

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:

**«Асинхронізований
синхронний генератор для вітроенергетичних установок»**

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

Р.Є. Руденко Р.Є. Руденко

Керівник О.Б. Єгоров О.Б. Єгоров

Рецензент М.Л. Глєбова 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

Руденку Рінату Євгеновичу

1. Тема проєкту: «Асинхронізований синхронний генератор для вітроенергетичних установок»

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): Вибір типу електричного генератора для вітроенергетичної установки, Розробка математичної моделі електромагнітного розрахунку асинхронізованого синхронного генератора для оптимізації його геометрії, Розробка підсистеми оптимального проектування асинхронізованого синхронного генератора, Охорона праці.

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

1) Цілі та завдання проєктування.

2) Вибір типу електричного генератора для вітроенергетичної установки

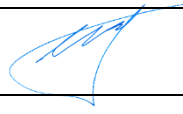
3) Варіанти виключення щіткового вузла для синхронних асинхронізованих генераторів

4) Використання акумуляторної батареї для безконтактного живлення ланцюга ротора асинхронізованого синхронного генератора.

5) Модель вітроенергетичної установки у Ansys Electronics

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		РРинь
Охорона праці	Серіков Я.О., доц. каф. ОП та БЖД		РРинь

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	Вибір типу електричного генератора для вітроенергетичної установки,	25.05.2026-30.05. 2026	
2	Розробка математичної моделі електромагнітного розрахунку асинхронізованого синхронного генератора для оптимізації його геометрії	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. 2025-14.06. 2025	

Студент  Р.Є. Руденко

Керівник роботи  О.Б. Єгоров

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. ВИБІР ТИПУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ.....	8
1.1 Аналіз можливих варіантів електричних генераторів для вітроенергетичних установок.....	10
1.2 Конструктивні варіанти виключення щіткового вузла для асинхронізованих синхронних генераторів	19
1.3. Використання акумуляторної батареї для безконтактного живлення ланцюга ротора асинхронізованого синхронного генератора	27
1.4. Структура проектної системи генератора	31
2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО РОЗРАХУНКУ АСИНХРОНІЗОВАНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ЙОГО ГЕОМЕТРІЇ	34
2.1. Розробка математичної моделі розрахунку максимальних габаритів ротора при забезпеченні відсутності критичних частот у робочому діапазоні швидкостей обертання	36
2.2. Розробка математичної моделі електромагнітного розрахунку асинхронізованого синхронного генератора	39
3. РОЗРОБКА ПІДСИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ АСИНХРОНІЗОВАНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА.....	50
3.1. Постановка задачі однокритеріальної оптимізації асинхронізованого синхронного генератора	51
3.2. Вибір методу оптимізації	52
3.3. Визначення рівнів оптимізації	53
3.4. Алгоритм вибору рівня оптимізації	59
4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	71
ВИСНОВКИ	80
Список літератури.....	83
ДОДАТКИ.....	85

ВСТУП

Актуальність теми дослідження

Упродовж останніх десятиліть питання подальшого розвитку світової енергетики залишається одним із ключових напрямів наукових досліджень та міжнародної енергетичної політики. Незважаючи на значні досягнення у сфері відновлюваної енергетики, традиційні джерела енергії, що базуються на використанні викопного палива (вугілля, нафти та природного газу), продовжують відігравати провідну роль у забезпеченні світових потреб в електричній та тепловій енергії. Це обумовлено наявністю значних запасів вуглеводневої сировини, розвиненою інфраструктурою видобутку та транспортування паливних ресурсів, а також сформованою виробничою та науково-технічною базою, спрямованою на підвищення ефективності традиційних енергетичних технологій.

Разом із тим сучасна вуглеводнева енергетика характеризується низкою системних проблем, які суттєво обмежують перспективи її довгострокового розвитку. Однією з найважливіших тенденцій є поступове зростання вартості видобутку викопного палива. Значна частина найбільш доступних і економічно вигідних родовищ уже освоєна, що зумовлює необхідність переходу до розробки глибокозалягаючих покладів, ресурсів континентального шельфу та важкодоступних регіонів. Такі умови призводять до збільшення капітальних і експлуатаційних витрат та, відповідно, до зниження економічної ефективності традиційного енергетичного сектору.

Не менш важливим фактором є негативний вплив використання викопного палива на навколишнє середовище. Масове спалювання вуглеводнів супроводжується значними викидами парникових газів, насамперед діоксиду вуглецю, що сприяє порушенню природного вуглецевого балансу атмосфери та посиленню процесів глобальної зміни клімату. Наслідки таких змін проявляються у зростанні частоти екстремальних погодних явищ, трансформації природних екосистем та виникненні додаткових соціально-економічних ризиків для суспільства.

Суттєвим недоліком традиційної теплової енергетики також є відносно низький рівень енергетичної ефективності. Навіть для сучасних теплових електростанцій коефіцієнт корисної дії залишається обмеженим, що супроводжується значними втратами енергії та додатковим тепловим навантаженням на довкілля. Крім того, процеси спалювання палива є джерелом викидів оксидів азоту, оксидів сірки, твердих частинок та інших шкідливих речовин, які негативно впливають на стан атмосферного повітря та здоров'я населення. У зв'язку з цим дедалі більшої актуальності набуває питання трансформації структури енергетичного балансу шляхом розширення використання відновлюваних джерел енергії [1].

Сьогодні відновлювані джерела енергії є одним із найбільш динамічних секторів світової енергетики. До них належать гідроенергетичні ресурси, сонячна та вітрова енергія, біоенергетика, геотермальні джерела, а також енергія морських хвиль, припливів і відливів. Частка цих джерел у загальному світовому енергобалансі постійно зростає завдяки вдосконаленню технологій перетворення енергії, підвищенню їхньої ефективності та зменшенню вартості виробництва електроенергії [2].

Серед усіх видів відновлюваної енергетики особливе місце посідає вітроенергетика, яка характеризується значним ресурсним потенціалом, відносною технологічною зрілістю та високими темпами розвитку. Використання енергії вітру дає можливість зменшити залежність від викопного палива, скоротити обсяги шкідливих викидів і підвищити рівень енергетичної безпеки держав.

За даними міжнародних енергетичних організацій, у 2023 році світове виробництво електроенергії вітроенергетичними установками перевищило 1270 ТВт·год, що на 12,6 % більше порівняно з попереднім роком. Найбільшими виробниками електроенергії з використанням енергії вітру були Китай, Сполучені Штати Америки та Німеччина. Водночас за обсягом встановлених потужностей вітроенергетичних установок провідні позиції займали країни Азії, Європи та Північної Америки [2].

Аналіз світових тенденцій свідчить, що протягом останніх двох десятиліть обсяги виробництва електроенергії вітроенергетичними установками збільшилися майже у 30 разів, а сумарна встановлена потужність вітроелектростанцій зросла майже у 40 разів. Такі темпи розвитку підтверджують високий потенціал вітроенергетики як одного з ключових напрямів формування сталої та екологічно безпечної енергетичної системи майбутнього. У зв'язку з цим дослідження, спрямовані на підвищення ефективності вітроенергетичних установок, удосконалення їхніх електромеханічних перетворювачів енергії та систем керування, є актуальними та мають важливе наукове й практичне значення.

ВЕУ є комплексом складних агрегатів (рисунок 1).

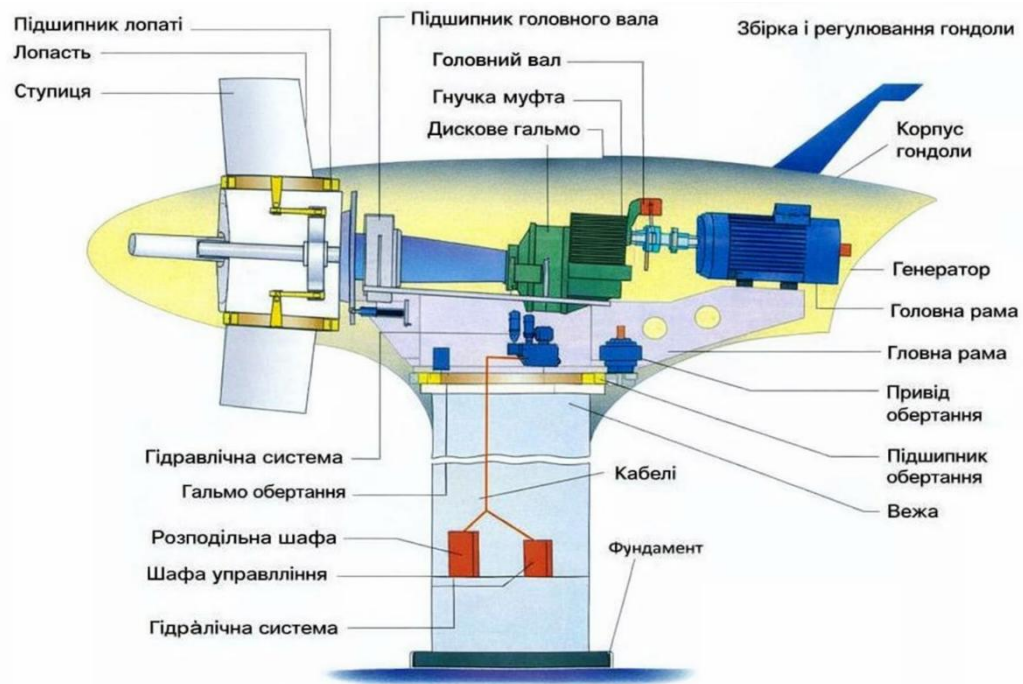


Рис. 1 Структура ВЕУ

Найбільш складною, важливою та дорогою частиною ВЕУ, що багато в чому визначає всі технічні та економічні показники, є генератор. Неправильний вибір типу генератора, некоректна оптимізація геометрії активних елементів, низька енергоефективність електричної машини можуть призвести до ситуації, коли вдосконалення інших елементів втрачає сенс.

Глава 1. ВИБІР ТИПУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ.

Вступні зауваження

На сьогоднішній день розроблено значну кількість конструктивних виконань вітроенергетичних установок (ВЕУ), які відрізняються технічними характеристиками та принципами функціонування. Класифікація таких установок, як правило, здійснюється за низкою ознак, зокрема за орієнтацією осі обертання вітроколеса, швидкохідністю ротора, типом механічної передачі енергії (прямий привід або привід через редуктор), а також за наявністю чи відсутністю системи автоматичної орієнтації на напрямок вітру [3]. Різноманітність конструктивних рішень забезпечує можливість вибору найбільш ефективної конфігурації ВЕУ відповідно до конкретних кліматичних та експлуатаційних умов.

Водночас специфічною особливістю вітрової енергії як первинного джерела є її стохастичний характер. Швидкість та напрямок повітряного потоку постійно змінюються під впливом метеорологічних факторів, що обумовлює необхідність роботи вітроенергетичної установки в широкому діапазоні режимів. У результаті частота обертання вітроколеса та, відповідно, валу генератора зазнає безперервних змін у процесі експлуатації.

Згідно з теорією електричних машин, частота обертання ротора генератора є одним із визначальних факторів, що впливають на параметри вироблюваної електричної енергії [3]. Тому зміна швидкості обертання генератора призводить до відповідної зміни вихідних електричних характеристик, зокрема амплітуди, частоти та фазових параметрів напруги. Це створює додаткові вимоги до систем перетворення та стабілізації електричної енергії, які мають забезпечувати відповідність параметрів генерованої електроенергії вимогам споживачів та електричних мереж. (рисунок 1.1).

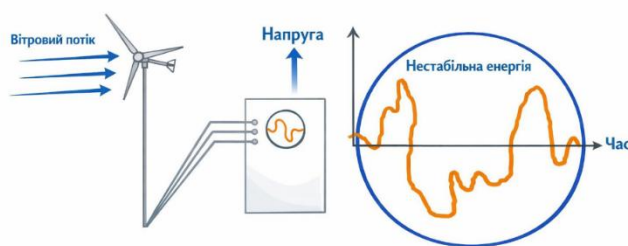


Рис. 1.1. Генерація електроенергії за зміни параметрів вітрового потоку

Водночас сучасні системи електропостачання висувають жорсткі вимоги до показників якості електричної енергії, зокрема щодо стабільності частоти, рівня напруги та інших параметрів. У зв'язку з цим однією з основних науково-технічних проблем вітроенергетики є забезпечення перетворення електроенергії, що генерується в умовах змінних швидкостей і напрямків вітрового потоку, в електроенергію зі стандартизованими характеристиками, придатними для передачі до електричної мережі або живлення споживачів.

Проблема зміни напрямку вітру вирішується різними конструктивними засобами залежно від типу вітроенергетичної установки. Для горизонтально-осьових ВЕУ застосовуються системи автоматичної орієнтації гондоли за напрямком вітрового потоку, які забезпечують оптимальне положення ротора відносно вітру. У випадку вертикально-осьових вітроенергетичних установок така проблема практично відсутня, оскільки їхня конструкція дозволяє ефективно працювати незалежно від напрямку повітряного потоку.

Для забезпечення стабільності параметрів генерованої електроенергії використовуються два основні підходи. Перший підхід передбачає регулювання механічної потужності, що надходить на вал генератора, шляхом безпосереднього впливу на частоту обертання вітроколеса. Одним із найбільш поширених способів реалізації такого регулювання є зміна кута встановлення лопатей відносно напрямку повітряного потоку. Даний метод отримав назву пітч-регулювання (pitch control) та широко застосовується у сучасних

вітроенергетичних установках [4].

Другий підхід ґрунтується на використанні силових електронних перетворювачів для узгодження параметрів виробленої електроенергії з вимогами електричної мережі. У цьому випадку електроенергія зі змінними параметрами піддається проміжному перетворенню за допомогою електронних систем керування, які забезпечують стабілізацію напруги, частоти та інших показників якості електроенергії. Практична реалізація такого підходу передбачає застосування систем керування збудженням генератора, випрямлячів, інверторів та інших пристроїв силової електроніки.

Слід зазначити, що структура та склад систем електричного перетворення значною мірою визначаються типом генератора, який використовується у складі вітроенергетичної установки. Тому одним із найважливіших етапів проєктування ВЕУ є обґрунтований вибір генератора, від характеристик якого залежать енергетична ефективність установки, складність системи керування, надійність роботи та економічні показники всього енергетичного комплексу.

1.1 Аналіз можливих варіантів електричних генераторів для вітроенергетичних установок

Серед усього різноманіття електричних машин, що можуть використовуватися для перетворення механічної енергії вітрового потоку в електричну енергію, найбільшого поширення у складі вітроенергетичних установок набули генератори постійного струму, асинхронні генератори, синхронні генератори та асинхронізовані синхронні генератори [4].

Вибір типу генератора суттєво впливає на ефективність функціонування вітроенергетичної установки, складність системи керування, якість вироблюваної електроенергії та загальну вартість енергетичного комплексу. Тому для обґрунтування найбільш раціонального технічного рішення доцільно здійснити детальний аналіз основних типів генераторів, що застосовуються у вітроенергетиці, розглянувши їхні переваги, недоліки та особливості експлуатації.

Генератор постійного струму

Структурна схема ВЕУ з урахуванням генератора постійного струму (ГПТ) наведено на рисунку 1.2 .

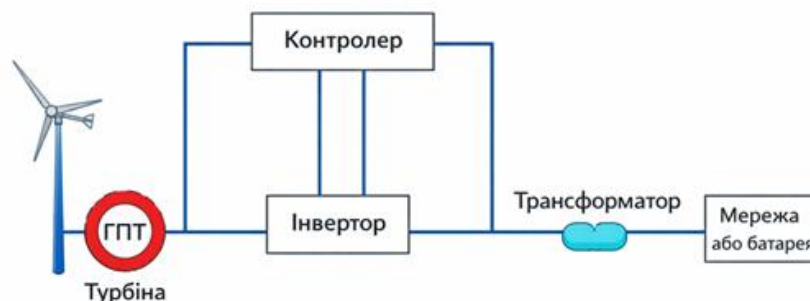


Рис. 1.2 Генератор постійного струму (ГПТ)

Розглянута вітроенергетична установка складається з вітрової турбіни, генератора постійного струму, інвертора, контролера та, за необхідності, трансформатора. Механічна енергія вітрового потоку, що сприймається турбіною, перетворюється генератором у електричну енергію постійного струму. Подальше узгодження параметрів виробленої електроенергії з вимогами споживача або електричної мережі здійснюється за допомогою інвертора та системи керування, які забезпечують формування змінної напруги необхідної частоти та амплітуди. У разі потреби підвищення або зниження рівня напруги до складу установки може додатково включатися трансформатор.

Разом із тим використання генераторів постійного струму у складі вітроенергетичних установок має низку суттєвих недоліків. Насамперед такі машини потребують регулярного технічного обслуговування, що пов'язано з наявністю колекторно-щіткового вузла, схильного до механічного зношування та електричної ерозії. Крім того, колекторний вузол негативно впливає на експлуатаційну надійність установки та обмежує можливість її тривалої безперервної роботи. Додатковими недоліками є підвищена вартість експлуатації та необхідність застосування силових електронних пристроїв, зокрема інвертора і контролера, які забезпечують перетворення та стабілізацію

параметрів електричної енергії [4].

Зазначені особливості зумовили обмежене поширення вітроенергетичних установок на базі генераторів постійного струму у сучасній енергетиці. Нині такі системи застосовуються переважно у вітроенергетичних установках малої потужності, призначених для автономного електропостачання окремих споживачів, де простота реалізації та відносно невисокі вимоги до потужності компенсують їхні конструктивні та експлуатаційні недоліки.

