичних моделей для отримання адекватного опису динаміки системи.

Таблиця 2.2 – Параметри АГ на базі асинхронної машини AIP132 S4

Параметр	P_{AG} , кВт	ω , про/хв	$r_{ст}$, Ом	$x_{ст}$, Гн	C , мкФ	Z_H , Ом	L_H , Гн	$n_{екв}$, в.о.
Значення	7,5	1500	0,6837	0,004152	120	24	0,007	10

Таким чином, модель, що розглядається, може бути використана для встановлення умови амплітудного балансу, згідно з яким енергія, що вноситься в систему за один період, повинна перевищувати сумарні втрати енергії, обумовлені різними видами розсіювання та дисипації. Саме виконання цієї умови забезпечує можливість наростання коливань та розвитку процесу самозбудження.

Разом про те у межах цієї моделі не розглядається інше принципово важливе умова, обов'язкове для генераторів змінного струму, саме умова фазового балансу. Тим часом стійке існування режиму генерації можливе лише за одночасного виконання як амплітудного, і фазового умов.

Визначення умови фазового балансу доцільно здійснювати з урахуванням аналізу частотних показників системи та дослідження стійкості її передавальної функції. Для цього оператор диференціювання замінюється оператором Фур'є з наступним виділенням дійсної та уявної частин, що за своєю суттю аналогічно переходу до ортогональної системи координат $\alpha - \beta$. Такий підхід дозволяє встановити фазові співвідношення в системі і тим самим отримати повнішу умову самозбудження асинхронного генератора.

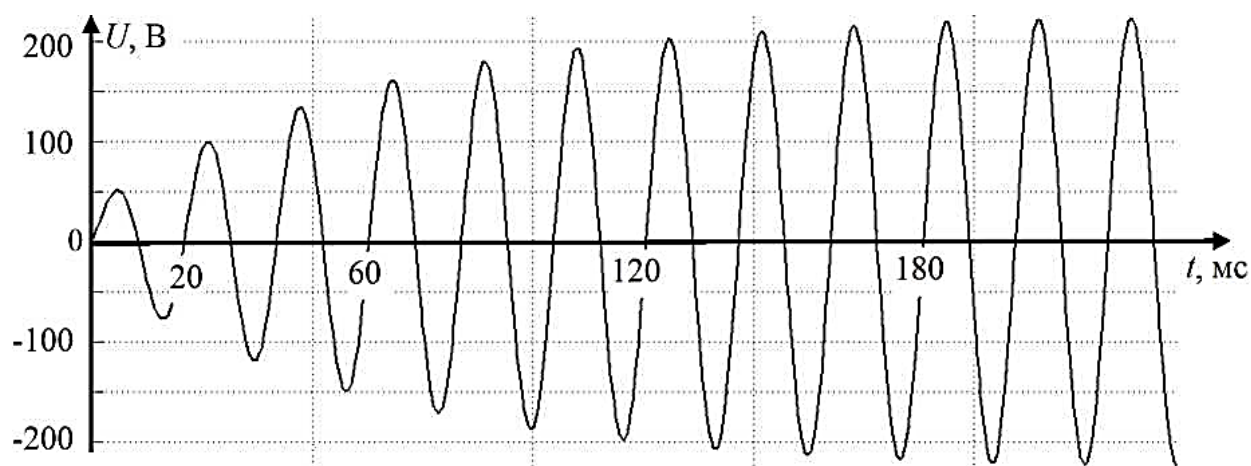


Рисунок 2.5. Графік вихідної напруги із схеми АГ

Зображена на рисунку 2.1 структурна схема не дає можливості масштабного вивчення всіх можливих характеристик та величин асинхронного генератора. Подання ускладненої структурної схеми асинхронного генератора дозволить проводити більш вагомий аналіз, але в такому разі втрачається головна перевага даного методу - простота демонстрації роботи об'єкта, через що інші методи стають найбільш вигідними. Розроблена модель АГ надає можливість узагальненого опису об'єкта, дослідження тимчасових характеристик та електромагнітних процесів.

2.2.2 Визначення умов самозбудження ДПТ

Аналогічний алгоритм аналізу може бути поширений і на інші системи генерування електроенергії. Зокрема, його доцільно застосувати до генератора постійного струму паралельного збудження. Як і у випадку асинхронного генератора, умова амплітудного балансу в такій системі виконується за коефіцієнта петльового підсилення, що перевищує одиницю. Значення цього коефіцієнта може бути визначене на основі виразів загальної передавальної функції системи.

Водночас для генератора постійного струму умова фазового балансу у явному вигляді фактично не виникає. Це зумовлено наявністю колектора, який виконує функцію своєрідного модулятора-демодулятора, перетворюючи

змінний у якорі магнітний потік на електрорушійну силу сталої полярності на виході машини. Таким чином, колектор усуває необхідність окремого розгляду фазових співвідношень, що принципово відрізняє генератор постійного струму від генераторів змінного струму.

Електромагнітні процеси в генераторі постійного струму при постійній частоті обертання якоря можуть бути описані відповідною системою рівнянь:

$$\begin{aligned} u_B &= R_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt}, \\ u_{\text{я}} &= C_e \Phi \omega_{\text{я}} - R_{\text{я}} i_{\text{я}} - L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} \\ \Phi &= i_B w_B / R_m, \end{aligned} \quad (2.8)$$

де $R_{\text{я}}$ - Активний опір якоря електричної машини;

$R_{\text{н}}$ - активний опір навантаження;

C_e - Постійний конструктивний коефіцієнт, що характеризує даний генератор постійного струму;

R_B, L_B - активний та індуктивний опір гілки збудження.

При такій схемі збудження напруги обмотки збудження і якоря рівні між собою $i_{\text{я}} = i_{\text{в}} = i_{\text{р}}$ ЕРС обумовлюється частотою обертання ротора $E_{\text{Г}} = C_e \Phi \omega_{\text{вр}}$. Системі рівнянь (20) відповідає структурна схема, представлена на рисунку 2.6.

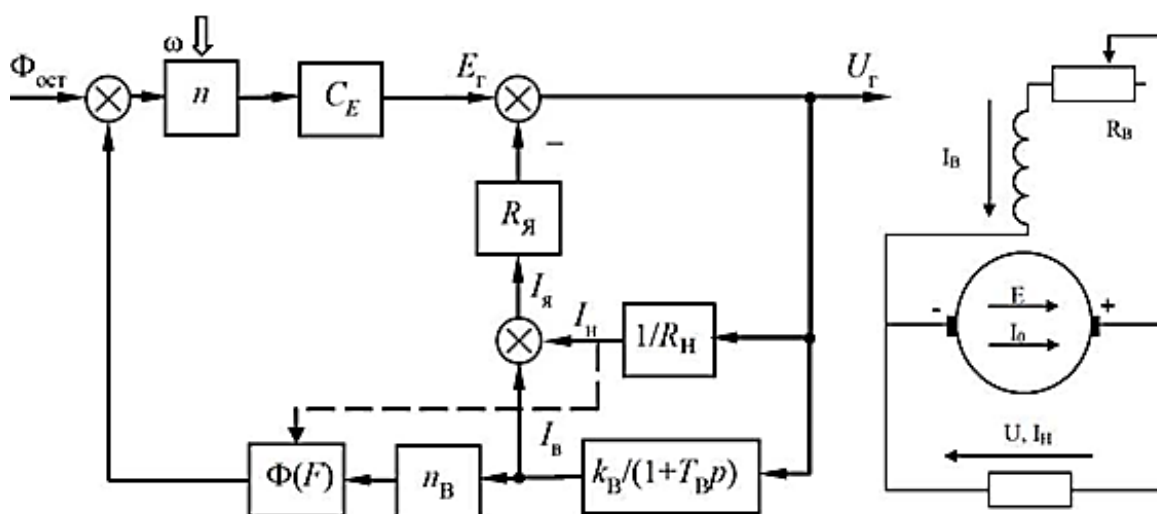


Рисунок 2.6. ГПТ: а - структурна схема ГПТ паралельного збудження з позиції ТАУ; б - принципова схема ГПТ паралельного збудження

Згідно з структурною схемою та принципами роботи ГПТ наявність залишкового магнітного потоку $\Phi_{\text{ост}}$ призводить при обертанні якоря до виникнення ЕРС - обертання E_z на виході генератора. В обмотці збудження з числом витків n_b представленої аперіодичним ланкою $K/(1+T_b p)$ виникає струм збудження, який створює МДС F і відповідний магнітний потік. Таким чином, утворюється контур позитивного зворотного зв'язку магнітного потоку, що сприяє процесу самозбудження. Амплітуда потоку та ЕРС обмежується за рахунок нелінійності характеристики намагнічування.

Для зручності перетворення було використано умовні позначення для представлених ланок структурної схеми ГПТ (рисунок 2.6). У таблиці 2.3. наведено позначення та призначення елементів, що використовуються у структурній схемі та математичних виразах.

Таблиця 2.3 - Умовні позначення ланок структурної схеми ДПТ

Вихідна ланка	k_p	$R_{\text{я}}$	$1/R_{\text{н}}$	$\partial \Phi / (1+T_b p)$	$\Phi (F)$
Умовне позначення	W_i	W_2	W_3	W_4	W_5
Фізичне значення	$C_e \omega$	$R_{\text{я}}$	$R_{\text{н}}$	$R_b + L_b$	nL
Перетворення або призначення, що виконується	Отримання ЕРС - обертання з магнітного потоку	Падіння напруги на опорі якоря	Падіння напруги на активному навантаженні і	Створення до - додаткового магнітного потоку збудження	Функція намагнічування

Як і у випадку асинхронного генератора з ємнісним збудженням, процес наростання напруги в генераторі постійного струму характеризується виконанням певної умови, що забезпечує можливість самозбудження. Після підстановки відповідних залежностей та виконання необхідних перетворень може бути отримана умова самозбудження генератора постійного струму. У

загальному вигляді ця умова за структурою повністю відповідає виразу (2.5).

Аналіз отриманої нерівності дозволяє зробити висновок про існування критичного значення опору обмотки збудження, при перевищенні якого процес самозбудження стає неможливим. Крім того, з даного виразу випливає, що самозбудження генератора постійного струму, як і асинхронного генератора, не може бути реалізовано при певній величині навантаження, коли умова амплітудного балансу перестає виконуватися.

Отже, отримане співвідношення фактично є рішенням задачі про граничне навантаження генератора. Воно відповідає характеристик збудження генератора постійного струму при різних значеннях опору навантаження, представленим на рисунку 2.7.

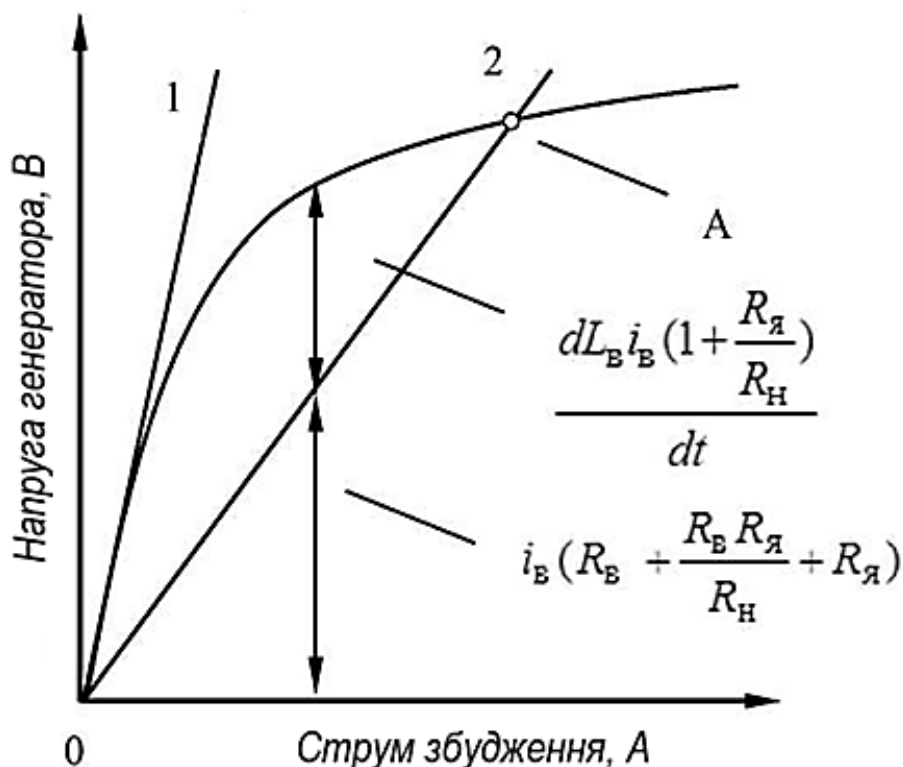


Рисунок 2.7. Самовзбудження ГПГ при різних "зовнішніх" опорах щодо ЕРС: 1 – критичне значення опору; 2 – вольтамперна характеристика обмотки збудження; А – робоча точка ГПГ

Для отримання характеристик використовуємо параметри двигуна 2ПН100ВУХЛ4 на 110 В потужністю 2,2 кВт, при роботі на індуктивно-активне

навантаження потужність, орієнтовно, 1 кВт та номінальній частоті обертання якоря. Параметри наведено у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 - Параметри ГПГ на базі машини 4ПН100ВУХЛ4

Параметр	C_e , о.е.	ω , про/хв	$R_{я}$, Ом	$L_{я}$, мГн	$R_{в}$, Гн	$L_{в}$, мГн	$Z_{н}$, Ом	$n_{с}$, о.е.
Значення	1,03	3000	0,16	5,7	295/81	12	12	24

На виході представленої схеми (рис. 2.8) отримаємо графік зростання напруги у часі.

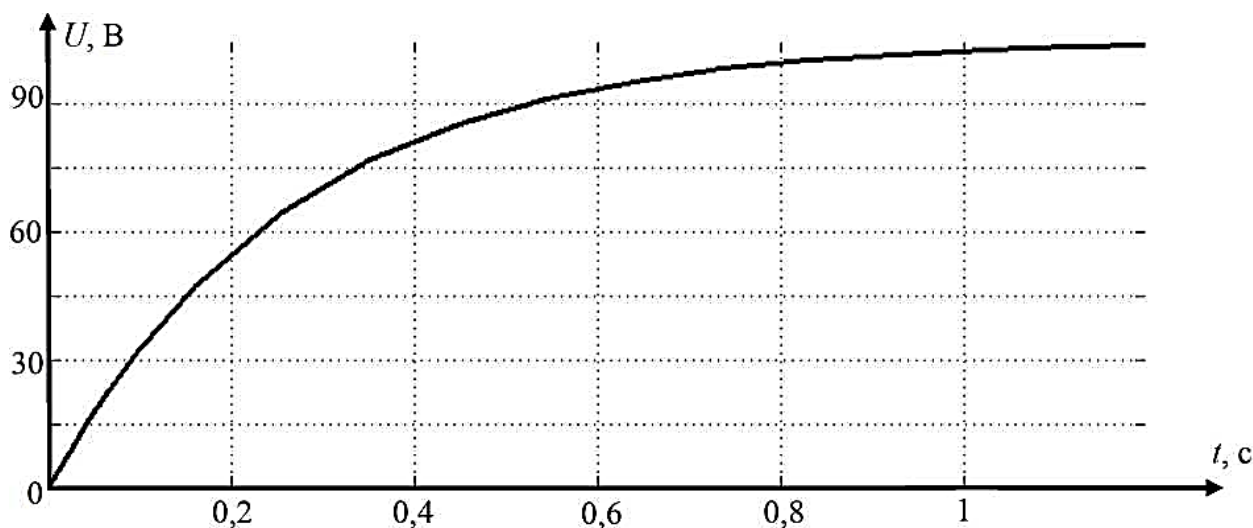


Рисунок 2.8. Графік вихідної напруги із схеми ГПГ з позиції ТАУ 2.5

2.3 Параметричний резонанс асинхронних генераторів

Для будь-якого резонансного явища необхідною умовою є наявність коливального процесу з певною частотою. Однак параметричний резонанс відрізняється тим, що не потребує постійного зовнішнього джерела змінного впливу. Виникнення синусоїдального сигналу в цьому випадку зумовлене внутрішніми фізичними процесами, які відбуваються в коливальній системі.