Асинхронний генератор

В установках даного типу застосовуються асинхронні генератори з короткозамкненим ротором, які безпосередньо підключаються до електричної мережі [5]. Структурна схема вітроенергетичної установки з урахуванням асинхронного генератора представлена на рисунку 1.3.

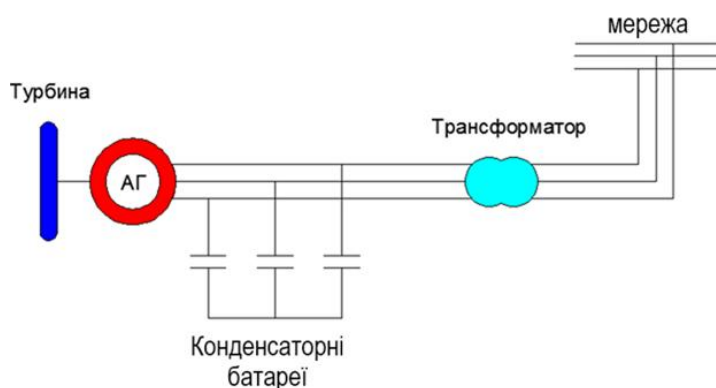


Рис. 1.3. Структурна схема ВЕУ на основі АГ

Суттєвим недоліком асинхронних генераторів є відсутність власного джерела збудження, що обумовлює необхідність споживання реактивної потужності із зовнішньої електричної мережі. При роботі генератора в мережевому режимі це призводить до додаткового навантаження на систему електропостачання та зниження коефіцієнта потужності ($\cos \phi$), що негативно впливає на енергетичні показники установки. Для компенсації реактивної потужності та забезпечення можливості автономної роботи вітроенергетичні установки з асинхронними генераторами, як правило, оснащуються батареями конденсаторів. Проте використання таких пристроїв супроводжується

додатковими капітальними витратами, ускладненням конструкції системи та зниженням її загальної надійності.

Іншим важливим обмеженням асинхронного генератора є залежність процесу генерування електроенергії від величини ковзання. Ефективна робота генератора можлива лише за умови, що механічна швидкість обертання ротора перевищує синхронну швидкість обертання магнітного поля статора. Унаслідок цього діапазон робочих швидкостей вітрового потоку, за яких забезпечується стабільне виробництво електроенергії, є обмеженим.

Для розширення діапазону робочих режимів у вітроенергетичних установках нерідко застосовуються асинхронні генератори з фазним ротором. Наявність доступу до роторного кола дозволяє здійснювати регулювання ковзання шляхом зміни параметрів роторного контуру, що забезпечує роботу генератора в ширшому діапазоні частот обертання. Завдяки цій перевазі генератори даного типу тривалий час використовувалися у вітроенергетичних установках малої та середньої потужності та були прийняті як одне з базових технічних рішень у європейській практиці [5].

Разом із тим зазначені недоліки є наслідком фундаментальних особливостей принципу дії асинхронної електричної машини. Необхідність споживання реактивної потужності, обмежені можливості регулювання режимів роботи та залежність характеристик генератора від величини ковзання істотно ускладнюють підвищення ефективності таких систем. Це значною мірою обмежує перспективи подальшого розвитку вітроенергетичних установок на основі асинхронних генераторів та стимулює пошук більш досконалих генераторних систем для сучасної вітроенергетики..

Синхронний генератор

Трифазні синхронні генератори є одними з найбільш поширених електромеханічних перетворювачів енергії, що застосовуються у вітроенергетичних установках. З моменту становлення сучасної вітроенергетики синхронні машини розглядалися як перспективна основа генераторних систем

завдяки високим енергетичним показникам, надійності та можливості роботи в широкому діапазоні потужностей. Залежно від способу створення магнітного поля ротора такі генератори можуть виконуватися з електромагнітним збудженням або із застосуванням постійних магнітів [4]. Використання постійних магнітів дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії та покращити масогабаритні характеристики машини за рахунок відсутності втрат енергії в обмотці збудження [4].

Водночас експлуатація синхронних генераторів у складі вітроенергетичних установок пов'язана з певними технічними труднощами. Основною з них є жорсткий взаємозв'язок між частотою вихідної напруги та швидкістю обертання ротора. Для забезпечення вироблення електроенергії зі стандартизованими параметрами, насамперед за частотою та рівнем напруги, необхідно підтримувати практично сталу частоту обертання генератора незалежно від змін швидкості вітрового потоку.

У синхронних машинах з електромагнітним збудженням існує можливість регулювання амплітуди вихідної напруги шляхом зміни струму в обмотці збудження. Такий спосіб дозволяє частково компенсувати вплив зміни навантаження та забезпечувати необхідний рівень напруги на виході генератора. Проте регулювання струму збудження не впливає на частоту генерованої напруги, яка визначається швидкістю обертання ротора. Тому за змінних швидкостей вітру забезпечення стабільної частоти вихідної електроенергії без застосування додаткових механічних або електронних засобів керування є неможливим.

Зазначена особливість обумовлює необхідність використання у складі вітроенергетичних установок систем регулювання швидкості обертання або силових електронних перетворювачів, які забезпечують узгодження параметрів виробленої електроенергії з вимогами електричної мережі. Структурну схему вітроенергетичної установки на базі синхронного генератора наведено на рисунку 1.4.

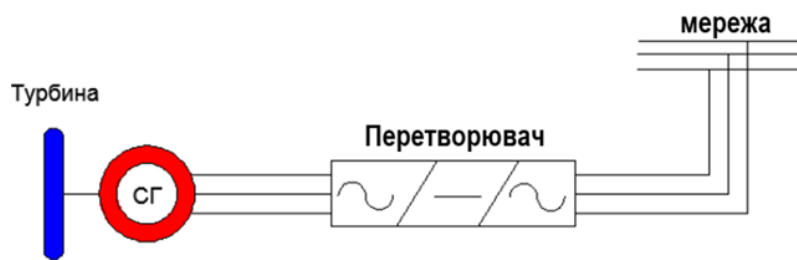


Рис. 1.4 Структурна схема ВЕУ з урахуванням синхронного генератора (СГ)

Як впливає зі структурної схеми, до складу вітроенергетичної установки, окрім вітрової турбіни та синхронного генератора, входить силовий електронний перетворювач частоти. Основним призначенням цього пристрою є забезпечення стабільних параметрів вихідної електроенергії незалежно від змін швидкості обертання генератора. Принцип його роботи полягає у двоступеневому перетворенні електричної енергії: на першому етапі змінна напруга, вироблена генератором, випрямляється, а на другому — за допомогою інвертора формується змінна напруга із заданими значеннями частоти, амплітуди та інших параметрів, що відповідають вимогам електричної мережі або споживача.

Застосування силових електронних перетворювачів дозволяє реалізувати режим роботи зі змінною швидкістю обертання вітротурбіни, що сприяє підвищенню ефективності використання енергії вітрового потоку та забезпечує оптимізацію режимів функціонування вітроенергетичної установки. Завдяки цим перевагам вітрогенератори на основі синхронних машин із повним електронним перетворенням потужності набули широкого поширення в установках малої, середньої та значної потужності.

Разом із тим використання силових електронних перетворювачів супроводжується низкою технічних обмежень. Насамперед це пов'язано з необхідністю застосування високопотужних напівпровідникових приладів, вартість та складність яких зростають зі збільшенням потужності вітроенергетичної установки. Крім того, кожен етап перетворення електричної енергії супроводжується певними втратами, що призводить до зменшення загального коефіцієнта корисної дії енергетичної системи. Таким чином, незважаючи на високі функціональні можливості, багатоступеневе перетворення

енергії зумовлює додаткові енергетичні втрати та ускладнює структуру генерувального комплексу, що особливо відчутно у вітроенергетичних установках великої потужності..

Асинхронізований синхронний генератор (машина подвійного живлення)

Протягом останніх років у вітроенергетичних установках широкого поширення набули генераторні системи на основі машин подвійного живлення (Doubly Fed Induction Generator, DFIG), які в науково-технічній літературі також відомі як асинхронізовані синхронні генератори (АСГ) [5]. Підвищений інтерес до таких машин обумовлений їхньою здатністю забезпечувати ефективне генерування електроенергії в умовах змінної швидкості вітрового потоку за відносно невеликих витрат на силову електроніку.

За конструктивним виконанням DFIG являє собою асинхронну машину з фазним ротором, однак принцип її функціонування та схема підключення до електричної мережі суттєво відрізняються від традиційних асинхронних генераторів. Статорна обмотка генератора безпосередньо підключається до мережі змінного струму, що забезпечує передачу основної частини генерованої потужності без додаткових перетворень. Водночас роторна обмотка з'єднується з мережею через двонаправлений перетворювач частоти, який забезпечує регулювання параметрів роторного струму та керування режимами роботи генератора [3].

Завдяки такій схемі підключення забезпечується можливість роботи генератора в широкому діапазоні швидкостей обертання ротора при збереженні необхідних параметрів електроенергії, що передається до мережі. Це дозволяє підвищити ефективність використання енергії вітру та покращити енергетичні показники вітроенергетичної установки. Структурна схема вітроенергетичної установки на основі асинхронізованого синхронного генератора наведена на рисунку 1.5.

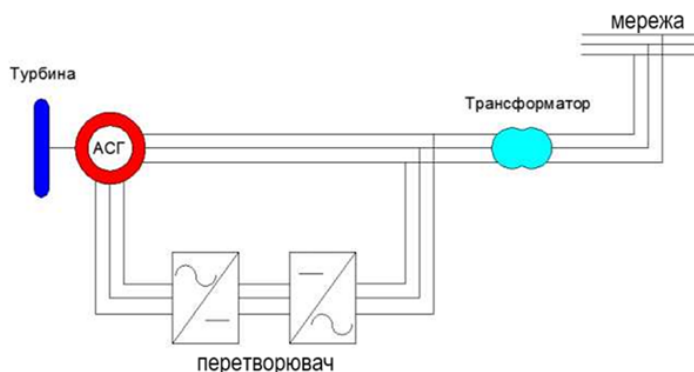


Рис. 1.5. Структурна схема ВЕУ на основі АСГ

Даний тип генератора здатний працювати у трьох основних режимах:

При частоті обертання ротора нижче за синхронну електрична потужність з необхідною частотою подається з мережі в роторний ланцюг, в результаті чого формується потік енергії, що передається зі статорної обмотки в мережу.

При синхронній частоті обертання на роторну обмотку подається постійна напруга і машина функціонує як синхронний генератор.

При частоті обертання ротора вище за синхронну реалізується режим, аналогічний роботі при досинхронній швидкості, проте напрямок обертання магнітного поля ротора стає протилежним.

Електрична машина, що розглядається, забезпечує можливість вироблення електроенергії з постійними параметрами в досить широкому діапазоні зміни частоти обертання ротора, що досягає приблизно $\pm 30\%$, а також дозволяє керувати потоками реактивної потужності через ланцюг збудження. Оскільки через цей ланцюг проходить лише частина повної потужності, це сприяє зменшенню габаритів та вартості електронного перетворювача [6]. Саме ці особливості роблять машину подвійного живлення одним з найбільш ефективних і привабливих рішень для застосування у вітроенергетичних установках. У результаті до 2015 року частка асинхронізованих синхронних генераторів становила близько 85% загальної встановленої потужності вітрогенераторів.

Основним недоліком генераторів даного типу є наявність щітково-контактного вузла, що забезпечує струмопідведення до роторного ланцюга і вимагає трудомісткого технічного обслуговування.

Наразі серійне виробництво асинхронізованих синхронних генераторів для вітроенергетичних установок великої потужності освоєно, зокрема, такими великими європейськими компаніями, як ABB та Siemens.

ABB має лінійку генераторів подвійного живлення потужністю від 2,2 до 3,6 МВт з повітряним та рідинним охолодженням, що мають ККД до 97,5 % (рисунок 1.6)



Рис. 1.6. Зовнішній вигляд генератора подвійного живлення фірми ABB

Компанія Siemens пропонує генератори потужністю від 0,6 до 10 МВт. Генератори потужністю до 1,25 МВт мають повітряний тип охолодження, понад 1,25 МВт – водяний. ККД для генераторів виробництва Siemens в залежності від потужності становить близько 98% (рисунок 1.7).

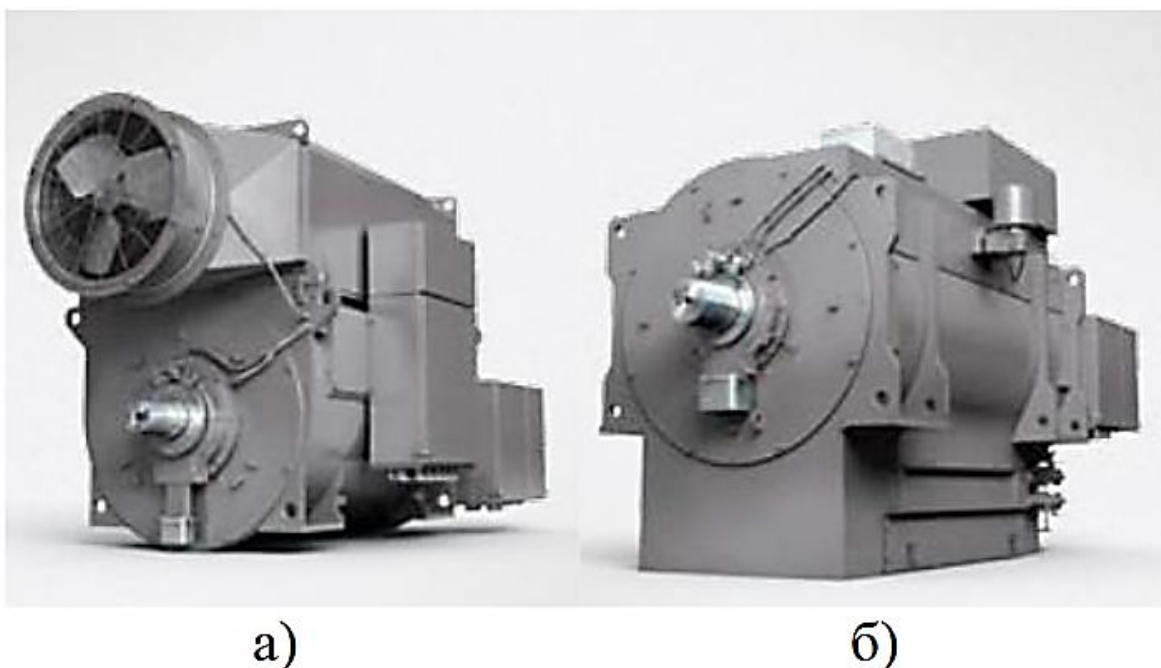


Рис. 1.7. Генератори подвійного живлення фірми Siemens: потужністю 2,5 МВт;
б) потужністю 5,3 МВт

Варіант АСГ на даний час має найбільше застосування у ВЕУ великих потужностей. Однак у нього залишається технічний недолік, пов'язаний з наявністю ковзного контакту і змушує шукати рішення щодо його подолання.

1.2 Конструктивні варіанти виключення щіткового вузла для синхронних асинхронізованих генераторів

Усунення щітково-контактного вузла з конструкції електричних генераторів різних типів залишається актуальним науково-технічним та інженерним завданням. Розв'язання цієї проблеми дає змогу підвищити експлуатаційну надійність електричних машин, зменшити інтенсивність зношування елементів конструкції та спростити процеси технічного обслуговування. Особливого значення це набуває для генераторного обладнання, що експлуатується на значній висоті, у важкодоступних місцях або в умовах дії складних кліматичних чинників [3].

З метою визначення найбільш раціонального способу відмови від щітково-контактного вузла було проведено аналіз спеціалізованих науково-технічних

джерел. Узагальнення результатів аналізу свідчить, що в сучасній світовій практиці застосовуються два основні підходи до вирішення зазначеної проблеми:

- використання безщіткового збуджувального пристрою;
- застосування обертового трансформатора.

Нижче розглянуто принцип дії, конструктивні особливості, переваги та обмеження кожного із зазначених технічних рішень.

1.2.1. Встановлення безщіткового збудливого пристрою

Дане конструктивне рішення широко використовується на синхронних турбогенераторах та синхронних електродвигунах великої потужності [13]. БВУ є додатковим електричним генератором, встановленим на один з основною електричною машиною вал. Для синхронних двигунів та турбогенераторів використовується БВУ на основі зверненого синхронного генератора з включенням у ланцюг ротора діодного випрямляча. Загальний вигляд БВУ представлений рисунку 1.8. Загальна електрична схема БВУ – на рисунку 1.9



Рис. 1.8. Конструкція БВУ: 1 - статор, 2 - ротор, 3 - випрямляч, що обертається.