Як відомо, в індуктивно-ємнісному контурі відбувається вільний обмін енергією між електричним полем ємності та магнітним полем індуктивності. При цьому накопичена енергія періодично переходить з однієї форми в іншу. Водночас частина електромагнітної енергії неминуче розсіюється в активному опорі кола, перетворюючись на теплоту. Саме наявністю цих втрат пояснюється загасаючий характер зміни струму та напруги в незмінному резонансному контурі. Частота таких загасаючих коливань відповідає своїй частоті системи.

$$i = I_m e^{-\kappa t} \cos(\omega_c t) \quad (2.9)$$

де ω_c – частота вільних коливань, K – коефіцієнт загасання.

За сталих параметрів коливального контуру коливання, що виникають у системі, завжди мають загасаючий характер, а швидкість їх згасання визначається величиною втрат в активному опорі навантаження. Якщо ж реактивні елементи системи змінюються в часі за періодичним законом, характер коливального процесу може істотно змінюватися. Залежно від коефіцієнта згасання, зумовленого активним опором, амплітуда коливань може як зростати, так і зменшуватися.

Інтенсивність прояву параметричного резонансу значною мірою визначається глибиною модуляції реактивних елементів. Найбільш виражений ефект спостерігається за стрибкоподібної зміни ємності або індуктивності [9]. У цьому випадку формуються найбільш сприятливі умови для передавання енергії до коливального контуру та подальшого наростання амплітуди коливань.

У результаті математичного аналізу було отримано умови виникнення параметричного резонансу, з яких випливає, що для забезпечення наростаючого характеру коливань зміна індуктивності або ємності має перевищувати певне критичне значення. Ця величина перебуває у прямій залежності від відповідного реактивного параметра та є обернено пропорційною добротності коливального контуру [24]:

$$\Delta C > \frac{\pi \cdot C}{Q}, \Delta L > \frac{\pi \cdot L}{Q} \quad (2.10)$$

У другому розділі було визначено, що для резонансу в першій точці перетину годографа з дійсною віссю при добротності $Q = 50,7$ необхідне і періодичні зміни реактивних елементів на 6,2%.

Причиною змін реактивних параметрів машин є пульсація магнітного поля, пов'язана з конструктивними особливостями статора. Висота зубців, матеріал клинів паза та інші особливості проектування АМ впливають на напрямки та значення магнітної індукції, потоку.

На рисунку 2.9 наведено зображення розподілу векторів магнітної індукції асинхронної машини, при використанні діелектричного клина, що найчастіше застосовується. Наведений результат отримано за допомогою програми *Elcut 5.1*, яка використовує метод кінцевих елементів.

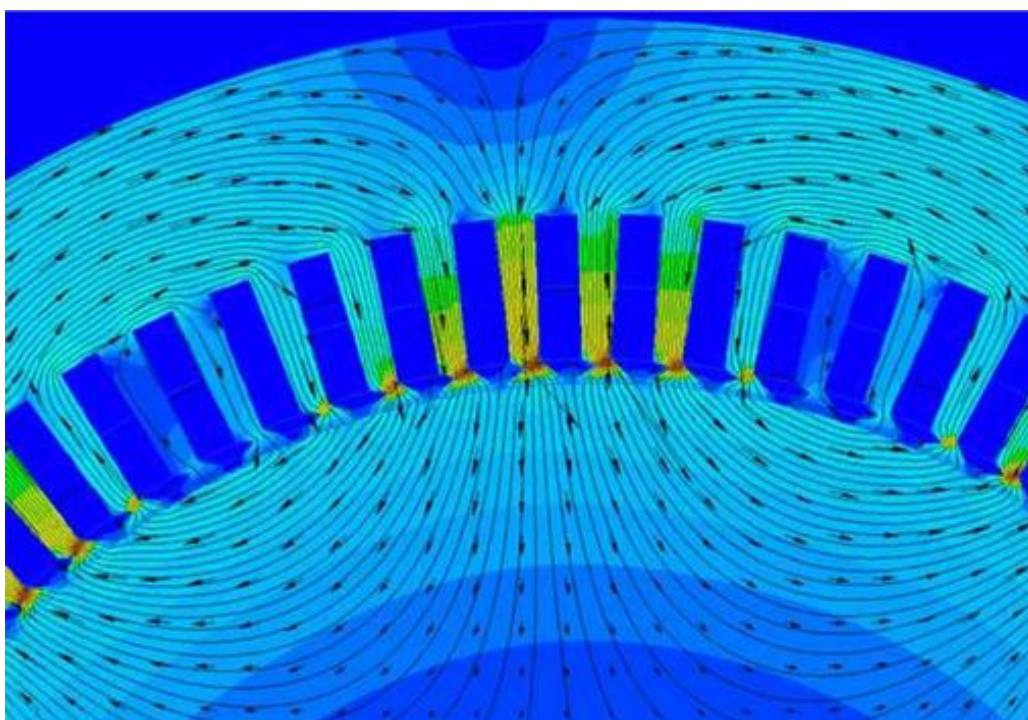


Рисунок 2.9. Вектор магнітної індукції асинхронної машини.

На рисунку видно, що магнітне поле не проходить через клин. Вектор індукції замикається, проходячи через статорне ярмо, зубці, повітряний зазор, ротор. При цьому найнасиченіша частина - це зубець статора в місці розташування діелектричного клину. Індукція у зубці статора має максимальне значення.

Детальний аналіз магнітної індукції можливий після побудови графіка індукції за радіальною довжиною повітряного зазору (довжиною внутрішньої розточування статора). Отриманий результат подано рисунку 2.10. На графіці видно пульсації магнітної індукції, величина яких у середньому становить 0,4 Тл, у відносному вигляді відповідає значенню 28,5 % від загальної пульсації. Напрямок векторної величини визначає знак індукції.

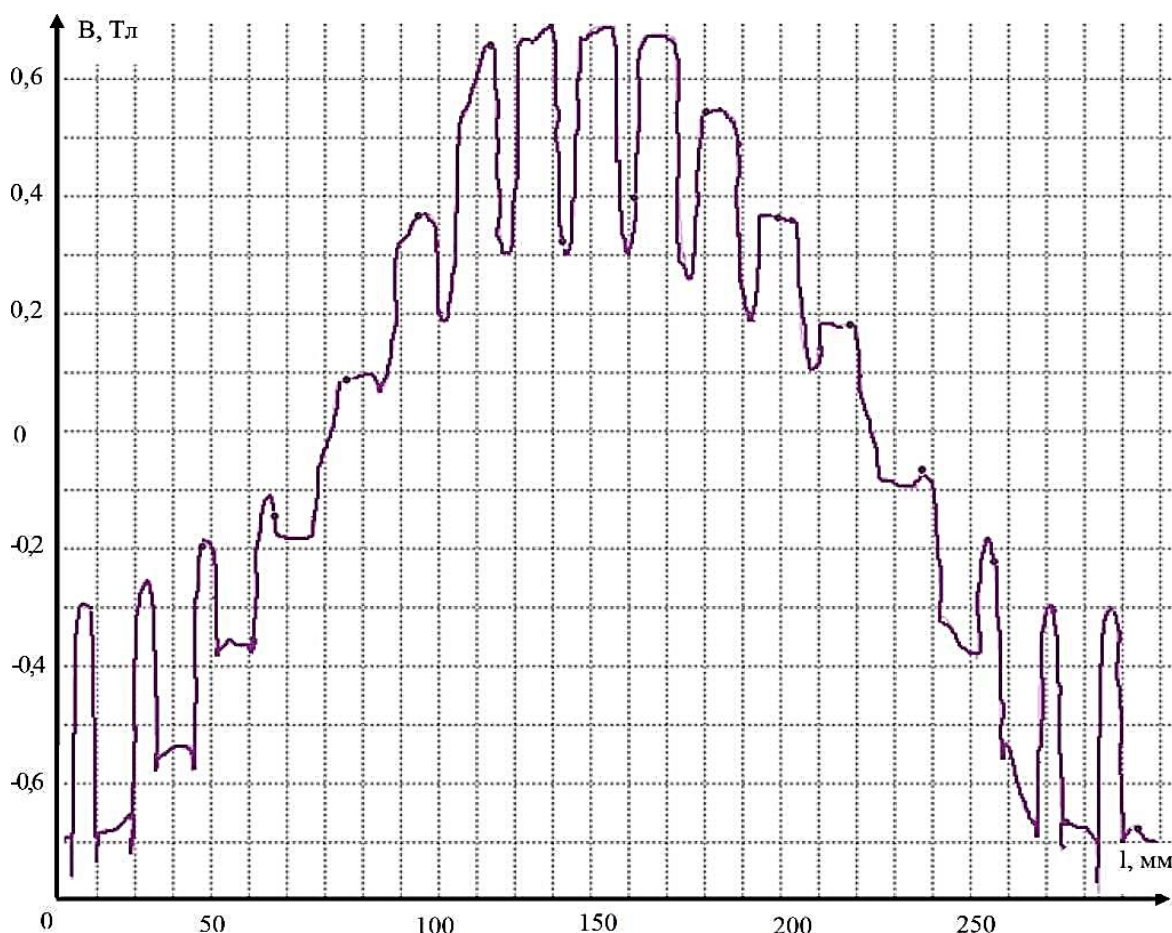


Рисунок 2.10. Магнітна індукція АГ за радіальною довжиною повітряного зазору

Подана зміна індукції буде впливати на значення індуктивності наступним чином: пульсуючий характер магнітної індукції пов'язаний з величиною магнітного потоку, що пропорційно залежить від значень індукції, площі поверхні S' і кута між нормаллю і площиною контуру: $\Phi = BS \cos \alpha$. Індуктивність можна визначити через відношення створеного магнітного потоку до значення струму, що протікає:

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{B(l) \cdot S \cdot \cos \alpha}{I} \quad (2.11)$$

Порушення асинхронної машини від напівпровідникового перетворювача супроводжується появою додаткових періодичних пульсацій, зумовлених комутаційними процесами силових ключів. Це дозволяє розглядати асинхронну машину як об'єкт з параметрами, що періодично змінюються. У разі асинхронного генератора, що працює спільно з перетворювачами частоти, зміна параметрів відбувається за складним періодичним законом. Наявність у такій системі резонансного контуру із змінними параметрами створює підстави для інтерпретації процесу збудження як прояву параметричного резонансу.

З урахуванням впливу амплітуди зміни індуктивності електричної машини можна дійти невтішного висновку, що більш виражені пульсації більшою мірою сприяють розвитку параметричного порушення асинхронного генератора. Отже, перехід машини в генераторний режим за високого ступеня пульсації магнітної індукції є більш ймовірним, ніж у випадку машини з меншою пульсацією. Підбір фазних ємностей, отже, і величини реактивної енергії, необхідної збудження, визначається необхідної добротністю ланцюга «асинхронна машина – схема збудження» відповідно до умовою (2.10).

Разом з тим використання машини з високою пульсацією магнітної індукції неминуче відбивається на якості напруги, що генерується, і показниках енергоефективності генераторної установки. Крім того, електрична машина з меншим значенням індуктивності при значній пульсації магнітної індукції вимагатиме вищої добротності коливального контуру для забезпечення коливального процесу з амплітудою, що наростає.

Висновки до 2 глави

1. На основі аналізу можливих методів дослідження перехідних та усталених режимів роботи асинхронного генератора можна сформулювати такі висновки.
2. Для електромеханічних систем генерування електроенергії, до складу яких входять асинхронна машина та навантаження ємнісного характеру, важливе

значення має дослідження перехідного процесу самозбудження. Це зумовлено тим, що в окремих випадках неконтрольований розвиток процесу самозбудження може негативно впливати на характер перебігу робочого режиму, стійкість функціонування системи та експлуатаційну надійність обладнання.

3. Отримання достовірних результатів математичного моделювання можливе лише за умови врахування насичення магнітного кола. У зв'язку з цим необхідно використовувати реальну криву намагнічування електричної машини, не допускаючи спрощеного припущення про лінійний характер магнітної характеристики. Крім того, під час дослідження режимів роботи асинхронного генератора слід враховувати характер навантажувального опору, а також зміну опору взаємної індукції, що визначається поточним магнітним станом машини та істотно впливає на параметри усталеного режиму.

4. Обмежений діапазон зміни ковзання, виникнення генерованої напруги на частоті вільних коливань, а також інші характерні ознаки резонансних явищ, зокрема взаємне перетинання дійсної та уявної складових поблизу точки перегину, свідчать про резонансну природу самозбудження асинхронного генератора. Відсутність постійного зовнішнього джерела електрорушійної сили дає підстави зробити висновок, що процес самозбудження асинхронного генератора зумовлений явищем параметричного резонансу.

5. Амплітуда та частота вихідної напруги можуть бути визначені на основі еквівалентної електричної схеми заміщення генератора. При цьому частота переважно визначається реактивними параметрами асинхронної машини та конденсаторної батареї збудження. Амплітуда вихідної напруги, крім зазначених чинників, залежить також від величини активних опорів електро механічного перетворювача та навантаження. Запропонована методика, що ґрунтується на частотному аналізі передавальної функції та повного опору системи, дає змогу оцінювати стійкість роботи системи генерування електроенергії в різних експлуатаційних режимах.

Глава 3 ОХОРОНА ПРАЦІ

У процесі будь-якої трудової діяльності, кожна людина, залучена до цієї діяльності, піддається впливу цілого комплексу виробничих факторів. У свою чергу ці фактори здатні впливати на здоров'я людини. Сукупність всіх чинників, які впливають на здоров'я людини, називається умовами праці.

Реальні умови праці характеризуються різними шкідливими та небезпечними факторами. Найчастіше, між небезпечними і шкідливими чинниками немає чіткої кордону, кожен чинник може рано чи пізно призвести до втрати здоров'я чи нещасному випадку.

Для недопущення нещасних випадків та шкоди здоров'ю робоче місце має бути спроектовано з дотриманням усіх законодавчих норм і правил, ДСТУів.

Даний розділ включає опис небезпечних і шкідливих факторів, які відчуває інженер-енергетик при розробці проекту, а також при застосуванні його на практиці.

Завданнями цього розділу є:

- 1) Аналіз робочого приміщення на наявність небезпечних та шкідливих факторів;
- 2) Аналіз законодавчих та нормативних документів, що стосуються цієї теми;
- 3) Аналіз впливу шкідливих та небезпечних факторів на інженера, проаналізувати заходи щодо зниження впливу небезпечних та шкідливих факторів

3.1. Виробнича безпека

3.1.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Основне робоче місце інженера знаходиться у виробничому приміщенні. Основна робота проводиться з використанням персонального комп'ютера (ПК).

За виконання робіт на персональному комп'ютері (ПК) можливі небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Класифікація можуть мати місце такі фактори.

Шкідливі:

- підвищена температура поверхонь ПК;
- підвищена чи знижена температура повітря робочої зони;
- підвищена чи знижена вологість повітря;
- підвищений або знижений рівень негативних та позитивних аероіонів;
- підвищений рівень статичної електрики;
- підвищений рівень електромагнітних випромінювань;
- відсутність чи нестача природного світла;
- недостатня штучна освітленість робочої зони;
- підвищена яскравість світла;
- підвищена контрастність;
- пряма та відбита блискітність;
- зорова напруга;
- монотонність трудового процесу;
- нервово-емоційне навантаження.
-

Небезпечні:

- ураження електричним струмом
- підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання.
-

Фізично шкідливі та небезпечні фактори

До фізичних шкідливих та небезпечних факторів належать: підвищені рівні електромагнітного, рентгенівського, ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання; підвищений рівень статичної електрики та запиленості повітря робочої зони; підвищений вміст позитивних аеронів та знижений вміст

негативних аероонів у повітрі робочої зони; підвищений рівень блискості та засліпленості; нерівномірність розподілу яскравості у полі зору; підвищена яскравість світлового зображення; підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може статися через тіло людини.