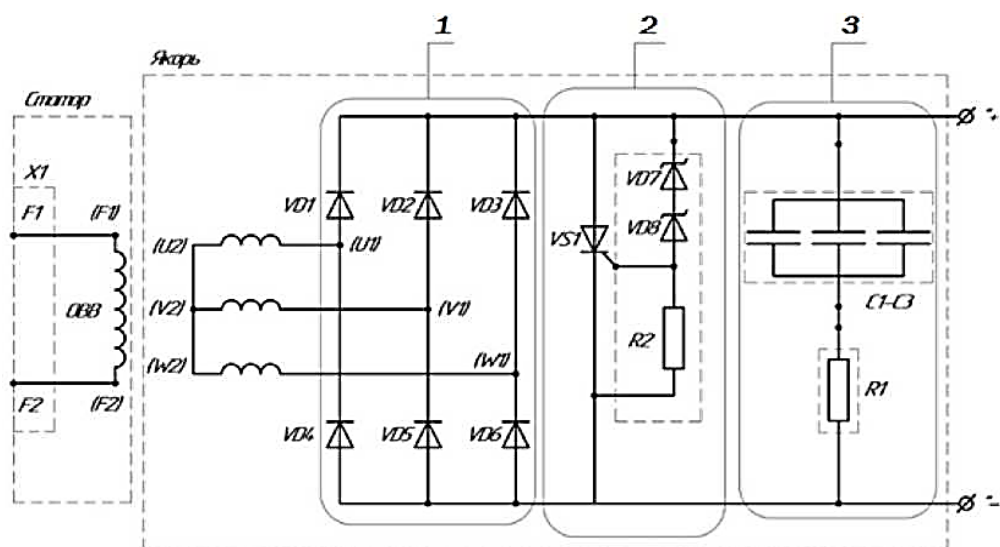


Рис. 1.9. Загальна електрична схема БВУ для синхронних двигунів та турбогенераторів: 1 – діодний міст, 2 – захисний ланцюг на час пуску синхронного двигуна, 3 – фільтр

Синхронні двигуни та турбогенератори, як правило, експлуатуються за умов сталої частоти обертання. Для забезпечення їх нормального функціонування необхідне живлення роторної обмотки постійним струмом. У зв'язку з цим концепція безщіткового збуджувального пристрою повною мірою відповідає умовам роботи зазначених електричних машин, що зумовило її широке практичне застосування.

Розміщення безщіткового збуджувального пристрою на спільному валу з асинхронізованим синхронним генератором призводить до формування вентильно-машинного електромеханічного каскаду. Така структура належить до основних схем асинхронних вентильних каскадів, які детально розглянуто у джерелі [13].

Під час аналізу можливості заміни щітково-контактного вузла безщітковим збуджувальним пристроєм у складі асинхронізованого синхронного генератора необхідно враховувати низку конструктивних та електромагнітних вимог. До основних із них належать такі:

- роторна обмотка асинхронізованого синхронного генератора має бути виконана трифазною;

– генератор повинен зберігати працездатність у широкому діапазоні частот обертання;

– безщітковий збуджувальний пристрій має забезпечувати живлення роторної обмотки як змінним струмом зі змінними частотою, амплітудою та фазою, так і постійним струмом.

Аналіз наведених вимог дає змогу виокремити два основні концептуальні підходи до побудови конструкції та електричної схеми безщіткового збуджувального пристрою.

Конструкція безщіткового збудливого пристрою на основі перетвореного синхронного генератора.

Ця конструкція аналогічна розглянутій вище конструкції БВУ для синхронних двигунів і турбогенераторів, але замість діодного мосту, ланцюга захисту та фільтра в ланцюг обмотки ротора встановлюється ПЧ, який залежно від швидкості обертання живить обмотку ротора АСГ постійним або змінним струмом певної частоти, амплітуду. Загальна електрична схема даного типу БВУ представлена на рисунку 1.10.

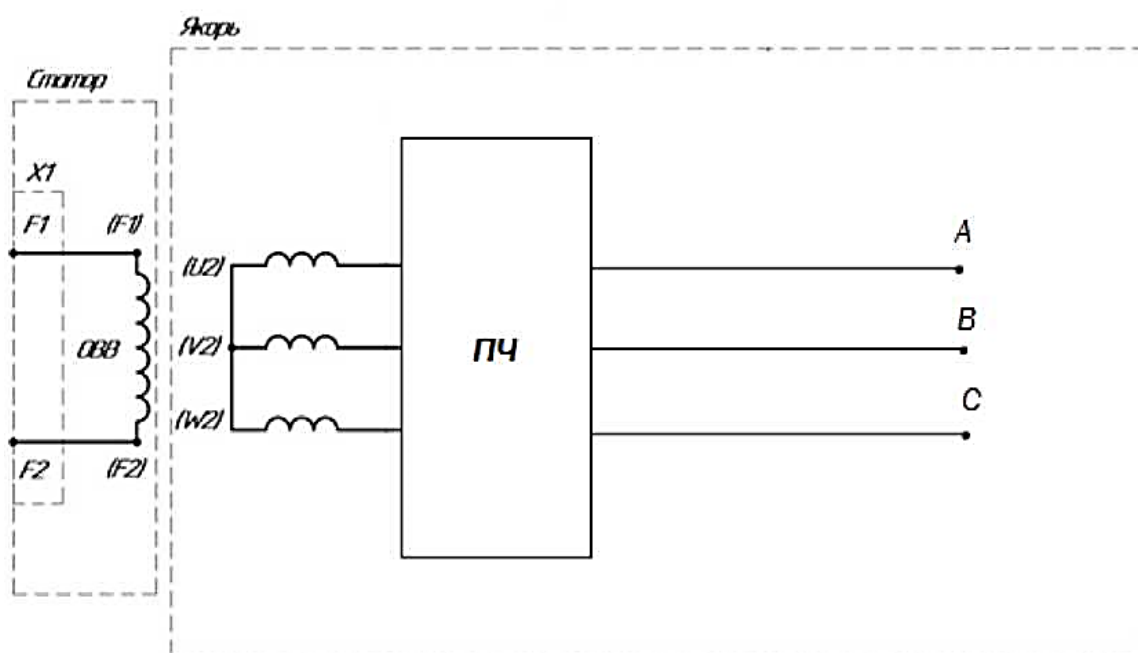


Рис. 1.10. Загальна електрична схема БВУ для АСГ на основі зверненого синхронного генератора

Необхідно зазначити, що асинхронізований синхронний генератор, призначений для роботи у складі вітроенергетичної установки, має забезпечувати ефективне функціонування в широкому діапазоні частот обертання ротора. За таких умов безщітковий збуджувальний пристрій повинен залишатися незалежним від швидкості обертання джерелом регулювання потужності та магнітного потоку.

У зв'язку з цим найбільш доцільним є застосування електромагнітного збудження, оскільки воно забезпечує можливість керування величиною магнітного потоку. На відміну від цього, збудження від постійних магнітів має обмежені регульовальні можливості, оскільки магнітний потік у такій системі практично не піддається оперативному зміненню.

Разом із тим перспективним технічним рішенням може бути поєднання електромагнітного та магнітоелектричного збудження. Такий підхід реалізується шляхом використання у складі безщіткового збуджувального пристрою електричного генератора комбінованого збудження [5].

Конструкція безщіткового збудливого пристрою на основі синхронного асинхронізованого генератора

Якщо у безщітковому збуджувальному пристрої, побудованому на основі оберненої синхронної машини, замінити явнополюсний статор на статор із розподіленою трифазною обмоткою, то за конструктивними ознаками така електрична машина відповідатиме асинхронізованому синхронному генератору. У результаті формується електромеханічна система, що складається з двох асинхронізованих синхронних генераторів, ротори яких розміщені на спільному валу.

Розглянута концепція дає змогу відмовитися від застосування перетворювача частоти в колі ротора основного асинхронізованого синхронного генератора. Водночас виникає необхідність використання електронного випрямляча, який за синхронної частоти обертання ротора забезпечує

перетворення змінного струму безщіткового збуджувального пристрою на постійний струм.

За частот обертання, що відрізняються від синхронної, необхідні параметри напруги живлення роторної обмотки асинхронізованого синхронного генератора можуть формуватися шляхом відповідного регулювання частоти, фази та амплітуди напруги, яка подається на статорну обмотку безщіткового збуджувального пристрою. Таким чином, використання окремого перетворювача частоти в колі роторної обмотки асинхронізованого синхронного генератора не є обов'язковим.

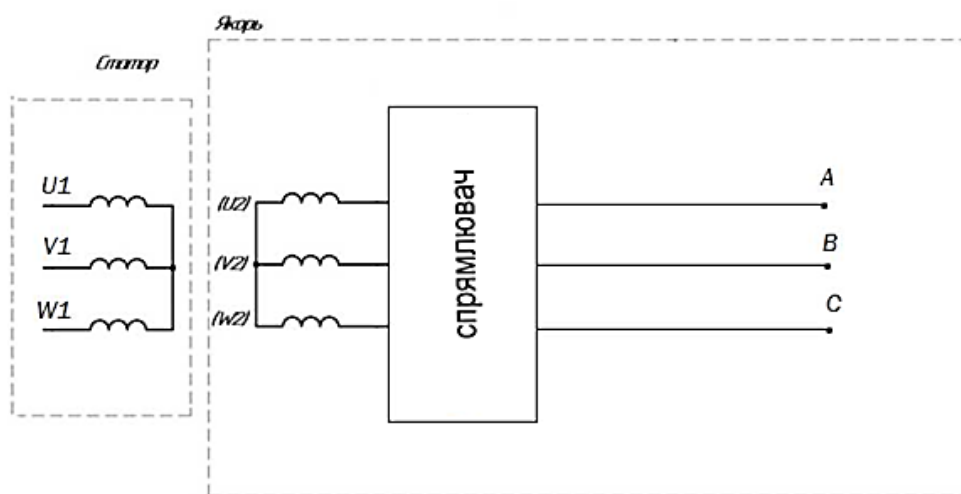


Рис. 1.11. Загальна електрична схема БВУ на основі АСГ

При застосуванні будь-якого типу БВУ необхідно розуміти, що частина механічної енергії, що повідомляється ротору генератора, йде на подолання моменту, що гальмує, створюваного самим БВУ.

1.2.2. Установка трансформатора, що обертається

У роботах [4, 5] розглянуто варіант заміни щітково-контактного вузла асинхронізованого синхронного генератора за допомогою обертового трансформатора.

З конструктивної точки зору запропонований обертовий трансформатор

виконано у вигляді двох металевих дисків, у кожному з яких розміщено однофазну обмотку. Один із дисків установлюється нерухомо, тоді як другий закріплюється на валу асинхронізованого синхронного генератора. Оскільки роторна обмотка такого генератора є трифазною, для кожної її фази передбачається використання окремого обертового трансформатора.

Під час подавання напруги на обмотку, розташовану на нерухомому диску, внаслідок гальванічно розв'язаного електромагнітного зв'язку в обмотці, розміщеній на диску, що обертається, індукуються напруга тієї самої частоти, що й у нерухомій обмотці. Таким чином забезпечується безконтактне передавання електричної енергії до роторного кола генератора без використання щітково-контактного вузла.

Загальний вигляд асинхронізованого синхронного генератора з обертовим трансформатором наведено на рис. 1.12, а його принципову електричну схему — на відповідному рисунку 1.13.

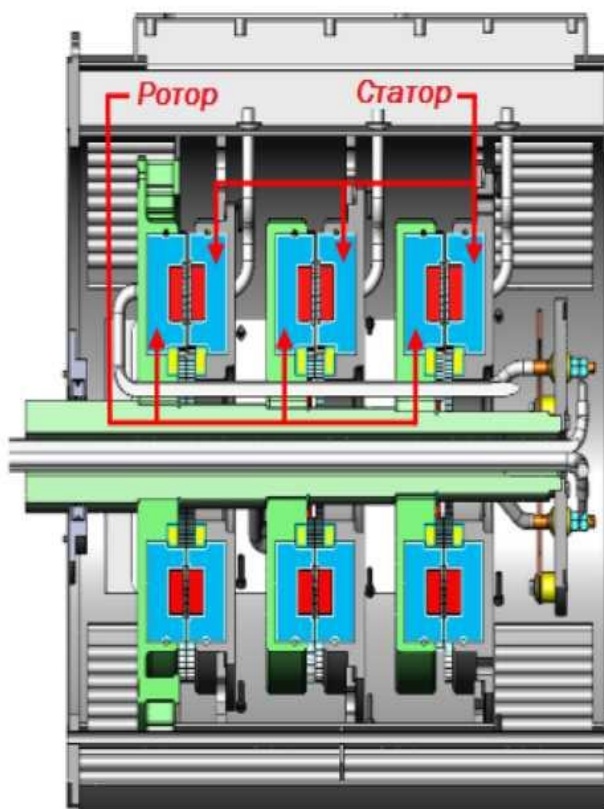


Рис. 1. 12 . Загальний вигляд трансформатора, що обертається.

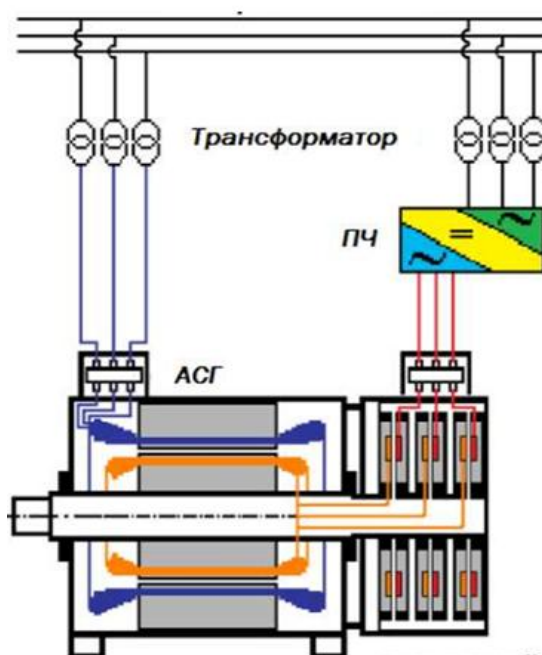


Рис. 1. 13. Загальна електрична схема АСГ з трансформатором, що обертається

Розглянуте конструктивне рішення можна вважати перспективним з погляду підвищення надійності та спрощення системи передавання енергії до роторного кола. На відміну від безщіткового збуджувального пристрою, обертовий трансформатор не створює додаткового гальмівного моменту, який призводив би до відбору частини механічної потужності, підведеної до вала генератора.

Водночас застосування такого технічного рішення супроводжується низкою конструктивних та електромагнітних ускладнень. Зокрема, виникають проблеми, пов'язані з дією магнітних сил притягання між нерухомим і обертовим дисками трансформатора.

Крім того, зазначене рішення має суттєве функціональне обмеження. За синхронної частоти обертання ротора його обмотка має живитися постійним струмом, тоді як безпосереднє передавання постійного струму через обертовий трансформатор є неможливим. Для реалізації такого режиму необхідне ускладнення конструкції шляхом розміщення випрямляча на обертовій частині системи. Це, у свою чергу, знижує основні переваги даного варіанта, зокрема простоту конструкції, надійність і зручність технічного обслуговування.

1.3. Використання акумуляторної батареї для безконтактного живлення ланцюга ротора асинхронізованого синхронного генератора

Розглянуті рішення справді дозволяють повністю відмовитися від використання щітково-контактного вузла. Однак слід враховувати, що в цьому випадку порівняно простий контактний пристрій замінюється складнішим агрегатом, який вимагає додаткового простору, відрізняється вищою вартістю, а також потребує ремонту та проведення регламентного обслуговування.

Проведений аналіз показує, що як безконтактне джерело живлення роторного ланцюга може бути використана акумуляторна батарея, розташована безпосередньо на частині машини, що обертається. При такому підході на роторі також необхідно встановити електронний інвертор, призначений для перетворення постійної напруги акумуляторної батареї на змінну напругу з необхідними параметрами. При синхронній частоті обертання живлення роторної обмотки може здійснюватись постійним струмом безпосередньо від акумуляторної батареї.

Загальний вид асинхронізованого синхронного генератора з акумуляторною батареєю, встановленою на роторі, представлений на рисунку 1.14, а загальна електрична схема установки - на відповідному рисунку 1.15.

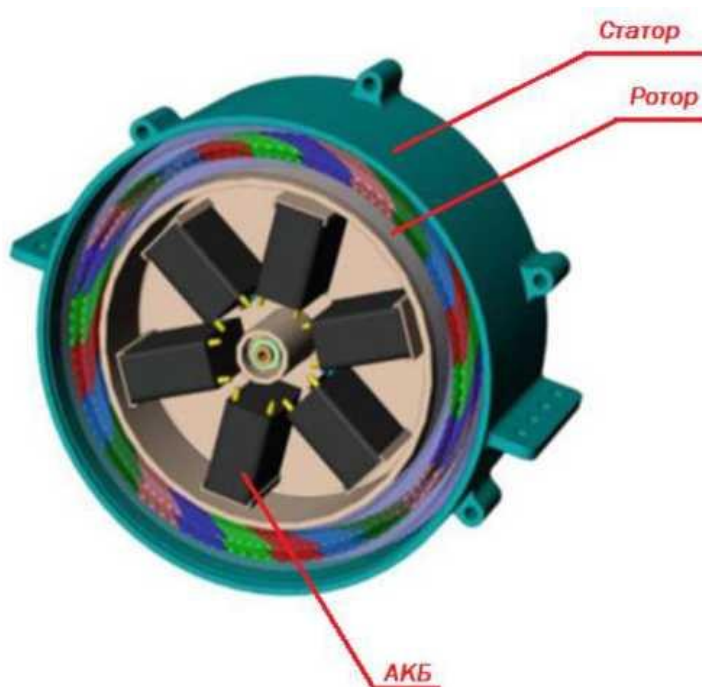


Рис. 1.14 . Загальний вигляд АСГ з АКБ на роторі

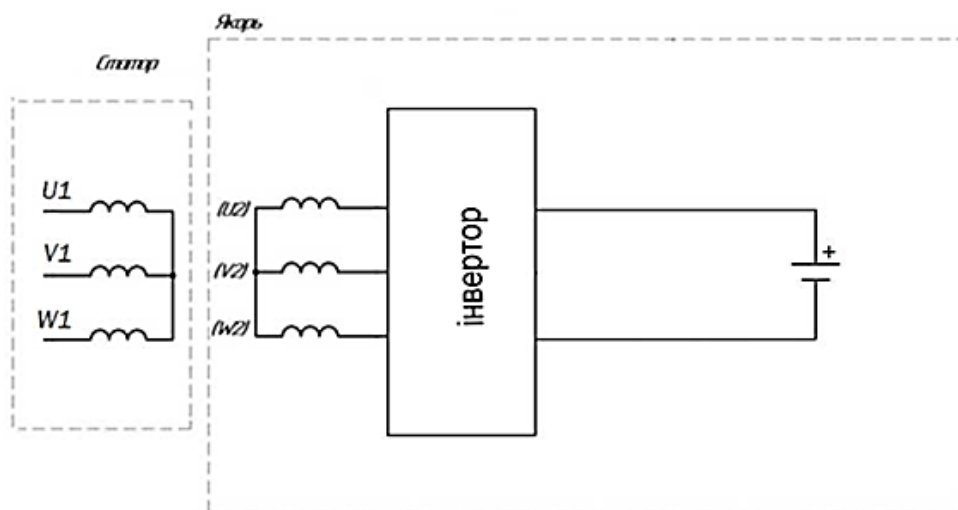


Рис. 1.15 . Загальна електрична схема АСГ із АКБ

Розглянуте інноваційне технічне рішення дає змогу усунути низку суттєвих функціональних і схемотехнічних суперечностей. З одного боку, воно сприяє спрощенню системи керування завдяки виключенню окремого етапу перетворення змінного струму на постійний. З іншого боку, акумуляторна батарея в такій системі може виконувати функцію накопичувача електричної енергії, забезпечуючи додаткову гнучкість роботи енергетичного комплексу.