Хімічно шкідливі та небезпечні фактори

Хімічні шкідливі та небезпечні фактори, такі: підвищений вміст у повітрі робочої зони двоокису вуглецю, озону, аміаку, фенолу та формальдегіду.

Психофізичні шкідливі та небезпечні фактори

Психофізіологічні шкідливі та небезпечні фактори: напруга зору та уваги; інтелектуальні, емоційні та тривалі статичні навантаження; монотонність праці; великий обсяг інформації, що обробляється в одиницю часу; нераціональна організація робочого місця.

Умови праці визначаються:

- Розташуванням основних елементів робочого місця, які мають мати ергономічне розташування та відповідати анатомо - фізіологічним даним працюючої людини, а також особливостями засобів введення-виведення інформації
- Умовою навколишнього середовища, мікрокліматом: освітлення, шум, вібрації, вентиляція; температурний режим;
 - характеристиками інформаційної взаємодії людини та ПК.

3.1.2. Мікроклімат

Мікрокліматичні параметри, такі як температури, відносна вологість та швидкості руху повітря в приміщенні, безпосередньо впливають на працюючу людину. Для забезпечення оптимальних умов праці санітарні норми ДСТУ 2.2.4.548-96 визначають на одну працюючу людину обсяг виробничого приміщення не менше 20 м³ площі приміщення, обгородженого стінами не

менше 6 м^2 .

З метою створення нормативних умов для персоналу встановлено норми виробничого мікроклімату ДСТУ 12.1.005-88 Повітря робочої зони. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги”, а також “Гігієнічні вимоги до мікроклімату виробничих приміщень”. У таблиці 3.1 наведено оптимальні норми параметрів мікроклімату, таблиці 3.3 допустимі норми. Категорія робіт цієї розробки відноситься до легкої.

Таблиця 3.1. - Оптимальні норми параметрів мікроклімату у робочій зоні виробничих приміщень

Пора року	Категорія роботи	Температура, °C	Відносна вологість, %	Середня швидкість руху повітря не більше
Холодний	Легка, 1-а	22 - 24	40 - 60	0.2
Теплий	Легка, 1-а	23 - 25	40 - 60	0.2

Розробляти цей проект інженер енергетик буде протягом року, йому доведеться працювати як у холодний період, так і в теплий, категорія робіт легка.

Таблиця 3.2 - Допустимі норми параметрів мікроклімату в робочій зоні виробничих приміщень

Період року	Категорія роботи	Температура, °C				Відносна вологість, %, не більше	Швидкість руху повітря, м/с, трохи більше
		Верхня		Нижня			
		На робітників] х місцях					
		Постійних	непостійних	Постійних	непостійних		
Холодний	Легка, 1-а	25	26	20	18	75	0,1
Теплий	Легка, 1-а	28	30	22	20	55 при 28 °C	0.1-0.2

Потрібний стан мікроклімату робочої зони може бути забезпечений при

використанні таких технічних засобів, як:

- Теплоізоляція джерел теплових випромінювань, з метою запобігання нагріванню повітря в приміщенні та тепловому захисту персоналу;
- Пристрої вентиляції та опалення [ДСТУ «Опалення, вентиляція та кондиціонування»].

Завдання вентиляції - підтримання та забезпечення чистоти повітря у виробничому приміщенні. Вентилювання приміщення досягається за допомогою нагнітання свіжого та відведенням забрудненого або нагрітого повітря.

Метою опалення приміщення є підтримання в них у холодну пору року заданої температури повітря, а також забезпечити безпеку щодо пожеж та вибухів.

3.2. Електромагнітне та іонізуюче випромінювання

Електромагнітне та іонізуюче випромінювання становлять серйозну загрозу здоров'ю людини у разі перевищення гранично допустимих норм. Нормування постійних магнітних полів проводиться у разі ДСТУ . Напруженість робочого місця під час роботи магнітних пристроїв має перевищувати 8 кА/м. Відповідно до ДСТУ «Електричні поля промислової частоти», опромінення електричним полем регламентується як за величиною напруженості, і за тривалістю дії, таблиця 3.3.

Таблиця 3.3 - Допустимі рівні напруженості електричного поля та тривалості перебування працюючих без засобів захисту

Напруженість електричного поля, кВ/м	Допустима тривалість перебування людини протягом доби в електричному полі, хв.
Менш 5	Без обмежень
5-10	Не більше 180
10-15	Не більше 90
15-20	Не більше 10
20-25	Не більше 5

Ослаблення потужності електромагнітного поля на робочому місці, зокрема у виробничому приміщенні, досягається шляхом збільшення відстані між джерелом випромінювання і робочим місцем, установкою екранів, що відбивають або поглинають, між джерелом і робочим місцем, розміщення струмопровідних елементів апаратів і пристроїв у феромагнітні оболонки кожухи. Найефективнішим методом є встановлення екрануючих екранів. Екрани можуть екранувати як саме джерело, і робоче місце. Також застосовують заземлюючі екрани.

3.4. Освітлення

Недостатній рівень освітленості робочого місця негативно впливає на умови праці, ускладнює тривале виконання зорової роботи, спричиняє швидке стомлення органів зору та може сприяти розвитку короткозорості у працівників. Надмірно низькі рівні освітленості також можуть викликати сонливість, апатію, зниження концентрації уваги, а за поєднання з іншими несприятливими чинниками — формування відчуття тривожності. Тривале перебування в умовах недостатнього освітлення може призводити до зниження інтенсивності обмінних процесів в організмі та загального погіршення самопочуття. Подібні прояви можуть спостерігатися також під час роботи в приміщеннях із несприятливим або обмеженим спектральним складом світла.

Надмірно яскраве світло, у свою чергу, може спричиняти засліплення, зниження зорової працездатності, подразнення та перенапруження нервової системи, що негативно впливає на продуктивність праці. Тривалий або інтенсивний вплив надлишкової яскравості може бути причиною ушкодження органів зору та шкіри, зокрема фотоопіків, кератитів, катаракт та інших патологічних порушень. Отже, забезпечення нормативного рівня освітленості є важливою умовою створення безпечного та ергономічного виробничого середовища.

Нормування природного та штучного освітлення здійснюється відповідно

до вимог чинних будівельних і санітарних норм, зокрема ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення» та відповідних нормативних документів з охорони праці.

Виконаємо розрахунок освітлення робочого приміщення інженера. Геометричні розміри приміщення становлять 13×5×2 м. За характером виробничого середовища приміщення належить до категорії з незначним пиловиділенням і не характеризується підвищеною небезпекою ураження електричним струмом.

Для зазначеного виробничого приміщення доцільно передбачити систему комбінованого освітлення, що поєднує загальне та місцеве освітлення робочих зон. Як джерела світла приймаються світильники типу СДС 22-04-Д1-100-2000-УХЛ з габаритними розмірами 155×195 мм, потужністю 20 Вт та коефіцієнтом корисної дії 83 %. Такий вибір забезпечує можливість створення необхідного рівня освітленості на робочій поверхні з урахуванням функціонального призначення приміщення та характеру виконуваних зорових робіт.

3.5. Шуми

Шум - це сукупність звуків різної інтенсивності та частоти, що виникають при механічних коливаннях газоподібних, твердих та рідких середовищ. Має сильний вплив на організм працюючої людини, її нервову та серцево-судинну системи. Тривалий вплив шуму знижує ДСТУроту зору та слуху, викликає підвищення кров'яного тиску, втому центральної нервової системи. У людей, що працюють у галасливому приміщенні, збільшується кількість помилок у процесі роботи, знижується продуктивність праці. Вплив шуму здатний призводити до появи професійних захворювань і може бути також причиною нещасного випадку. Джерелом шуму на підприємстві є машини, обладнання та різні види ручного інструменту.

Значення гранично допустимих рівнів шуму нормуються ДСТУ 12.1.036-81 та СН 2.2.4/2.1.8.562-96, таблиця 35.

Таблиця 3.4 - Гранично допустимі рівні шуму

Рівень звукового тиску (дБ) в октавних смугах із середньгеометричними частотами, Гц								Рівні звуку та еквівалентні рівні
3	25	50	00	1000	2000	4000	8000	85
9	2	6	3	80	78	76	74	

Зниження шуму досягають за допомогою: зменшення джерела, зміна спрямованості випромінювання, планування приміщення, звукоізоляції, зменшення шуму шляху його поширення.

У разі неможливості зменшити шум застосовують засоби індивідуального захисту: вкладиші (зниження шуму 5-20 дБ), навушники (вплив шумів високого рівня, більше 120дБ), шоломи (використовують коли вкладиші і навушники не забезпечують необхідного захисту).

Важливим джерелом транспортного дискомфорту (для водія та пасажирів) є коливання та вібрації, що виникають у процесі руху автомобіля. Вони розглядаються в рамках групової якості – плавності ходу.

Головні санітарні норми рівня шуму на робочих місцях такі – це 80 дБ. Максимальні рівні звуку А, виміряні з тимчасовими корекціями S та I, не повинні перевищувати 110 дБ та 125 дБ відповідно. А піковий рівень звуку С не повинен перевищувати 137 дБ.

3.6. Електричний струм та статична електрика

Ураження електричним струмом є одним із найбільш небезпечних виробничих чинників, оскільки може призвести до тяжких травм або загибелі людини. Воно може виникати внаслідок неправильних дій персоналу під час виконання робіт, порушення правил експлуатації електрообладнання, а також у

разі дотику до відкритих провідних частин, які опинилися під напругою через пошкодження або пробій ізоляції.

Імовірність ураження електричним струмом може бути суттєво знижена шляхом проведення інструктажів з охорони праці, навчання персоналу правилам безпечної експлуатації електрообладнання, а також відпрацювання дій щодо надання першої домедичної допомоги потерпілим. Обов'язковими технічними заходами електробезпеки є застосування захисного заземлення, занулення, автоматичного вимкнення живлення та інших пристроїв захисту.

Засоби захисту від ураження електричним струмом поділяють на колективні та індивідуальні.

До колективних засобів захисту належать переносні заземлення, захисні огороження, блокувальні пристрої, пристрої захисного вимкнення, автоматичні вимикачі, системи заземлення та інші технічні засоби, що запобігають небезпечному контакту людини з частинами електроустановки, які перебувають під напругою.

До індивідуальних засобів захисту належать діелектричні рукавички, діелектричне взуття, ізолювальний інструмент, діелектричні килимки, ізолювальні штанги, покажчики напруги та інші засоби, призначені для безпечного виконання робіт в електроустановках.

Усі засоби електрозахисту повинні перебувати у справному стані та застосовуватися відповідно до їх призначення. Їх перевірка, огляд і випробування мають проводитися у встановлені нормативними документами строки.

Окрему увагу необхідно приділяти захисту обладнання від статичної електрики. Статичний електричний заряд може накопичуватися на тілі людини внаслідок електризації під час контакту з різними матеріалами. Як правило, такий заряд не становить безпосередньої небезпеки для людини, однак може призводити до пошкодження або виходу з ладу чутливих компонентів комп'ютерної та електронної техніки.

Під час роботи з комп'ютерною технікою для захисту від статичної

електрики необхідно забезпечити справне заземлення обладнання, підтримувати нормативний рівень вологості повітря, використовувати антистатичні килимки на робочому місці, а також за потреби застосовувати антистатичні браслети.

Відповідно до Правил улаштування електроустановок приміщення за ступенем небезпеки ураження електричним струмом поділяють на такі категорії:

- приміщення з особливою небезпекою;
- приміщення з підвищеною небезпекою;
- приміщення без підвищеної небезпеки.

До приміщень з особливою небезпекою належать приміщення з відносною вологістю повітря, близькою до 100 %, підвищеною температурою, наявністю хімічно активного середовища, їдких парів або газів, які здатні руйнувати ізоляцію електропроводів та електрообладнання. У таких умовах необхідно застосовувати знижені безпечні напруги, зокрема 12 або 36 В залежно від характеру робіт і умов експлуатації.

До приміщень з підвищеною небезпекою належать сирі або вологі приміщення з відносною вологістю понад 70 %, приміщення зі струмопровідними підлогами, зокрема металевими, залізобетонними або земляними, а також приміщення з підвищеною температурою, обмеженим простором або умовами, за яких працівник може одночасно торкатися заземлених металевих конструкцій і корпусів електрообладнання. У таких приміщеннях доцільно застосовувати знижену напругу, що не перевищує 42 В.

До приміщень без підвищеної небезпеки належать сухі, опалювані, непильні, достатньо освітлені та просторі приміщення зі струмонепровідними підлогами. У таких приміщеннях відсутні умови, що створюють підвищений ризик одночасного дотику людини до заземлених металевих частин і корпусів електроустановок, які можуть опинитися під напругою.

У розглянутому випадку приміщення належить до категорії без підвищеної небезпеки, оскільки воно відповідає вимогам цієї категорії: є сухим, опалюваним, не характеризується значним пиловиділенням, має струмонепровідну підлогу та не створює умов для одночасного дотику

працівника до заземлених конструкцій і частин електрообладнання, що можуть перебувати під напругою.

ВИСНОВКИ

У ході розробки цієї глави ВКР було описано робочу зону, виявлено небезпечні та шкідливі виробничі фактори, а також запропоновано заходи щодо обмеження їх впливу на персонал. Визначено найбільш ймовірні надзвичайні ситуації, розроблено заходи щодо попередження цих ситуацій, описано порядок дій у разі їх виникнення. Розглянуто правові та організаційні питання забезпечення безпеки.

Дані розділ є важливим у зв'язку з розглядом у ньому питань збереження здоров'я та працездатності персоналу, дотримання всіх законодавчих норм та правил під час проведення виробничих процесів.

ВИСНОВКИ

1) Проведені дослідження електромагнітних процесів генерування електроенергії на основі асинхронного вітрогенератора дають змогу сформулювати такі висновки.

2) Встановлено, що процес збудження асинхронного генератора зумовлений явищем параметричного резонансу. Основною причиною його виникнення є пульсації магнітної індукції вздовж радіального повітряного зазору електричної машини. У мехатронній системі типу «асинхронна машина — автономний інвертор напруги» додатковим чинником, що сприяє розвитку самозбудження, є періодична комутація силових ключів автономного інвертора. Отже, пульсуючий характер магнітної індукції в асинхронній машині є достатньою передумовою для виникнення процесу самозбудження.

3) Показано, що застосування методів теорії автоматичного керування до аналізу електромеханічних систем дає змогу уточнити наявні умови збудження та виявити спільність закономірностей процесу генерування електроенергії в системах, побудованих на електричних машинах різних типів.

4) Встановлено, що частотні методи аналізу передавальної функції та повного опору системи генерування електроенергії дають змогу визначати частоту генерованої напруги, а також необхідну глибину модуляції індуктивності електричної машини. Крім того, застосування частотного підходу забезпечує можливість оцінювання стійкості процесу генерування та визначення меж існування режиму збудження.

5) Показано, що запропоновані в роботі співвідношення для визначення фазної ємності та реактивної потужності можуть бути використані під час проєктування асинхронних генераторів як з конденсаторним, так і з інверторним збудженням, зокрема для розрахунку параметрів ланки постійного струму. Зіставлення розрахункових та експериментальних даних показало, що навіть без урахування конструктивних особливостей порівнюваних асинхронних машин, які працюють у генераторному режимі, розбіжність результатів не перевищує 10%. Також встановлено, що для забезпечення збудження асинхронного

генератора в перехідному режимі необхідна наявність обсягу реактивної енергії, порівнянної з потужністю електричної машини.

6) Моделювання усталених та аварійних режимів роботи мехатронної системи генерування електроенергії підтвердило можливість її функціонування в умовах перевантаження, а також наявність природного захисного ефекту в аварійних режимах короткого замикання.