Навіть за відсутності вітрового потоку та повної зупинки ротора акумуляторна батарея, працюючи в режимі розряду, здатна забезпечувати передавання електричної енергії до мережі. У цьому випадку система фактично функціонує як перетворювач постійної напруги на змінну, що розширює її експлуатаційні можливості.

Запропоноване технічне рішення забезпечує можливість роботи генератора як в автономному режимі, так і в режимі паралельної роботи з електричною мережею. Це має особливе значення для створення вітроенергетичних парків, де важливими є стабільність енергопостачання, керованість режимів роботи та можливість інтеграції накопичувачів енергії.

Водночас необхідно враховувати, що ємність акумуляторної батареї є обмеженою. У разі її повного розрядження енергетичний комплекс втрачає можливість подальшого функціонування в режимі живлення навантаження від накопичувача. Отже, режим розряду акумуляторної батареї має періодично

змінюватися режимом її підзаряджання. У запропонованому технічному рішенні така можливість передбачена конструктивно та схемотехнічно.

На діаграмі, наведеній на рис. 1.16, схематично представлено можливі режими роботи асинхронізованого синхронного генератора в руховому та генераторному режимах за досинхронних і надсинхронних частот обертання. Діаграма ілюструє напрями передавання енергетичних потоків у колах статора та ротора залежно від режиму роботи електромеханічної системи.

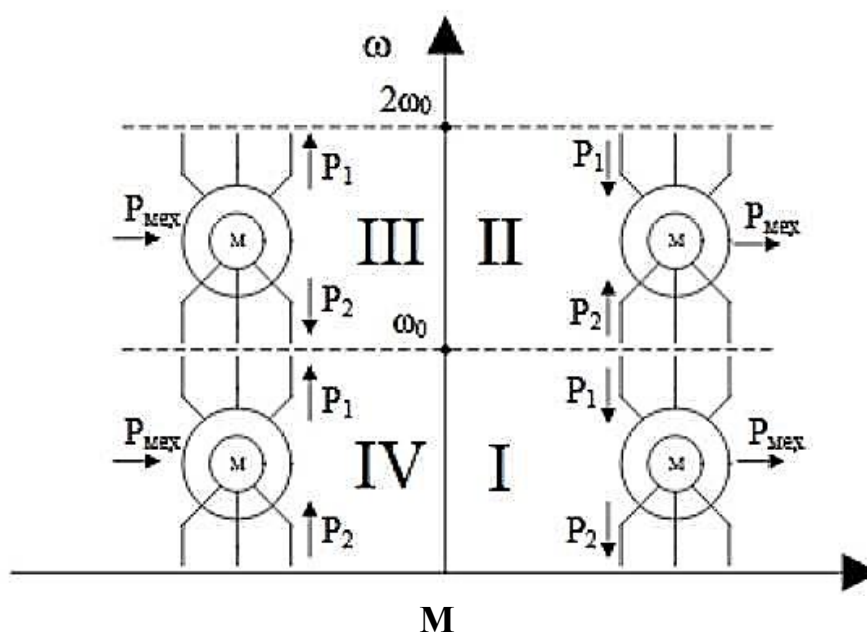


Рис. 1. 16. Режими роботи, що реалізуються в АСГ

Як впливає з наведеної діаграми, у генераторному режимі за частоти обертання ротора, що перевищує синхронну, тобто в області III, потужність у роторному колі асинхронізованого синхронного генератора змінює свій напрям [6]. Це означає, що в зазначеному режимі роторна обмотка не споживає електричну енергію, а, навпаки, генерує її. Вказана особливість може бути використана для заряджання акумуляторної батареї та подальшого накопичення електричної енергії у складі вітроенергетичної установки.

Розглянута концепція є перспективною, оскільки дає змогу не лише виключити щітково-контактний вузол із конструкції асинхронізованого синхронного генератора, а й реалізувати у вітроенергетичній установці функцію акумулювання електричної енергії. Це має особливе значення для

альтернативних джерел енергії, робота яких характеризується нерівномірністю та стохастичністю надходження первинного енергетичного ресурсу.

Водночас необхідно враховувати, що дія відцентрових сил на електроліт акумуляторної батареї є нетиповим експлуатаційним режимом і потребує проведення додаткових досліджень, спрямованих на оцінювання можливості практичного застосування такої технології. Крім того, розміщення акумуляторної батареї на роторі потребує наявності достатнього конструктивного об'єму. З огляду на це на початковому етапі таке технічне рішення доцільно рекомендувати передусім для тихохідних вітроенергетичних установок із вертикальною віссю обертання, які характеризуються значними габаритними розмірами та відносно малими лінійними швидкостями обертання. Після апробації зазначеної концепції на таких установках і отримання позитивних результатів експериментальних досліджень може бути розглянута можливість її застосування також в установках із вищими частотами обертання.

Сучасний рівень розвитку акумуляторних технологій уже створює передумови для практичного використання цієї інноваційної концепції в генераторах малої та середньої потужності. У подальшому, у міру підвищення питомої енергоємності акумуляторних батарей, може з'явитися можливість її застосування і в генераторах великої потужності.

На сучасному етапі для швидкохідних вітроенергетичних установок із горизонтальною та вертикальною віссю обертання більш доцільним є застосування технічних рішень на основі безщіткового збуджувального пристрою або обертового трансформатора.

Таким чином, виконаний аналіз дає змогу визначити базові типи генераторів для подальших досліджень вітроенергетичних установок. Для тихохідних установок із вертикальною віссю обертання перспективним рішенням може вважатися асинхронізований синхронний генератор із системою керування в роторному колі, що живиться від акумуляторної батареї, яка одночасно виконує функції джерела струмопідведення та накопичувача електричної енергії. Для швидкохідних вітроенергетичних установок із

горизонтальною або вертикальною віссю обертання доцільнішим є використання асинхронізованих синхронних генераторів, оснащених безщітковим збуджувальним пристроєм або обертовим трансформатором.

1.4. Структура проектної системи асинхронізованого синхронного генератора

Повноцінна структура системи автоматизованого проектування охоплює технічне, математичне, програмне, інформаційне, лінгвістичне, методичне, організаційне та інші види забезпечення [2]. У галузі електричних машин у світовій практиці наразі відсутні повністю завершені системи такого рівня. Найбільш повно це завдання було реалізовано під час створення САПР асинхронних двигунів у межах проектування промислової серії зазначених виробів, що потребувало значних матеріальних, часових та інтелектуальних ресурсів. Для інших типів електричних машин подібний рівень комплексної розробки надалі не був відтворений.

Аналіз наукових публікацій свідчить, що дослідження в цьому напрямі проводяться в багатьох країнах. Водночас на сьогодні завершені програмні продукти такого класу не набули широкої комерціалізації та фактично залишаються недоступними для придбання як стосовно машин подвійного живлення, так і щодо інших типів електричних машин. Найбільш розвиненою є група систем інженерного аналізу, призначених для розрахунку механічних напружень, електромагнітного та теплового стану, а також для моделювання аеродинамічних і гідродинамічних процесів.

Засоби синтезу переважно представлені окремими оптимізаційними модулями, які реалізують різні методи перебору незалежних змінних і вибору раціональних параметрів проєктованого об'єкта.

Разом із тим на сучасному етапі дослідники мають у своєму розпорядженні доступний набір ефективних і добре апробованих програмних засобів, використання яких дає змогу формувати проєктні системи для розроблення електричних машин різних класів. Такі системи можуть створюватися шляхом

поєднання окремих спеціалізованих інструментів в єдине інтегроване середовище проєктування. Для реалізації такої інтеграції можуть застосовуватися різні алгоритмічні мови програмування та засоби міжпрограмної взаємодії.

Основне завдання розробника полягає в забезпеченні максимальної гнучкості проєктної системи. Така система має зберігати цілісність і функціональну узгодженість у разі зміни технічного завдання, введення нових технологічних або експлуатаційних обмежень, а також під час коригування показників якості проєкту.

Аналіз еволюції систем автоматизованого проєктування показує, що їх розвиток загалом спрямований на реалізацію наскрізної технології проєктування. Такий підхід передбачає скорочення обсягу паперового документообігу, зменшення кількості проміжних етапів проєктування та оптимізацію складу учасників, залучених до розроблення проєкту.

Отже, під час створення сучасних проєктних систем або їх окремих компонентів необхідно враховувати зазначені тенденції розвитку автоматизованого проєктування. Укрупнену структуру наскрізного проєктування асинхронізованого синхронного генератора представлено на рисунку 1.17.

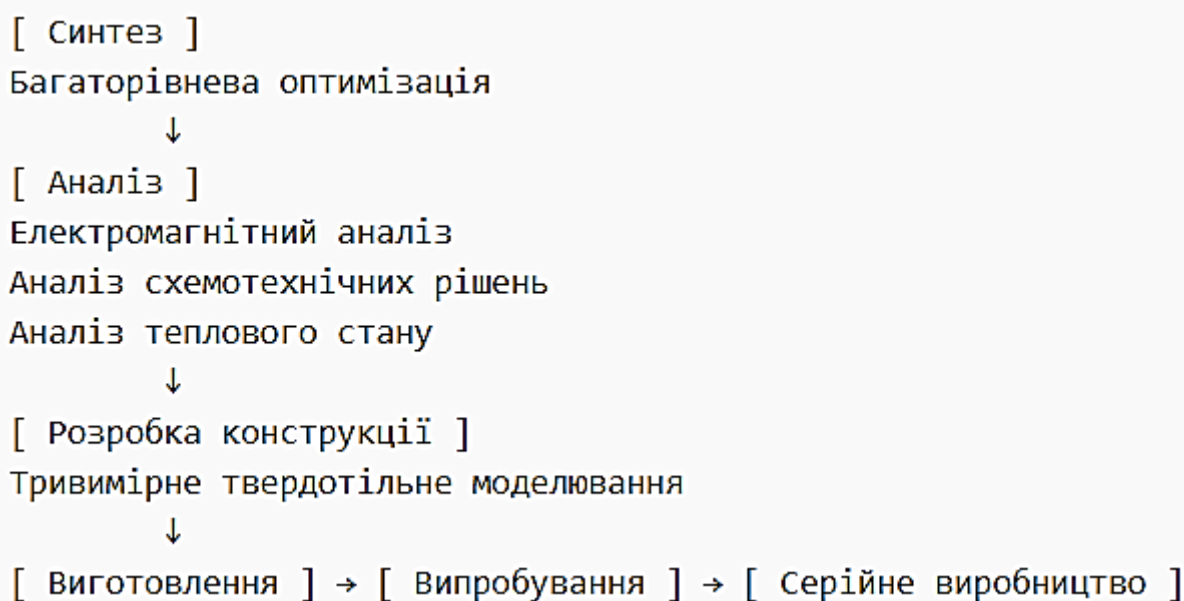


Рис. 1. 17 . Структура наскрізного проєктування АСГ

Висновки

1. Основна проблема вітроенергетики полягає в необхідності перетворення електричної енергії зі змінними та нестандартизованими параметрами в електроенергію зі стандартними значеннями частоти, амплітуди та фази за умов безперервної зміни швидкості й напрямку вітрового потоку. При цьому зазначене перетворення має здійснюватися за мінімальної кількості проміжних енергетичних перетворень і з максимально можливим коефіцієнтом корисної дії.

2. Серед різних типів генераторів, які можуть застосовуватися у вітроенергетичних установках, найбільш раціональним є використання асинхронізованого синхронного генератора, або машини подвійного живлення. Його основною перевагою є здатність безпосередньо генерувати електроенергію зі стандартними параметрами без введення додаткових ступенів перетворення за зміни частоти обертання ротора в широкому діапазоні — від нульової до надсинхронної. Це забезпечує підвищення енергетичної ефективності всієї системи. Крім того, асинхронізований синхронний генератор не споживає реактивну потужність з електричної мережі, а за відповідних режимів роботи може сам виконувати функцію її джерела.

3. Для реалізації безконтактного підведення струму до роторного кола в тихохідних вітроенергетичних установках із вертикальною віссю обертання прийнято технічне рішення, що передбачає розміщення акумуляторної батареї на обертовій частині системи. Такий підхід дає змогу спростити систему керування завдяки виключенню блоку перетворення змінної напруги на постійну, а також реалізувати функцію накопичення електричної енергії, що є особливо важливим для альтернативних джерел енергії, які працюють за умов нестабільного надходження первинного енергетичного ресурсу. Залежно від частоти обертання ротора акумуляторна батарея може функціонувати або в режимі розряду, забезпечуючи живлення системи, або в режимі заряду, здійснюючи накопичення електричної енергії.

Глава 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО РОЗРАХУНКУ АСИНХРОНІЗОВАНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Вступні зауваження

Конструктивно асинхронізований синхронний генератор є електричною машиною, близькою за будовою до асинхронної машини з фазним ротором. Питання проєктування електричних машин цього класу достатньо повно висвітлені у вітчизняній та зарубіжній науково-технічній літературі [3]. Однак у більшості таких джерел основну увагу приділено асинхронним двигунам малої та середньої потужності. Водночас завдання проєктування асинхронізованих синхронних генераторів великої потужності, призначених для роботи у складі вітроенергетичних установок у різних експлуатаційних режимах, розкрито значно менш повно і в наукових публікаціях представлено обмежено.

Під час проєктування асинхронізованих синхронних генераторів великої потужності необхідно враховувати низку чинників, зумовлених як специфікою функціонування вітроенергетичних установок, так і конструктивними особливостями потужних електричних машин.

По-перше, вітроенергетична установка працює за змінної частоти обертання ротора. Отже, генератор має розраховуватися не на одне фіксоване значення швидкості, а на певний робочий діапазон частот обертання ротора.

По-друге, у більшості сучасних вітроенергетичних установок застосовується редукторне компонування. Використання редуктора або мультиплікатора дає змогу зменшити габаритні розміри електричної машини, однак одночасно зумовлює підвищення робочої частоти обертання генератора. З цієї причини в сучасних вітроенергетичних установках зазвичай застосовують генератори із синхронними частотами обертання 1000, 1500 та 3000 об/хв.

По-третє, електричні машини великої потужності мають масивний ротор значних розмірів, що спричиняє виникнення проблем, пов'язаних із наявністю критичних частот обертання. Тривала робота генератора поблизу критичної

швидкості може призвести до підвищеного рівня вібрації, прискореного зношування та подальшого виходу з ладу підшипникових вузлів і мультиплікатора.

Сукупність зазначених чинників свідчить про необхідність урахування умов механічної стійкості ротора вже на стадії електромагнітного розрахунку генератора.

Розроблення електричних машин великої потужності потребує значних капітальних вкладень. Тому в умовах ринкової економіки лише обмежена кількість підприємств може здійснювати розроблення за традиційною схемою, яка передбачає створення та дослідження макетного зразка, виготовлення дослідного екземпляра й подальшу підготовку виробу до серійного виробництва. Розвиток обчислювальної техніки дає змогу суттєво знизити значну частину технічних і економічних ризиків ще на етапі розрахунку електричної машини та сформувати її цифрову модель для попередньої перевірки працездатності виробу. Для цього необхідно створити проєктну систему, що поєднує підсистему синтезу оптимальної геометрії та підсистему аналізу сформованої електронної моделі.

Підсистема синтезу формується на основі математичної моделі, до якої підключається метод нелінійного програмування, призначений для перебору можливих варіантів конструкції та вибору оптимального рішення за заданим критерієм.

Підсистема аналізу, у свою чергу, може бути реалізована із застосуванням апробованих програмних засобів, зокрема Ansys Electronics Desktop, MATLAB Simulink та інших аналогічних інструментів інженерного моделювання.

Поділ проєктної системи на дві підсистеми зумовлений тим, що підсистема синтезу проєктних рішень має забезпечувати виконання оптимізаційних розрахунків, які потребують значної кількості ітерацій. На кожній ітерації здійснюється новий розрахунок за повним алгоритмом математичної моделі. Залежно від обраного методу оптимізації кількість таких циклів може досягати десятків і навіть сотень тисяч. Це потребує значних обчислювальних ресурсів і

суттєвих витрат часу. Тому математична модель, що використовується в підсистемі синтезу, має бути достатньо спрощеною, що, однак, може знижувати точність отриманих результатів [5, 6]. З урахуванням цього до складу проєктної системи доцільно включати підсистему аналізу, яка дає змогу на основі більш точних методів дослідити електромагнітний і тепловий стан варіанта конструкції, отриманого підсистемою синтезу, та за необхідності внести відповідні корективи.

Нижче наведено послідовні етапи розроблення проєктної системи, зокрема побудови математичної моделі синтезу оптимальної геометрії асинхронізованого синхронного генератора.

2.1. Розробка математичної моделі розрахунку максимальних габаритів ротора при забезпеченні відсутності критичних частот у робочому діапазоні швидкостей обертання

Як зазначалося раніше, електричні машини великої потужності характеризуються наявністю масивних роторів значних габаритних розмірів. Під час проєктування генератора великої потужності, який працює не за однієї фіксованої номінальної швидкості, а в широкому діапазоні частот обертання, забезпечення відсутності критичних швидкостей у робочому діапазоні набуває особливо важливого значення. У низці випадків ця вимога може бути не менш суттєвою, ніж забезпечення необхідних електромагнітних показників машини.

У зв'язку з цим у межах цієї роботи магнітна система генератора має проєктуватися з урахуванням необхідних параметрів механічної стійкості ротора. Зазначену обставину доцільно враховувати вже на етапі розроблення методики електромагнітного розрахунку асинхронізованого синхронного генератора.

Аналіз літературних джерел з розглянутого питання показав, що існують аналітичні методики розрахунку критичних частот ротора [6]. Однак такі методики мають переважно перевірочний характер і призначені, як правило, для

вже сформованих конструктивних рішень. Вони можуть бути використані для оцінювання механічної стійкості ротора асинхронізованого синхронного генератора, проте такий аналіз можливий здебільшого лише на завершальному етапі проєктування. Якщо в результаті перевірки буде встановлено, що критична частота потрапляє в робочий діапазон швидкостей обертання, електромагнітний розрахунок необхідно виконувати повторно з внесенням відповідних конструктивних змін.

Отже, під час оптимізаційних розрахунків геометрії електричної машини відсутність критичних частот у робочому діапазоні доцільно розглядати як одну з умов оптимальності конструкції. Водночас через значну складність відповідної методики її безпосереднє включення до математичної моделі електромагнітного розрахунку призведе до суттєвого ускладнення моделі та, як наслідок, до збільшення тривалості обчислень.

З огляду на це пропонується інший порядок проєктування. На першому етапі визначаються зовнішній діаметр і максимально допустима довжина активної частини ротора, після чого отримані результати використовуються як вихідні обмеження в математичній моделі електромагнітного розрахунку.

Методика, що розробляється, та відповідна математична модель ґрунтуються на спрощеному поданні ротора асинхронізованого синхронного генератора. На початковому етапі ротор розглядається як циліндричне тіло, що складається з трьох характерних ділянок. Приклад такого розрахункового ескізу ротора наведено на рисунку. 2.1.

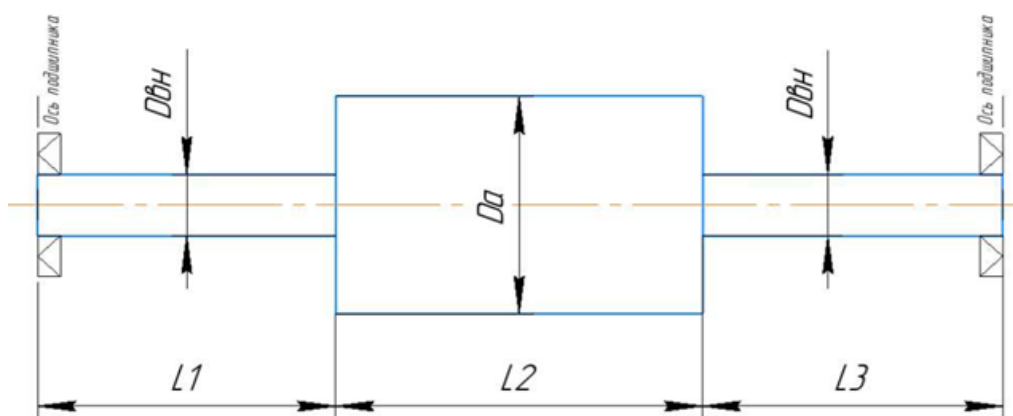


Рис. 2.1 Ескіз АСГ

Припустимо, що на початковому етапі розрахунку з технічного завдання на генератор відомі його номінальна потужність, синхронна частота обертання ротора та максимально допустима частота обертання. Крім того, з урахуванням усталеної практики проектування електричних машин попередньо можуть бути прийняті відстані від торцевих поверхонь осердя ротора з обмоткою до осей підшипникових опор, тобто розміри L_1 та L_3 , наведені на рис. 2.1.

Довжина осердя ротора з обмоткою, що відповідає розміру L_2 на рис. 2.1, у попередньому розрахунку розглядається як змінний параметр і задається в межах визначеного допустимого діапазону.

Після цього послідовно виконується розрахунок параметрів, наведених нижче. Зокрема, внутрішній діаметр сердечника ротора визначається в метрах виходячи з умови міцності валу при передачі моменту, що крутить:

$$D_{BH} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot \frac{\varepsilon P}{2\pi} \cdot \frac{n}{60}}{\pi \cdot [\tau]}}, \quad (2.1)$$

де P – номінальна потужність генератора (Вт); n – синхронна швидкість обертання генератора (про/хв); ε – коефіцієнт, що враховує необхідний запас міцності та перевантаження генератора; τ – допустима напружка матеріалу під час кручення (Па).

Зовнішній діаметр ротора (м) виходячи з умови міцності при дії відцентрових сил:

$$D_a = \sqrt{\frac{[\sigma] - 304.5 \cdot D_{BH}^2 \cdot \left(\frac{n_{max} \cdot 2\pi}{60}\right)^2}{1606 \cdot \left(\frac{2\pi \cdot n_{max}}{60}\right)^2}}, \quad (2.2)$$

Через розрахунок виходить залежність значення першої критичної частоти ротора з його активної частини. Приклад залежності для ротора, що має розміри $L_1 = L_3 = 0,5$ м, $D_a = 0,808$ м, $D_{BH} = 0,2$ м, представлений рисунку 2.2

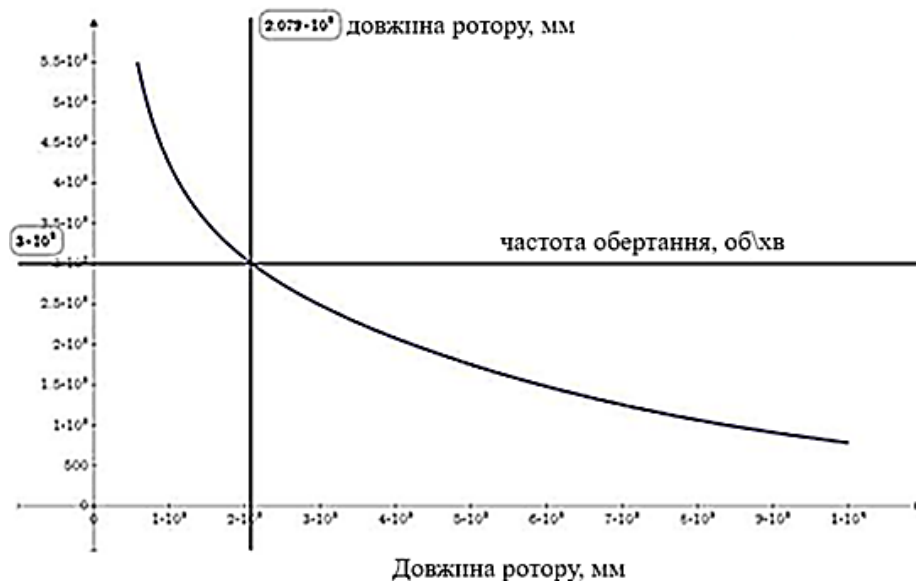


Рис. 2.2. Залежність значень першої критичної частоти обертання ротора від довжини його активної частини

З наведеної залежності випливає, що зі збільшенням довжини активної частини ротора значення першої критичної частоти його обертання інтенсивно знижується. Отже, за наявності у технічному завданні даних щодо максимально допустимої частоти обертання ротора можна визначити гранично допустиму довжину його активної частини. Надалі це значення доцільно використовувати як конструктивне обмеження під час виконання оптимізаційного електромагнітного розрахунку генератора.

Запропонована математична модель забезпечує можливість узгодження параметрів механічної стійкості ротора з електромагнітними параметрами електричної машини. Її відмінність від наявних методик полягає в тому, що вона орієнтована не лише на перевірочний аналіз уже прийнятих проєктних рішень, а й на їх синтез на початкових етапах проєктування.

2.2. Розробка математичної моделі електромагнітного розрахунку асинхронізованого синхронного генератора

Математична модель електромагнітного розрахунку являє собою систему

аналітичних залежностей, які дають змогу однозначно визначити геометричні розміри електричної машини, її основні параметри та електромагнітні характеристики. Як зазначалося у вступних положеннях до цього розділу, математична модель, що використовується в системі синтезу, має бути придатною для виконання оптимізаційних розрахунків, які передбачають значну кількість ітерацій. У зв'язку з цим для забезпечення прийнятної тривалості оптимізаційного процесу така модель повинна бути достатньо спрощеною, але водночас зберігати необхідний рівень точності отримуваних результатів.

У загальному випадку математична модель містить вхідні та вихідні параметри. Вхідні параметри задаються як початкові величини для розрахункових рівнянь, тоді як вихідні параметри формуються в результаті виконання обчислень [4].

Вхідні параметри доцільно поділяти на три незалежні групи.

Константи — це задані величини, які залишаються незмінними в межах розглянутої проєктної ситуації. Зазвичай до них належать вихідні дані технічного завдання на проєктування, зокрема номінальна потужність, номінальна напруга, номінальна частота обертання, а також фізичні сталі та довідкові параметри матеріалів.

Обмеження — це параметри, вихід за допустимі межі яких є неприпустимим. Такі обмеження можуть мати технологічну природу, наприклад максимальний коефіцієнт заповнення паза або мінімально допустиму ширину зубця, а також фізичну природу, зокрема граничну густину струму в обмотці або максимально допустиме значення магнітної індукції на певній ділянці магнітопроводу.

Незалежні змінні — це параметри, які можуть змінюватися незалежно один від одного в установлених допустимих межах. Під час оптимізації геометрії електричної машини як такі змінні, як правило, розглядають геометричні розміри елементів магнітної системи та конструктивних частин машини.

Вихідними параметрами математичної моделі є показники, отримані в результаті розрахунку, які характеризують якість спроектованої електричної

машини. Зазвичай до них належать масогабаритні, енергетичні та електромагнітні характеристики. Їх конкретний склад визначається специфікою розглянутого проєктного завдання, вимогами технічного завдання та прийнятим критерієм оптимальності.

Загальну структуру математичної моделі, призначеної для виконання оптимізаційних розрахунків, представлено на рисунку 2.3.



Рис. 2.3. Загальна структура математичної моделі для оптимізаційних розрахунків

Далі представлений докладний підбір констант, обмежень, незалежних змінних та вихідних параметрів для математичної моделі електромагнітного розрахунку АСГ.

2.2.1. Вхідні параметри математичної моделі

Як вхідні параметри приймаються такі величини:

Константи

Дані технічного завдання:

- номінальна вихідна потужність P_n (Вт);
- синхронна частота обертання n (об/хв);
- частота обертання n_{max} (об/хв);
- номінальна фазна напруга U_n (В);
- число фаз m ;

- частота напруги f (Гц);
 - схема з'єднання статора та ротора обмоток (трикутник або зірка);
 - необхідний ККД η ;
 - необхідний коефіцієнт потужності $\cos\phi$;
 - повітряний зазор δ (м);
 - число пазів на полюс і фазу обмотки статора q_{stator} ;
 - число пазів на полюс і фазу обмотки ротора q_{rotor} ;
 - обмотковий коефіцієнт статора k_{ob} ;
 - кількість паралельних гілок обмотки ротора a_r ;
 - кількість ефективних провідників обмотки ротора u_r ;
 - механічні втрати P_{mib} (Вт);
 - розміри ізоляції (товщина ізоляції елементарного провідника, товщина виткової ізоляції, товщина корпусної ізоляції);
 - робоча температура обмотки t_{rab} ($^{\circ}\text{C}$);
 - частин ротора до осі підшипників $L1$ і $L3$ (м);
 - індукція у повітряному зазорі B_s (Тл);
 - товщина крайнього натискного кільця сердечника l_{krs} (м);
 - ширина радіального вентиляційного каналу bk (м);
 - товщина субпакету магнітопроводу l_{pak} (м);
- Фізичні постійні:
- коефіцієнт форми поля δo_e ;
 - коефіцієнт заповнення пакета сталлю δo_c ;
 - коефіцієнт полюсної дуги a ;
 - питомий опір міді P_{supri} Г;
 - характеристика електротехнічної сталі (крива намагнічування, питомі втрати, допустима механічна напруга).

Обмеження

Технологічні обмеження:

- коефіцієнт заповнення паза статора $k_{z\ stator}$;

- коефіцієнт заповнення паза ротора kz_{rotor} ;

Фізичні обмеження:

- максимальна щільність струму в обмотці статора J_{stator} (А/мм²);
 - максимальна щільність струму в обмотці ротора J_{rotor} (А/мм²);
 - максимальна індукція у зубці статора $B_{z\ stator}$ (Тл);
 - максимальна індукція у зубці ротора $B_{z\ rotor}$ (Тл);
 - максимальна індукція у спинці статора $B_{j\ stator}$ (Тл);
 - максимальна індукція у спинці ротора $B_{j\ rotor}$ (Тл);
 - максимальний струм паралельної гілки обмотки статора $I_{max\ par}$ (А);
- Залежно від матеріалів і технологічних можливостей обмеження можуть змінюватися.

Незалежні змінні

Визначення сукупності незалежних змінних є одним із ключових етапів формування математичної моделі. Саме ці параметри разом із вихідними незмінними даними мають однозначно задавати конкретний варіант проєктованої конструкції [5]. Від обґрунтованості вибору незалежних змінних безпосередньо залежать стійкість функціонування моделі, точність отримуваних розрахункових результатів та ефективність оптимізаційної процедури. Тому під час побудови математичної моделі, орієнтованої на оптимізаційний пошук, до таких змінних мають висуватися спеціальні вимоги [6].

Насамперед незалежні змінні повинні мати чітку фізичну інтерпретацію та бути зручними для подальшого інженерного аналізу. Крім того, вибрані параметри мають забезпечувати високу обчислювальну ефективність, тобто сприяти швидкому наближенню до найкращого рішення без надмірного збільшення кількості ітерацій. Важливим є також те, щоб область оптимуму розташовувалася всередині допустимого діапазону, а не на його межі, оскільки в протилежному випадку використання градієнтних методів оптимізації стає менш результативним. Нарешті, кожна незалежна змінна повинна мати заздалегідь визначений та однозначно заданий інтервал зміни, оскільки оптимізаційний алгоритм може коректно працювати лише в межах скінченної області пошуку.

На перший погляд природним рішенням є використання як незалежних змінних лінійних розмірів, що визначають геометрію магнітної системи асинхронізованого синхронного генератора. До таких параметрів можна віднести розміри пазів статора та ротора, внутрішні й зовнішні діаметри, розміри ярма, ширину зубців та інші аналогічні величини. Проте такий підхід не можна вважати оптимальним. Це зумовлено тим, що абсолютні геометричні розміри самі по собі не мають природно заданих меж зміни. Навіть за штучного введення таких меж не усувається ризик того, що шукане оптимальне рішення виявиться розташованим поблизу межі області пошуку, що погіршує якість оптимізаційного процесу.

Крім того, аналіз закономірностей, характерних для електричних машин, показує, що їх енергетична ефективність і питомі показники визначаються не стільки окремими лінійними розмірами, скільки взаємним співвідношенням активних елементів конструкції. Іншими словами, вирішальне значення мають не лише абсолютні значення висоти паза, товщини ярма чи ширини зубця, а передусім пропорції між площами тих зон, які безпосередньо беруть участь у процесі електромеханічного перетворення енергії. Найбільш показовими в цьому аспекті є відношення площі поперечного перерізу якірної зони до загальної площі поперечного перерізу машини, частка пазово-зубцевої області в перерізі якоря та інші аналогічні безрозмірні параметри.

Саме тому як незалежні змінні доцільно використовувати не абсолютні геометричні розміри, а відносні характеристики, що описують структуру активної зони електричної машини. Такий вибір має низку переваг. По-перше, зазначені параметри природно обмежені скінченним інтервалом значень, як правило від 0 до 1. По-друге, вони безпосередньо відображають співвідношення між зонами, які визначають електромагнітні та енергетичні властивості машини. По-третє, їх раціональні значення зазвичай зберігаються у порівняно вузькому діапазоні навіть за істотної зміни загальних габаритних розмірів конструкції.

З огляду на це в межах цієї роботи як основу для побудови математичної моделі прийнято рішення відмовитися від використання абсолютних

геометричних розмірів магнітопроводу як незалежних змінних і замінити їх відносними параметрами, що характеризують співвідношення площ активних зон. Сама ідея застосування таких відносних параметрів як незалежних змінних не є новою. Вона була використана під час синтезу тягових електродвигунів рухомого складу [5], а згодом — під час розроблення методики проєктування вентильних моментних двигунів постійного струму [6]. Проте для асинхронізованого синхронного генератора цей підхід раніше не застосовувався. Надалі такі параметри доцільно позначити терміном «узагальнені змінні», що відображає їхню фізичну сутність, і визначити їх для асинхронізованого синхронного генератора..

Для АСГ зручно виділити шість узагальнених змінних [4].