7) Встановлено, що застосування регулятора вихідної напруги дає змогу підтримувати частоту та напругу на затискачах електричної машини на сталому рівні за рахунок зміни величини реактивної енергії, що підводиться автономним інвертором напруги. Регулювання частоти в цьому випадку здійснюється через вплив струму інвертора на індуктивність намагнічувального контуру електричної машини, що призводить до зміни резонансної частоти системи. При малих значеннях ковзання у мехатронній системі реалізується залежність, близька до закону $U / f = \text{const}$

8) З урахуванням високої надійності асинхронної машини мехатронна система генерування електроенергії, побудована на її основі, може бути рекомендована для застосування на автономних об'єктах, до яких висувуються підвищені вимоги щодо пожежо- та вибухобезпеки, а також щодо забезпечення безпеки роботи в умовах коротких замикань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Загірняк М.В. Електричні машини: підручник/ М.В.Загірняк , Б.І.Невзлін.– 2-ге вид., перероб. і доп.– К.:Знання , 2009.– 399с
2. Белікова Л.Я. Електричні машини: навч . посіб . для студ . вищ . навч . закл . / Л.Я. Белікова , В.П. Шевченка. - Одеса: Наука і техніка,2012. - 478 с
3. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії /О.І. Соловей, Ю.Г. Лега , В.П. Розен та ін. За заг . ред. О.І. Солов'я. - Черкаси: Вид. ЧДТУ, 2007. - 490 с.
- 4.Енергоефективність та відновлювані джерела енергії Під заг . ред. А.К. Шидловського . - К.: "Українські енциклопедичні знання", 2007. - 559 с.
6. Dong Wang A Novel Stand-Alone Dual Stator-Winding Induction Generator з Static Excitation Regulation / Dong Wang, Fei Xiao, Botao Zhang, Dezhi Liu, An Hu // IEEE Transactions of Energy Conversion. – December 2005. – vol. 20, № 4. – p. 826-835.
7. Enes Goncalves Marra Глава 2: 2009-2010 10:00:00 10:00:00 - July/August 1999. - vol. 35, № 4. – p. 877-883.
8. Ishiguro A. A novel controll method for foprcecd commutated cycloconvertors using instantaneous values of input line-to-line voltages / Ishiguro A. at all // IEEE Trans on Ind. Electr . - 1991. - vol . 7, №3.
9. Jason C. Dominic Comparison i Design High Efficiency Microinverters для Photovoltaic Application: Master of Science in Electrical Engineering / Jason C. Dominic. – Virginia, 2014. – p. 120.
10. Malakondaiah Naidu A 4-kW 42V Induction-Machine-Based Automotive Power Generation System з Diode Bridge Rectifier and PWM Inverter / Malakondaiah Naidu, James Walters // IEEE Transactions on Industry Applications. - September/October 2003. - vol. 39, № 5. – p. 1287-1293.
11. Morteza Soleimania Design for Reliability Complex System with Limited Failure Data; Case Study of a Horizontal Drilling Equipment / Morteza Soleimania , Mohammad Pourgol -Mohammad // Probabilistic Safety Assessment and Management

PSAM 12. - June 2014.

12. Murthy SS, Analysis of self-excited induction generators/ SS Murthy, OP Malik // IEEE Proc. C. – 1982. – vol. 129, № 6. – p. 260-265.

13. Olorunfemi Ojo PWM-VSI Inverter-Assisted Stand-Alone Dual Stator Winding Induction Generator / Olorunfemi Ojo , Innocent Davidson // IEEE Transactions on Industry Applications. – November/December 2000. – vol. 36, № 6. – p. 1604 1611.

14. Patrick L. Jansen Transducerless Position and Velocity Estimation in Induction and Salient AC Machines / Patrick L. Jansen, Robert D. Lorenz // IEEE Transactions on Industry Applications. - March/April 1995. - vol. 31, № 2. – p. 240-247.

15. Load Operational Modes of Autonomous Asynchronous Generator with DC Consumers / Zachepa Iurii //XIV International PhD Workshop OWD. – 2012. – p. 425-429.

16. Research of Operation Modes of Autonomous Asynchronous Generator with Typical AC Customres / Zachepa Iurii // XIII International PhD Workshop OWD. – 2011. – p. 413-418.

ДОДАТКИ

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О.М.БЕКЕТОВА**

*Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та
транспортної інфраструктури
Кафедра альтернативної електроенергетики та електротехніки*

Особливості генерування електричної енергії асинхронним вітрогенератором потужністю 7,5 кВт

Виконав: студент 4 курсу,
групи НВДЕ-2022
Д.О. Серьогін

Керівник: доц. О.Б. Єгоров

Цілі та завдання проєктування

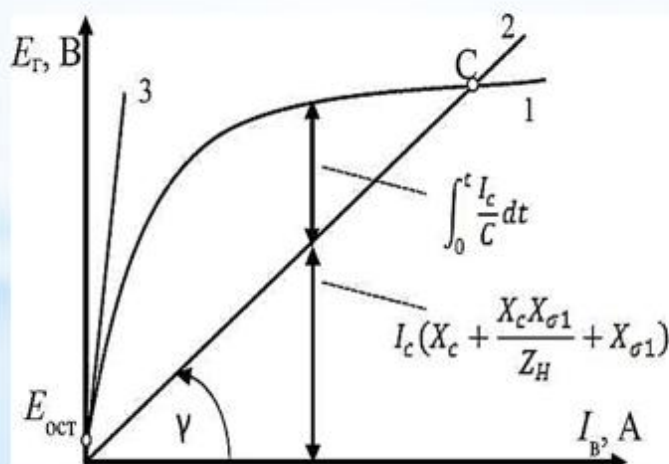
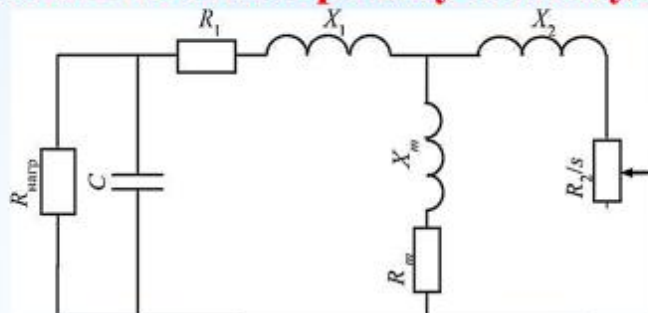
Метою дипломної роботи є комплексне дослідження електромагнітних процесів у мехатронній системі генерування типу «асинхронна машина – автономний інвертор напруги»

Визначити умови самозбудження асинхронного генератора при конденсаторному збудженні.

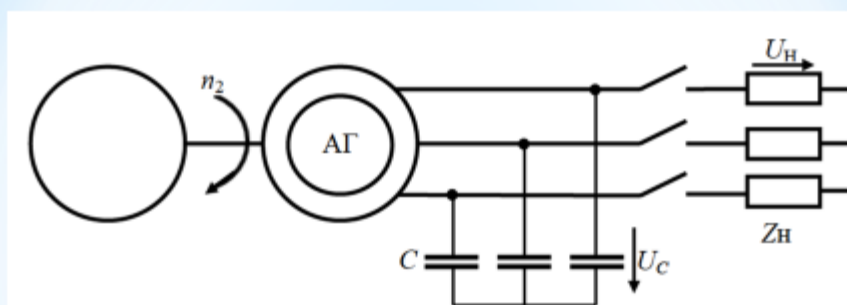
Розробити рекомендації щодо проєктування мехатронної системи генерування на основі асинхронної машини

Розглянути питання Охорони праці при експлуатації асинхронізованого синхронного генератора.