1. Змінна f_s - показує, яку частину від площі поперечного перерізу електричної машини займають активні частини електричної машини (рисунок 2.4).

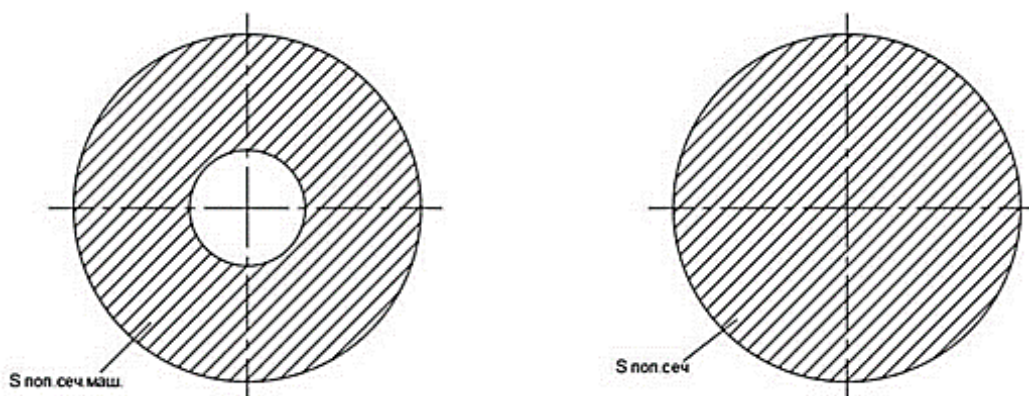
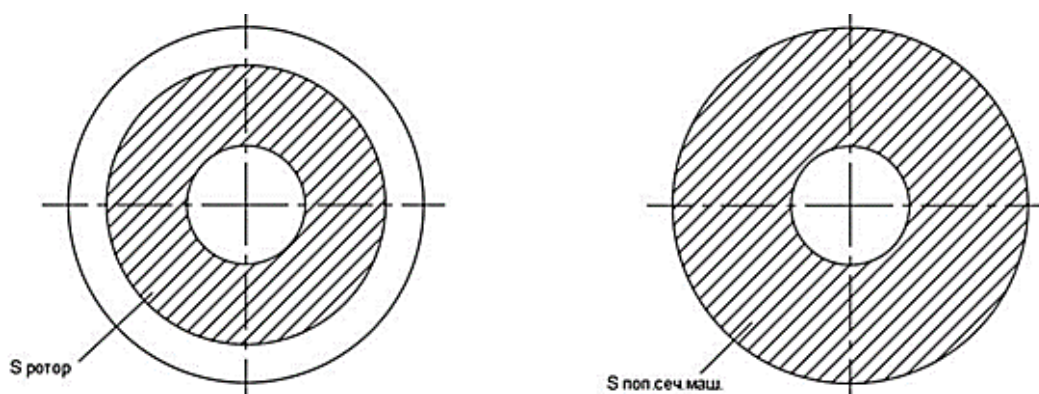


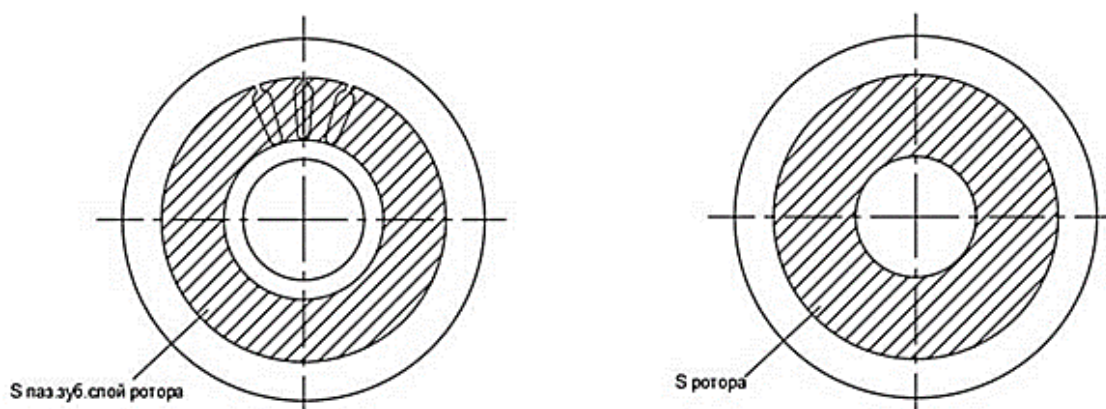
Рис. 2.4. Змінна f_s

1.
2. Змінна f_a - відображає відношення площі поверхні, яку займає ротор, до площі поверхні, яку займають активні частини машини (рисунок 2.5).

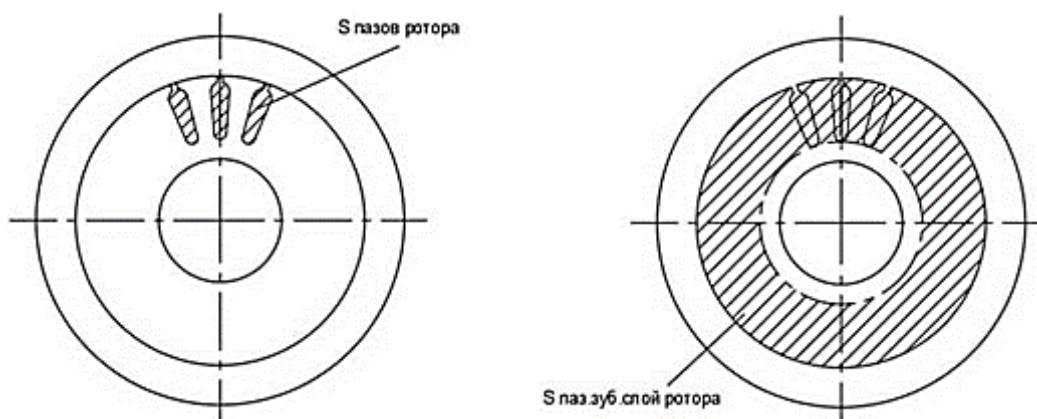
$$f_a = \frac{S_{\text{ротора}}}{S_{\text{поп.сеч.маш.}}}, \quad (2.15)$$

Рис. 2.5. Змінна f_a

3.Змінна f_{er} - Показує відношення площі поверхні пазово зубцевого шару ротора до площі поверхні, яку займає сам ротор (рисунок 2. 6).

Рис. 2.6. Змінна f_{er}

4.Змінна f_{zr} - Відбиває відношення площі поверхні, що займає пазами ротора, до площі поверхні, яку займає пазово-зубцевий шар ротора (рисунок 2.7).

Рис. 2.7. Змінна f_{zr}

5.Змінна f_{es} - Показує відношення площі поверхні пазово зубцевого шару статора до площі поверхні, яку займає сам статор (рисунок 2. 8).

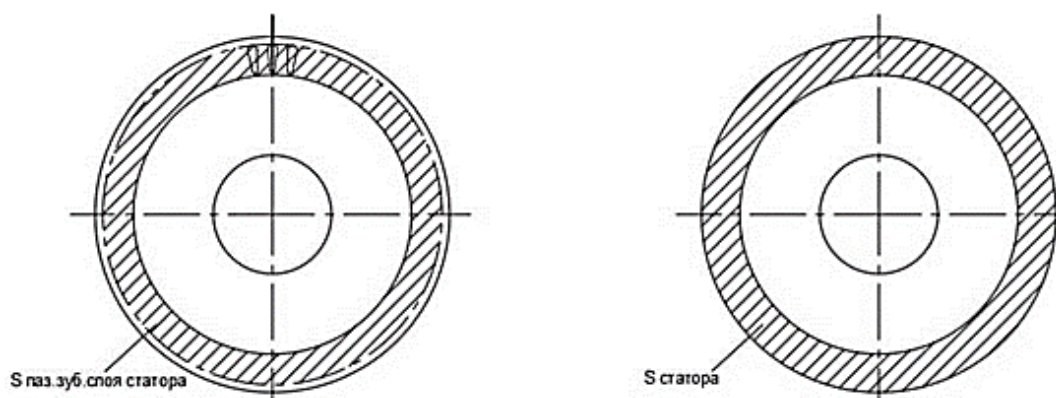


Рис. 2.8. Змінна f_{es}

6.Змінна f_{zs} - Відображає відношення площі поверхні, що займає пазами статора, до площі поверхні, яку займає пазово-зубцевий шар статора (рисунок 2.9).

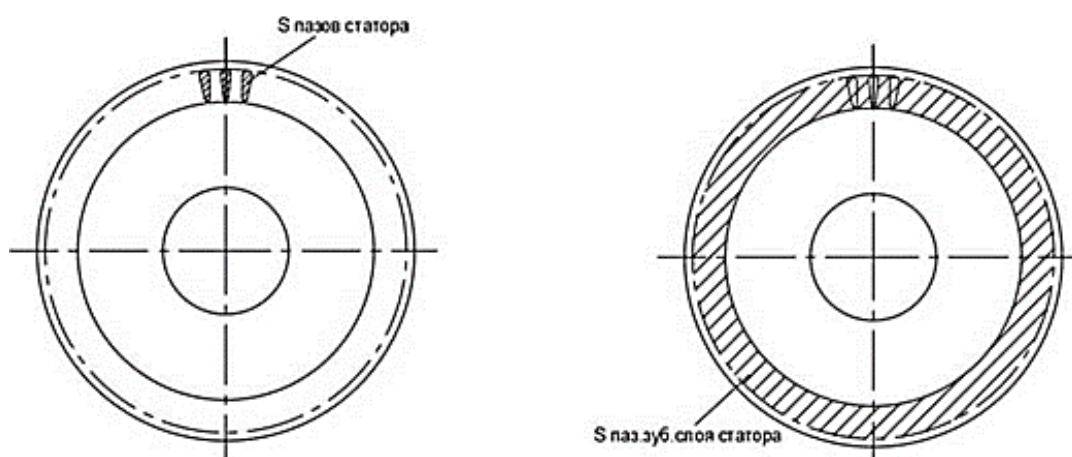


Рис. 2.9. Змінна f_{zs}

З наведених на рисунках залежностей випливає, що узагальнені змінні повною мірою відповідають вимогам, які висуваються до незалежних параметрів у задачах оптимізаційного проектування. Їх використання є обґрунтованим як з методичної, так і з обчислювальної точки зору. Кожна з таких змінних має чітку фізичну інтерпретацію та безпосередньо відображає співвідношення між взаємопов'язаними активними зонами електричної машини. Завдяки цьому узагальнені змінні є не лише зручними для математичного опису конструкції, а

й зберігають інженерну наочність, що має особливе значення під час аналізу результатів оптимізації.

Суттєвою перевагою обраного підходу є те, що формування кожної наступної узагальненої змінної ґрунтується на використанні площ конструктивно та функціонально пов'язаних ділянок магнітної системи. Унаслідок цього область зміни кожної змінної природно обмежується інтервалом від 0 до 1. Таке задання діапазону не потребує штучного введення довільних меж і забезпечує коректну постановку оптимізаційної задачі. Крім того, фізична природа цих параметрів зменшує ймовірність ситуації, за якої раціональне або оптимальне рішення розташовується безпосередньо на межі області допустимих значень. Це, у свою чергу, підвищує стійкість та ефективність застосування чисельних методів оптимізації.

Окрім зазначених узагальнених параметрів, як окрема незалежна змінна приймається довжина магнітопроводу електричної машини. Межі допустимої зміни цієї величини визначаються на основі механічного розрахунку, виконаного за методикою, викладеною в підрозділі 2.1 Глави 2. Тим самим забезпечується узгодження двох взаємопов'язаних задач проектування: з одного боку, задачі виключення критичних частот обертання ротора з робочого діапазону, а з іншого — задачі оптимізаційного електромагнітного розрахунку. Іншими словами, механічні обмеження від початку інтегруються в структуру електромагнітної моделі, що дає змогу розглядати проєктовану машину як єдину електромеханічну систему.

2.2.2. Вихідні параметри математичної моделі

Оскільки розглядається задача оптимізації, вихідні параметри математичної моделі мають одночасно виконувати функцію показників якості електричної машини, що проєктується. Надалі передбачається використання однокритеріального підходу, за якого оптимізаційний пошук здійснюється за одним обраним критерієм. Водночас сам критерій не є універсальним і

визначається конкретними умовами проєктування. З цієї причини проєктна система повинна мати достатню гнучкість, що дає змогу змінювати цільову функцію залежно від поставленого інженерного завдання. Отже, до складу математичної моделі доцільно включати максимально широкий набір вихідних показників, кожен із яких потенційно може бути використаний як критерій оптимальності.

Вибір конкретного критерію має визначатися пріоритетними технічними вимогами, що висуваються до об'єкта проєктування. Для вітроенергетичних установок великої потужності першочергове значення мають енергетична ефективність та економічна доцільність. У практичному аспекті це означає необхідність забезпечення високого коефіцієнта корисної дії за одночасного зниження собівартості електричної машини.

Коефіцієнт корисної дії є інтегральною характеристикою генератора і найбільшою мірою наближається до економічного критерію, оскільки відображає енергетичну ефективність машини загалом. Однак безпосереднє використання ККД як критерію оптимізації пов'язане з певними труднощами, оскільки ця величина істотно залежить від габаритних розмірів активних частин електричної машини. Саме тому в практиці оптимізаційного проєктування електричних машин коефіцієнт корисної дії зазвичай розглядають не як цільову функцію, а як обмежувальну умову, за межами якої проєктні варіанти вважаються неприйнятними.

З урахуванням викладеного до математичної моделі, що розробляється, було включено такі показники якості, які одночасно виступають її вихідними параметрами:

- маса активних частин, тобто сумарна маса сталі статора, сталі ротора, статорної та роторної обмоток, кг, — для розв'язання задач, пов'язаних із масогабаритною оптимізацією;
- генерована потужність, Вт, — для розв'язання задачі оптимізації в межах заданих габаритних обмежень.

Глава 3. РОЗРОБКА ПІДСИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ АСИНХРОНІЗОВАНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Вступні зауваження

Оптимізація в інженерному проєктуванні являє собою процедуру обґрунтованого вибору найкращого варіанта з множини допустимих проєктних рішень за одним або кількома показниками якості [6]. У загальному випадку задача проєктування електричної машини має багатокритеріальний характер, оскільки розроблювана конструкція повинна одночасно задовольняти низку технічних, енергетичних, економічних і конструктивних вимог. Іншими словами, необхідно визначити таке проєктне рішення, яке було б найкращим не за одним окремим показником, а за сукупністю взаємопов'язаних критеріїв.

Однак в електромеханіці постановка та розв'язання багатокритеріальної оптимізаційної задачі пов'язані зі значними труднощами. Це зумовлено тим, що основні показники якості електричної машини, як правило, перебувають у суперечливому взаємозв'язку. Поліпшення одного параметра нерідко супроводжується погіршенням іншого. Зокрема, підвищення коефіцієнта корисної дії зазвичай призводить до збільшення маси та габаритних розмірів машини, тоді як зниження вартості конструкції часто супроводжується погіршенням її енергетичних характеристик. Отже, задача вибору оптимального рішення набуває компромісного характеру.

На сучасному етапі існує низка методів багатокритеріальної оптимізації, зокрема метод вагових коефіцієнтів, лексикографічний підхід, оптимізація за Парето, метод варіювання обмежень, а також генетичні алгоритми. Проте застосування зазначених методів значною мірою пов'язане із суб'єктивними рішеннями розробника, а їх практична ефективність суттєво залежить від його досвіду та наявності апробованої бази проєктних даних. Як правило, багатокритеріальна оптимізація є найбільш результативною для тих виробів, щодо яких накопичено значний статистичний матеріал, який містить відомості

про параметри, конструктивні рішення та результати експлуатації.

Аналіз вітчизняної та світової практики проектування електричних машин показує, що наразі не сформовано універсального й достатньо надійного підходу до розв'язання багатокритеріальних задач, придатного для широкого практичного застосування. З цієї причини в цій роботі, присвяченій розробленню інноваційного виробу, для якого ще відсутня статистична база оптимальних рішень, розглядається задача однокритеріальної оптимізації геометрії асинхронізованого синхронного генератора. Такий підхід є більш формалізованим і дає змогу побудувати стійкішу та практично реалізовану процедуру розрахунку.

Водночас у проектну систему від початку закладається можливість вибору різних критеріїв оптимальності. Це необхідно для розширення множини допустимих проектних рішень і забезпечення адаптації системи до різних інженерних ситуацій. Отже, під час розроблення підсистеми синтезу необхідно сформулювати задачу однокритеріальної оптимізації, вибрати відповідний метод оптимізації та визначити рівні оптимізації, які забезпечують необхідну гнучкість проектної системи.

3.1. Постановка задачі однокритеріальної оптимізації асинхронізованого синхронного генератора

Постановку завдання однокритеріальної оптимізації АСГ у класичному вигляді можна сформулювати наступним чином: для заданих констант (конкретного виконання, матеріалів, вихідних даних ТЗ) при заданих обмеженнях необхідно, роблячи перебір незалежних змінних за певним алгоритмом, знайти геометрію, яка б забезпечувала екстремальне значення обраного критерію [1].

Визначення та вибір констант, обмежень та критеріїв оптимальності були детально розібрані в Розділі 2. Ця постановка задачі оптимального проектування лягла в основу побудови системи оптимізації.

3.2. Вибір методу оптимізації

З урахуванням нелінійного взаємозв'язку між габаритними параметрами електричної машини, величинами електромагнітних навантажень і потужністю, що розвивається, задача оптимального проектування зводиться до визначення екстремального значення нелінійної цільової функції. Дослідження та розв'язання задач такого типу належать до сфери нелінійного програмування — спеціального розділу прикладної математики [3].