Математичне опис процесу самозбудження



Принципова схема АГ з конденсаторним збудженням



Потужність генератора, кВт	Необхідна для збудження ємність конденсатора, мкФ		
	XX	Номінальне навантаження	
		cos = 1	cos = 0,8
2	28	36	60
5	60	75	138
7	74	98	182
10	92	130	245
15	120	172	342

Стабілізація амплітуди напруги асинхронного генератора із батареєю конденсаторів

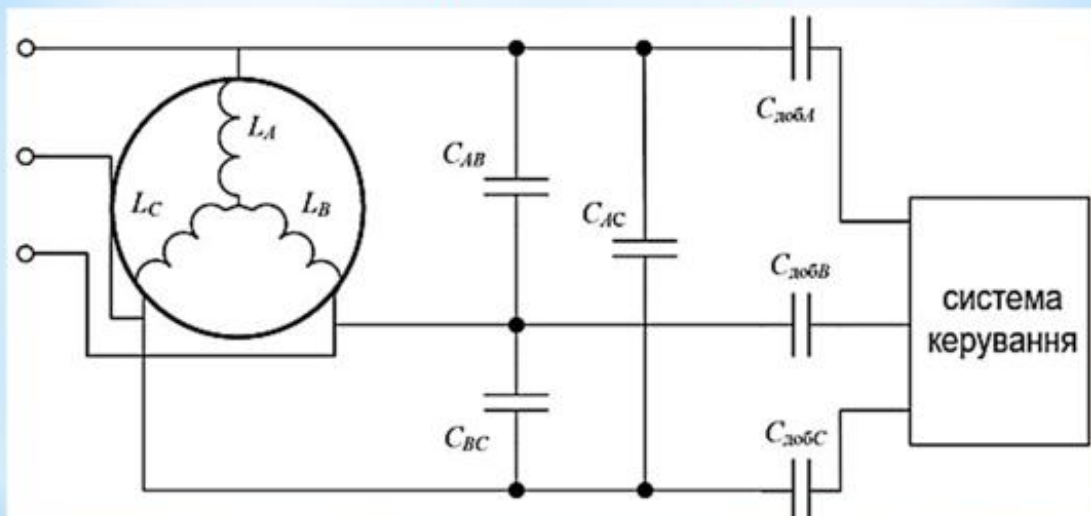
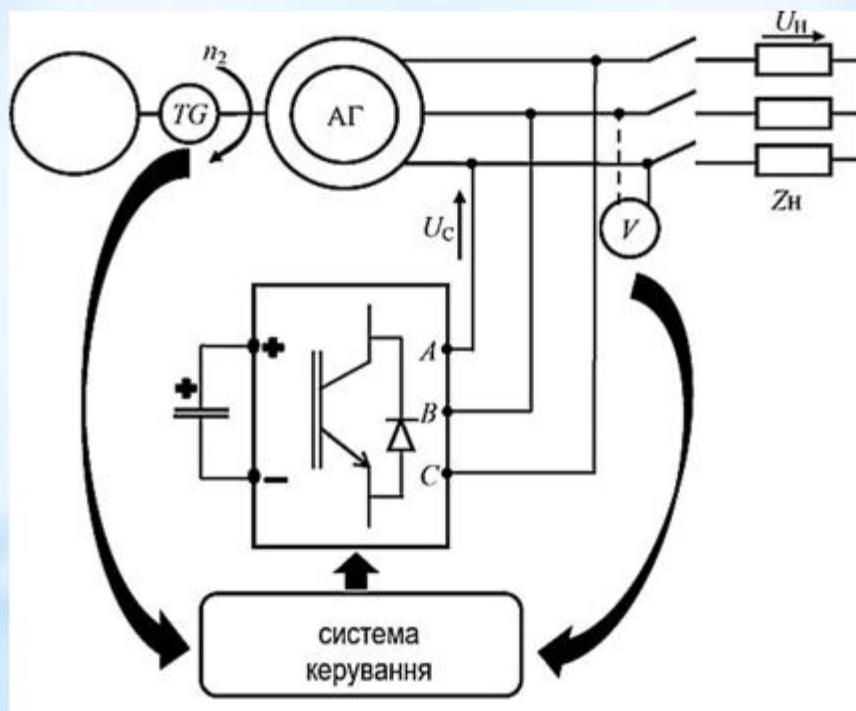


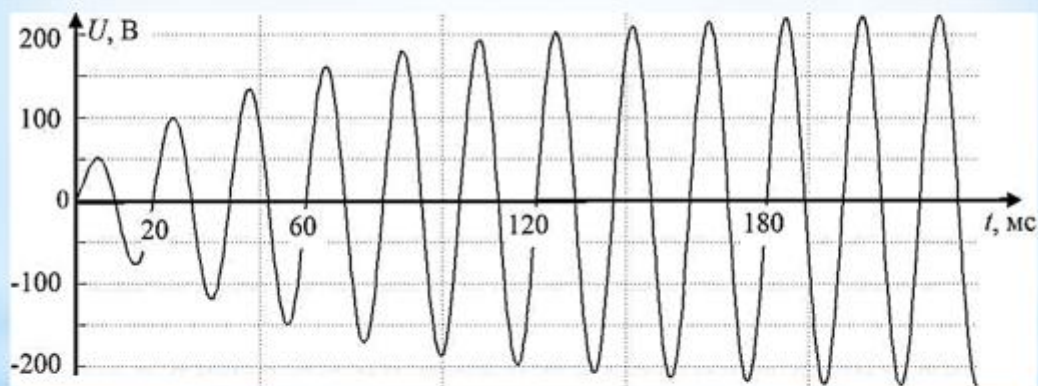
Схема стабілізації напруги та частоти АГ

Принципова схема АГ з автономним інвертором напруги



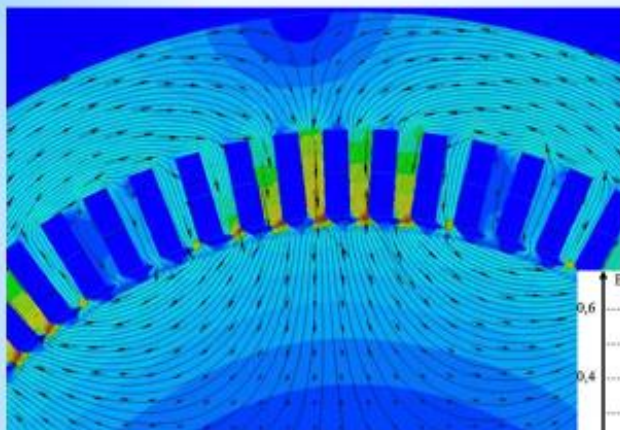
Параметри АГ на базі асинхронної машини АІР132 S4

Параметр	P_{AG} кВт	ω , об/хв	$\Gamma_{ст}$, Ом	$X_{ст}$, Гн	C , мкФ	Z_H , Ом	L_H , Гн	$P_{екв}$, В.О.
Значення	7,5	1500	0,6837	0,004152	120	24	0,007	10



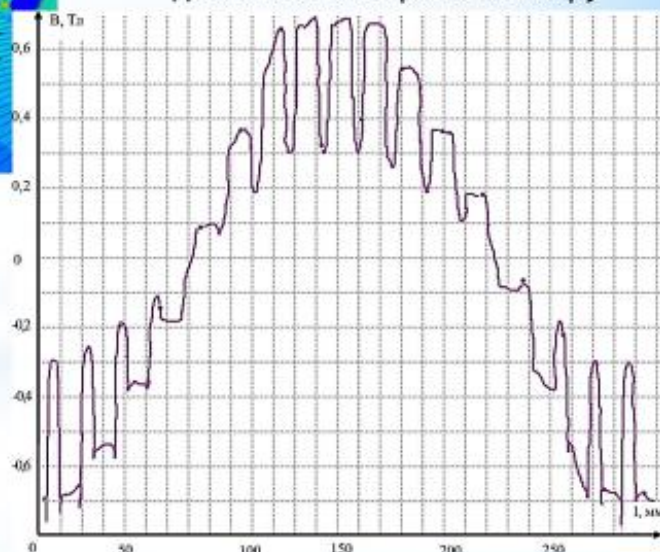
Графік вихідної напруги із схеми АГ

Розрахунок в програмі Elcut 5.1



Вектор магнітної індукції

Магнітна індукція АГ за радіальною довжиною повітряного зазору



Висновки по роботі

1. Встановлено, що процес збудження асинхронного генератора обумовлений явищем параметричного резонансу. Основною причиною виникнення є пульсації магнітної індукції по довжині радіального повітряного зазору.
2. Запропоновані співвідношення визначення фазної ємності і реактивної потужності можуть бути використані при проектуванні асинхронних генераторів як з конденсаторним, так і з інверторним збудженням, в тому числі для розрахунку параметрів ланки постійного струму.
3. Для забезпечення збудження асинхронного генератора у перехідному режимі необхідна наявність об'єму реактивної енергії, порівнянної з потужністю електричної машини.
4. Проаналізовані питання охорони праці при експлуатації асинхронного генератора .