На сучасному етапі розроблено широкий спектр методів оптимізації, які в найбільш загальному вигляді можна поділити на три основні групи:

- детерміновані;
- стохастичні;
- комбіновані.

Кожен із зазначених класів охоплює значну кількість окремих методів, кількість яких обчислюється десятками. Це свідчить про відсутність універсального підходу, який був би однаково ефективним для всіх задач пошуку оптимального рішення. Отже, для кожної конкретної математичної моделі метод оптимізації має обиратися з урахуванням її структури, особливостей розрахункових залежностей і характеру цільової функції.

Задача оптимального проектування, як правило, розв'язується за умов відсутності достовірної інформації про кількість і розташування локальних екстремумів. Тому в загальному випадку пошук має бути орієнтований на виявлення глобального оптимуму. Водночас аналіз цільових функцій, характерних для різних типів електричних машин, показує, що під час розв'язання задачі оптимізації маси в окремих випадках допустимо обмежитися пошуком локального екстремуму. Такий підхід дає змогу відмовитися від застосування стохастичних і комбінованих методів перебору незалежних змінних та зосередитися на використанні детермінованих методів оптимізації.

3.3. Визначення рівнів оптимізації

Залежно від конкретної інженерної задачі напрям проєктного пошуку може істотно відрізнятися. З цієї причини проєктна система має бути побудована таким чином, щоб забезпечувати адаптацію до різних варіантів технічного завдання та давати змогу реалізовувати різні сценарії проєктування відповідно до вимог замовника. Одним із найбільш раціональних способів забезпечення такої адаптивності є організація багаторівневої оптимізації.

Ідея поділу оптимізаційного процесу на окремі рівні не є принципово новою для електромашинобудування. Зазначений підхід достатньо докладно розглядався та був глибоко опрацьований стосовно вентильних машин з аксіальним магнітним потоком [2]. Водночас для асинхронізованого синхронного генератора побудова системи оптимізації на основі багаторівневої структури є новим підходом, що потребує спеціальної організації підсистеми синтезу.

За своїм змістом багаторівнева оптимізація спрямована на охоплення максимально широкого кола можливих проєктних ситуацій. Так, під час розроблення генератора для принципово нової системи, у якій заздалегідь задано обмеження за габаритними розмірами, доцільно виконувати повну габаритну оптимізацію. У цьому випадку допускається варіювання всього набору незалежних змінних, а результатом є генератор, який забезпечує необхідну потужність, заданий коефіцієнт корисної дії та мінімально можливу масу в межах установлених обмежень.

Інша постановка задачі виникає у випадку, коли генератор проєктується не для нової установки, а для модернізації вже наявної системи. У такій ситуації може виникнути потреба в розробленні генератора, здатного забезпечити максимально можливу потужність за наперед фіксованих габаритних розмірів. При цьому склад параметрів, що варіюються, може залишатися достатньо широким, однак змінюється сама математична постановка задачі та, відповідно, критерій оптимальності.

Поряд із цим можливі й проєктні ситуації, що відповідають нижчим рівням оптимізації. До них можна віднести, наприклад, розрахунок електричної машини під наявний штамп або розроблення нового ротора для заміни в раніше створеній машині. У таких випадках змінюються не лише умови проєктування, а й структура математичної моделі, а також склад і характер незалежних змінних.

Оскільки кількість потенційно можливих проєктних ситуацій є значною, заздалегідь врахувати їх усі в межах єдиної проєктної системи досить складно. У зв'язку з цим у цій роботі виокремлено п'ять основних типів проєктних ситуацій, які доцільно розглядати як базові під час розроблення генераторів для нових установок.

3.3.1. Повна габаритна оптимізація

На цьому рівні оптимізації варіюються усі незалежні змінні.

Як незалежні змінні приймаються:

- узагальнені змінні - f_{es} , f_{zs} , f_{er} , f_{zr}
- активна довжина магнітопроводу - l_s (м).

Як критерій оптимальності встановлюється мінімальна маса активних матеріалів за умови забезпечення необхідного ККД та відсутності порушення фізичних та технологічних обмежень.

3.3.2. Оптимізація при фіксованому зовнішньому, внутрішньому діаметрах та зовнішній довжині (у заданих габаритах)

Оптимізація в заданих габаритах — це проєктна ситуація, що найчастіше зустрічається при розробці нової електричної машини для застосування в вже готовій системі електроприводу, наприклад, при заміні старого генератора в існуючій ВЕУ.

На цьому рівні оптимізації так само, як і за повної габаритної оптимізації, варіюються п'ять незалежних змінних.

Проте в даному випадку як незалежні змінні виступають:

- узагальнені змінні - $f_{es}, f_{zs}, f_{er}, f_{zr}$;
- лінійне навантаження – A (А/м).

Також змінюється необхідний критерій оптимальності i , отже, трансформується математична модель розрахунку.

Як констант i обмежень у цьому випадку виступають ті ж параметри, що i при повній габаритній оптимізації, з додаванням зовнішнього діаметра статора та активної довжини магнітопроводу.

Як критерій оптимальності встановлюється максимум генерованої потужності за умови забезпечення необхідного ККД та відсутності порушення фізичних та технологічних обмежень.

3.3.3. Габаритна оптимізація при фіксованому зовнішньому діаметрі

Дана проектна ситуація характерна для розробки нових виробів у випадках, коли зовнішній габарит машини заздалегідь обмежений вимогами, що задаються розробником приводу. У таких умовах ключовим завданням стає забезпечення необхідної потужності за мінімально можливою активною довжиною машини.

У розглянутій постановці як констант i обмежують умов використовуються ті ж параметри, що i при оптимізації у фіксованих габаритах, за винятком довжини магнітопроводу, яка в даному випадку не належить до незмінних величин.

Склад обмежень та незалежних змінних зберігається таким самим, як i в задачі повної габаритної оптимізації.

Оскільки маса активних матеріалів змінюється практично лінійно зі збільшенням довжини магнітопроводу, критерієм оптимальності приймається мінімізація маси активної частини при обов'язковому виконанні вимог по заданому коефіцієнту корисної дії, а також при дотриманні всіх фізичних i технологічних обмежень.

3.3.4 Габаритна оптимізація за відомого штампа

Через високу вартість штампової оснастки конструкторські підрозділи підприємств нерідко стикаються з ситуацією, коли нову електричну машину необхідно розробляти не на основі довільно обраної геометрії, а з урахуванням уже наявного штампа, що входить до виробничої номенклатури підприємства. У цьому випадку задача проєктування істотно звужується, оскільки форма поперечного перерізу магнітопроводу фактично задається заздалегідь.

З огляду на необхідність зниження собівартості виробу в цій проєктній ситуації як цільову функцію, як і раніше, доцільно приймати мінімізацію маси активних матеріалів. При цьому обов'язковими умовами залишаються забезпечення заданого коефіцієнта корисної дії та дотримання всіх фізичних, технологічних і конструктивних обмежень. Саме тому відповідний рівень оптимізації було включено до структури проєктної системи.

У зазначеній постановці до постійних параметрів належать ті самі вихідні дані, що й у разі повної габаритної оптимізації. Однак додатково фіксується повний опис геометрії поперечного перерізу магнітопроводу, який визначається обраним штампом.

Система обмежень при цьому залишається аналогічною до тієї, що використовується в задачі повної габаритної оптимізації.

Отже, оптимізаційна задача в цьому випадку зводиться переважно до вибору активної довжини магнітопроводу. У зв'язку з цим як єдину незалежну змінну доцільно прийняти лінійне навантаження, зміна якого дає змогу визначити раціональне значення активної довжини електричної машини.

3.3.5. Перевірочний розрахунок

Перевірочний розрахунок є такий рівень проєктної процедури, у якому незалежні змінні відсутні. На даному етапі всі розміри, що однозначно задають конструкцію електричної машини, вважаються вже певними. Отже, проєктна система у разі не виконує синтез нових конструктивних варіантів, а

використовується виключно аналізу заздалегідь заданого виконання з метою розрахунку його основних параметрів і характеристик.

Значення цього рівня у тому, що він надає розробнику можливість самостійно змінювати окремі параметри конструкції і цим уточнювати чи коригувати результати, отримані етапах оптимізаційного расчета.

Як зазначалося раніше, процес проектування залежно від конкретної інженерної ситуації може вимагати різних напрямів розрахункового пошуку, що, своєю чергою, визначає необхідність вибору відповідного рівня оптимізації. Загальний алгоритм вибору рівня оптимізації представлений рисунку 3.1.

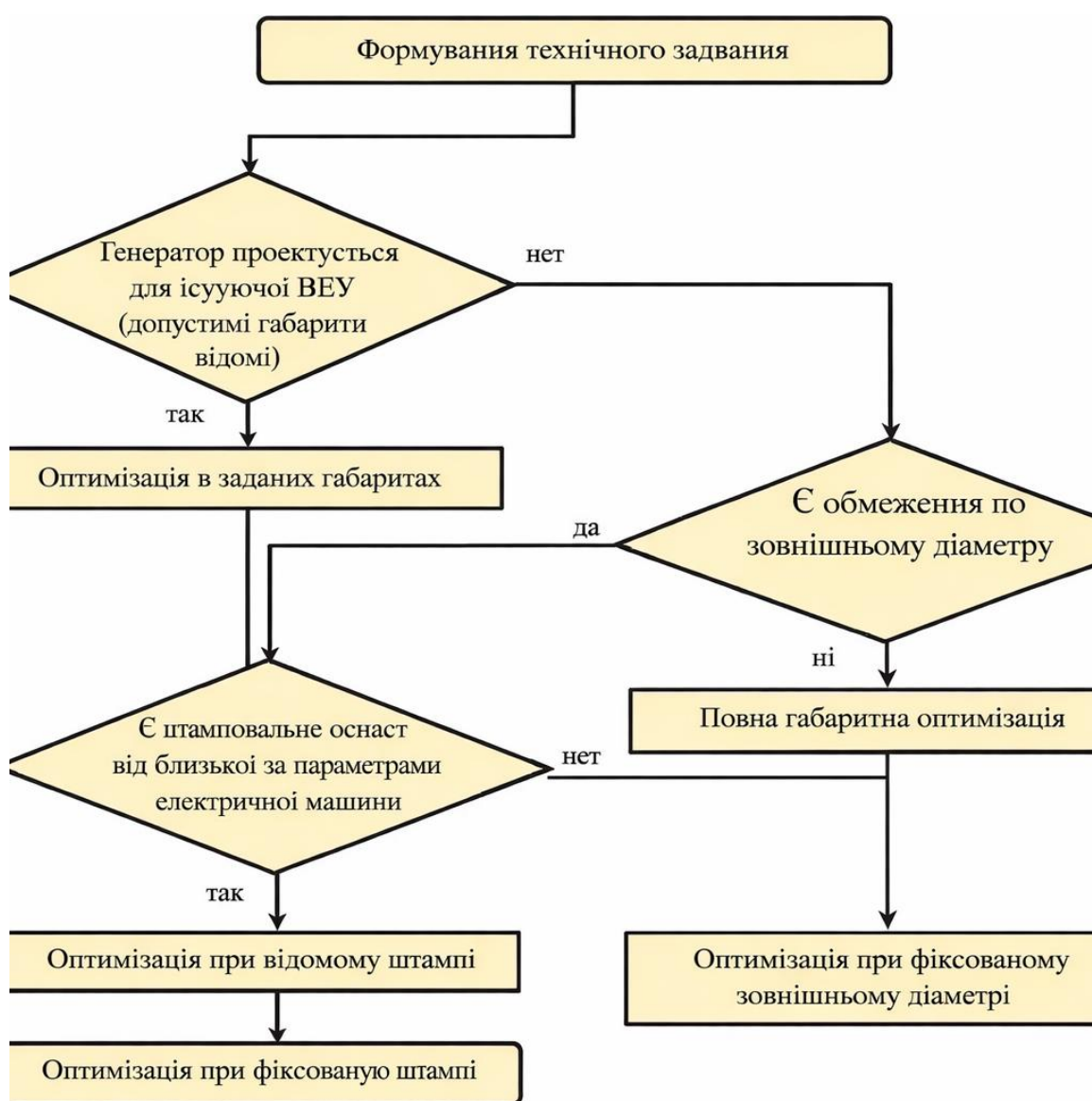


Рис. 3.1. Загальний алгоритм вибору рівня оптимізації АСГ

Зазначений алгоритм покладено в основу підсистеми синтезу та

використано як засіб формалізованої постановки оптимізаційної задачі. Його застосування дає змогу перевести процес вибору проєктних рішень з інтуїтивної площини у строго організовану розрахункову процедуру, у межах якої структура задачі, склад незалежних змінних, система обмежень і критерії якості визначаються в явному вигляді.

На сучасному етапі існує широкий спектр програмних засобів, призначених для детального аналізу електромагнітного та теплового стану електричних машин. Найбільш досконалими й точними серед них є програмні комплекси, що базуються на методі скінченних елементів, зокрема Ansys, FEMM та інші [7]. Поряд із ними застосовуються програмні засоби, які використовують метод схем заміщення, зокрема Matlab Simulink, Vissim та аналогічні пакети [4, 19, 20]. Такі інструменти також забезпечують достатньо високу точність розрахунків і дають змогу досліджувати не лише усталені, а й динамічні режими роботи електричних машин.

Незважаючи на те, що всі перелічені програмні засоби можуть використовуватися автономно, їх ізольоване застосування істотно ускладнює процес підготовки вихідних даних, передавання параметрів між окремими етапами розрахунку та зіставлення отриманих результатів. Унаслідок цього знижується загальна ефективність проєктування. Усунути зазначений недолік можна шляхом інтеграції підсистеми синтезу та підсистеми аналізу в єдине проєктне середовище. Практична реалізація такої інтеграції стає можливою завдяки тому, що більшість сучасних розрахункових комплексів оснащені вбудованими мовами програмування, які дають змогу організувати обмін даними та автоматизувати взаємодію між окремими програмними модулями за допомогою спеціалізованих скриптів.

Таким чином, побудова цілісної проєктної системи потребує послідовного розв'язання кількох взаємопов'язаних завдань. Насамперед необхідно вибрати програмні засоби, найбільш придатні для аналізу електромагнітного та теплового стану проєктованої машини. Далі слід організувати інформаційний та алгоритмічний зв'язок між підсистемою синтезу

і підсистемою аналізу. Після цього мають бути розроблені розрахункові моделі, що забезпечують виконання необхідного аналізу, а також формалізовано порядок роботи у вибраних програмних середовищах.

На основі практики розроблення конкретних проєктів для формування підсистеми аналізу було обрано такі CAE-інструменти: Ansys Electronics Desktop — для розрахунку електромагнітних полів, а також Matlab Simulink — для розв’язання спряженої задачі теплового та вентиляційного аналізу.

3.4. Аналіз електромагнітного стану асинхронізованого синхронного генератора у програмному середовищі Ansys Electronics Desktop

Ansys Electronics Desktop є інтегрованим обчислювальним середовищем, призначеним для електромагнітного аналізу електричних машин різних типів. У рамках цієї системи використовуються кілька розрахункових модулів, що відрізняються за ступенем деталізації моделі та застосовуваного математичного апарату. До основних відносяться:

- Maxwell RMxpert — модуль попереднього чи перевірного розрахунку, що ґрунтується на використанні методу схем заміщення;
- Maxwell 2D Design – модуль двовимірного кінцево-елементного аналізу;
- Maxwell 3D Design - модуль тривимірного кінцево-елементного аналізу.

Істотною перевагою середовища Maxwell RMxpert є наявність вбудованих шаблонів, що дозволяють швидко формувати моделі більшості поширених конструктивних виконань електричних машин. Серед стандартних бібліотечних рішень передбачений і шаблон для розрахунку синхронного генератора, що асинхронізує, — модель Generic Rotating Machines. Використання даного режиму дозволяє на основі схем заміщення визначати основні параметри та характеристики генератора при роботі на мережу необмеженої потужності. Однак цей підхід носить спрощений характер. Він не дозволяє враховувати специфіку живлення електричної машини від несинусоїдальних джерел, а також

не призначений для аналізу перехідних процесів.

Вищий рівень точності забезпечує режим Maxwell 2D Design, у якому дослідження електромагнітного стану виконується методом скінченних елементів у двовимірній постановці. У межах цього режиму можливе моделювання перехідних процесів та врахування особливостей реального живлення електричної машини. Зокрема, передбачена можливість задавання параметрів широтно-імпульсної модуляції перетворювача частоти та визначення додаткових втрат, зумовлених несинусоїдальним характером напруги живлення. Водночас застосування цього режиму передбачає виконання важливої умови: досліджувана електрична машина повинна мати плоску симетрію. Це певною мірою обмежує сферу його використання, однак для аналізу асинхронізованого синхронного генератора зазначений режим забезпечує достатньо високу достовірність отримуваних результатів.

Найбільш повний опис електромагнітних процесів забезпечує модуль Maxwell 3D Design, призначений для тривимірного скінченно-елементного моделювання. Його застосування дає змогу сформувати цифрову модель реального генератора та виконати детальний аналіз електромагнітного стану з урахуванням усіх геометричних особливостей конструкції. Водночас такий рівень деталізації потребує значних обчислювальних ресурсів, унаслідок чого тривалість розрахунку може досягати кількох годин.

Порівняння можливостей модулів Maxwell 2D Design і Maxwell 3D Design показує, що для електричних машин, які мають плоску симетрію, результати двовимірного скінченно-елементного моделювання є достатньо близькими до характеристик реальних пристроїв. Отже, стосовно аналізу асинхронізованого синхронного генератора використання тривимірного моделювання в більшості випадків є надмірним і невиправдано трудомістким. Тому під час формування підсистеми аналізу доцільно орієнтуватися на застосування режиму Maxwell 2D Design [7].

Організація взаємодії між підсистемою синтезу та середовищем Ansys Electronics Desktop може бути реалізована за допомогою вбудованого механізму

Script. Для цього у програмі оптимізації формується спеціальний блок передавання даних до Ansys Electronics Desktop із подальшим викликом відповідних розрахункових процедур. У межах цієї роботи така схема дала змогу об'єднати програму оптимізації, розроблену мовою Delphi, з програмним середовищем Ansys Electronics Desktop у складі єдиної проєктної системи.

Процес проєктування генератора розпочинається з етапу оптимізації геометрії, який реалізується в середовищі Delphi. При цьому залежно від вимог технічного завдання та наявного набору вихідних даних попередньо обирається відповідний рівень оптимізації (рисунк 3.2).

Рис. 3.2. Програми оптимізації геометрії АСГ

Далі результати розрахунку оптимальної геометрії та обмотувальних даних передаються до програми Ansys Electronics Desktop за допомогою попередньо розробленого скрипту.

Подальші дії у програмі Ansys Electronics Desktop провадяться в наступному порядку.

1. У режимі RMxprt здійснюється перевірка розрахованих параметрів. Програма Ansys має відпрацьовану методику аналізу цього машин (Generic Rotating Machines). Результати роботи цьому етапі представлені рисунку 3.3.

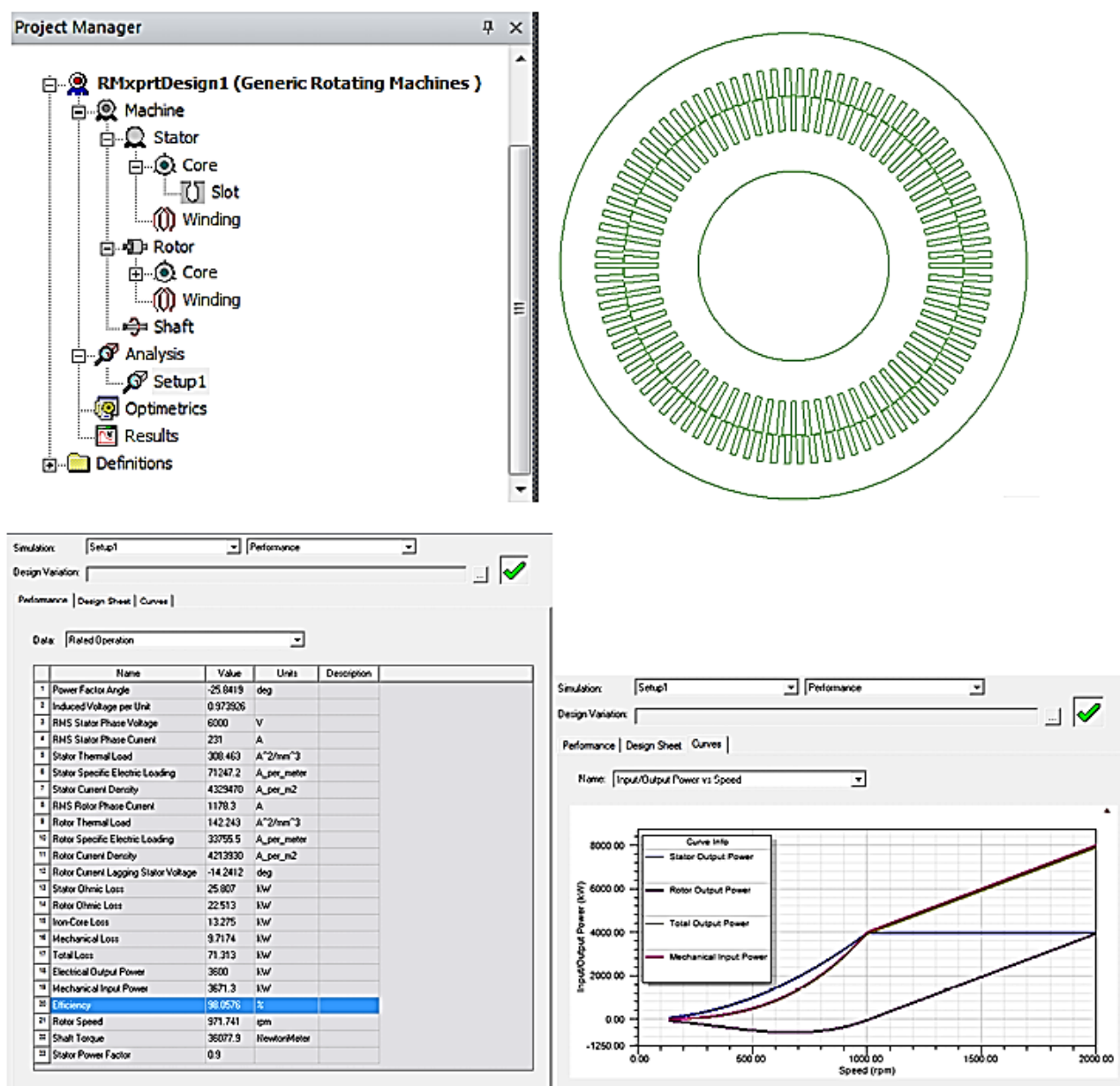


Рис. 3.3. Результати розрахунку АСГ у Maxwell RMxprt

На цьому етапі аналізу перевіряється важлива можливість отримання основних параметрів двигуна. За потреби можна зробити корекцію результатів оптимізації.

2. Далі розрахункова модель експортується в режим Maxwell 2D Design, де спочатку вирішується завдання у модулі Magnetostatic. Це виконується з метою визначення правильності розрахунку величини магнітного потоку та налаштування сітки кінцевих елементів. Для цього в обмотці ротора визначається струм збудження генератора на холостому ходу і визначається

крива розподілу індукції в повітряному зазорі. Картина магнітного поля генератора представлена рисунку 3.4. Крива розподілу індукції у повітряному зазорі - рисунку 3.5.

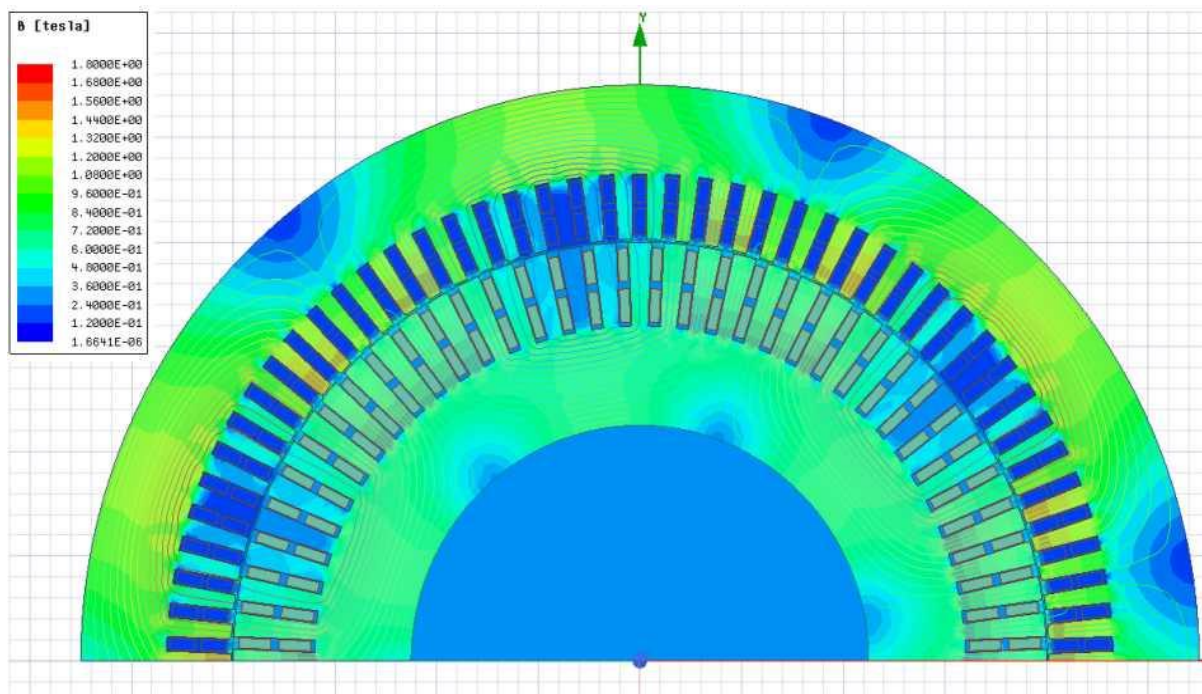


Рис. 3.4. Картина магнітного поля генератора на холостому ходу в Ansys Electronics Desktop

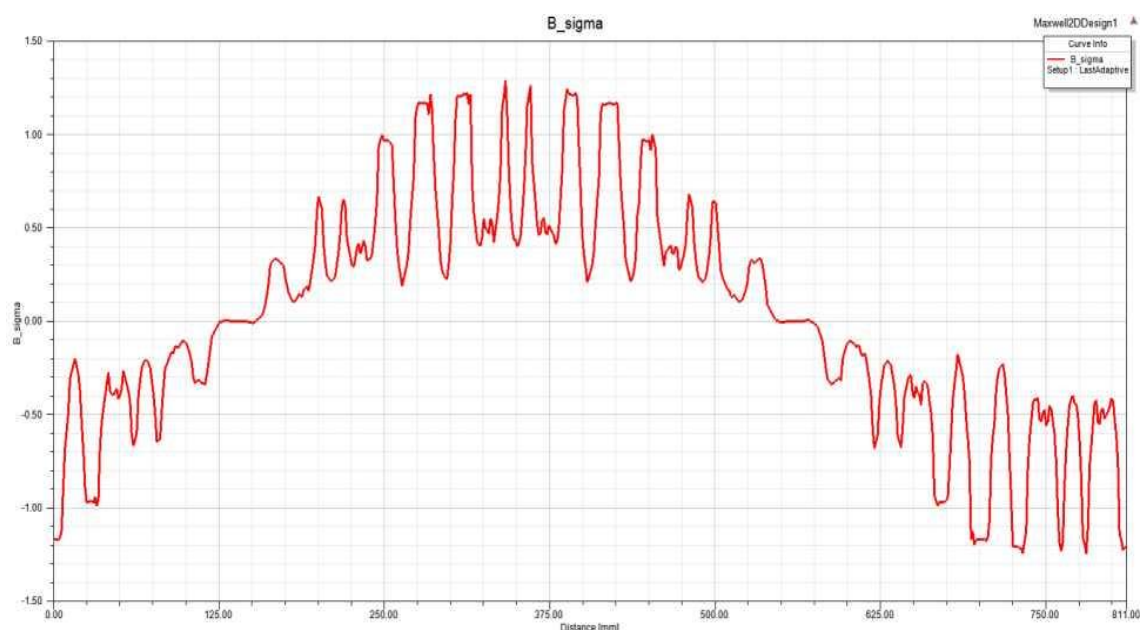


Рис. 3.5. Крива розподілу індукції у повітряному зазорі, побудована в Ansys Electronics Desktop

Отриману криву розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі можна експортувати в програмний продукт Mathcad, де за допомогою математичних перетворень функцію можна розкласти в ряд Фур'є та виділити першу гармоніку (див. рис. 3.6).

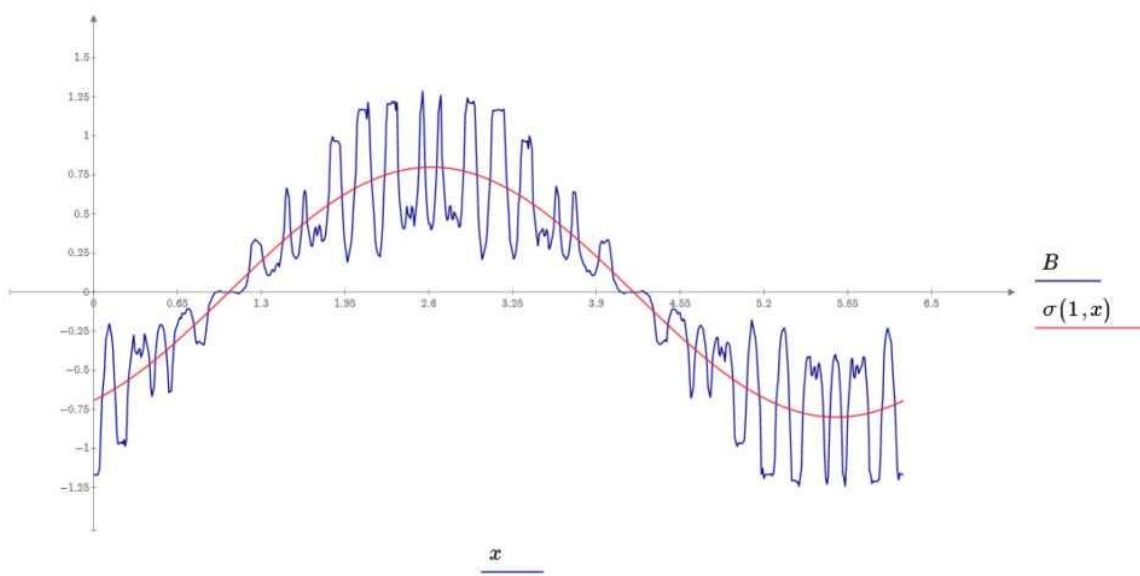


Рис. 3.6. Крива індукції у повітряному зазорі та виділена перша гармоніка індукції у повітряному зазорі у Mathcad

Провівши інтегрування першої гармоніки індукції вздовж полюсного поділу, визначаємо за формулою (3.1) функцію магнітного потоку (рисунк 3.7).

$$\Phi(x) = l_{\delta} \cdot \int_0^{\pi \cdot D / 2p} B_{\delta,1} dx, \quad (3.1)$$

де l_{δ} - активна довжина магнітопроводу (В); D - середній діаметр повітряного зазору (м); B_{s1} - функція першої гармоніки кривої розподілу індукції у повітряному зазорі; p - кількість пар полюсів.

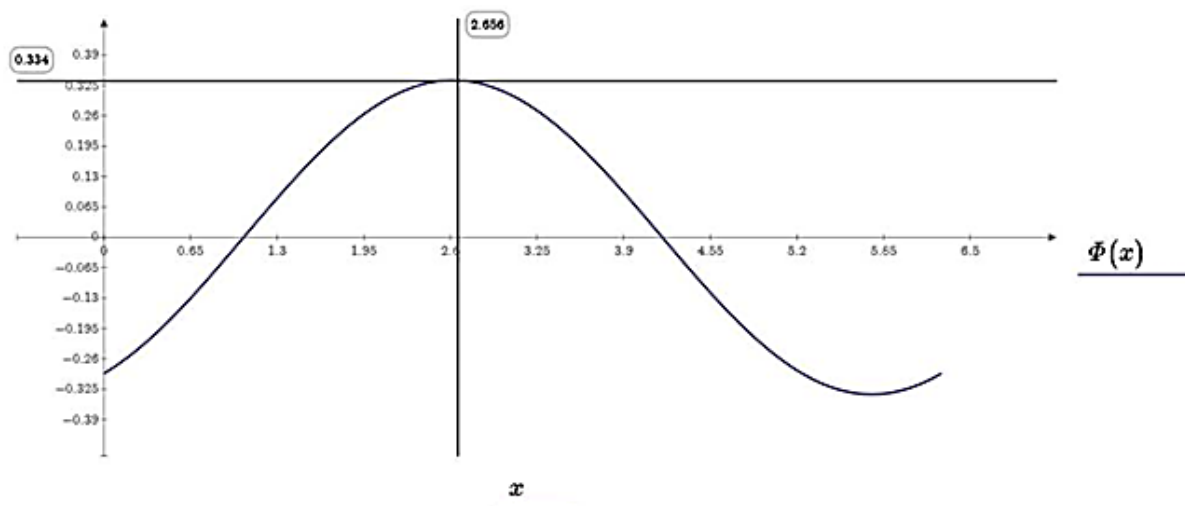


Рис. 3.7. Функція магнітного потоку

Розділивши амплітудне значення функції магнітного потоку на $\pi/2$ отримуємо середнє значення магнітного потоку в повітряному зазорі:

$$\Phi_{\text{серед}} = \frac{\max(\Phi(x))}{\pi/2}, \quad (3.2)$$

Шляхом зіставлення значень магнітних потоків $\Phi_{\text{серед}}$ і $\Phi_{\text{ном}}$, а також значень магнітної індукції в окремих елементах поперечного перерізу магнітопроводу, отриманих у середовищі Maxwell 2D Design, з величинами магнітної індукції, визначеними аналітично в підпрограмі синтезу, можна виконати первинну оцінку точності аналітичної моделі. Одночасно на цьому етапі здійснюється налаштування параметрів скінченно-елементної сітки, необхідне для подальшого перенесення моделі до модуля Transient.

На наступному етапі виконується розрахунок моделі в модулі Transient. Як зазначалося раніше, машина подвійного живлення здатна функціонувати в різних режимах, що відповідають досинхронній, синхронній та надсинхронній частотам обертання ротора. Оскільки вихідний розрахунок геометрії в програмі оптимізації проводився для синхронного режиму, дослідження в модулі Transient доцільно розпочати саме з цього режиму роботи.

З цією метою у двох із трьох фаз роторної обмотки задається постійний

струм, а в коло статорної обмотки вводиться номінальне навантаження. Така постановка розрахунку дає змогу оцінити електромагнітний стан машини в базовому режимі, перевірити відповідність отриманих параметрів результатам аналітичного синтезу та підготувати модель до подальшого аналізу перехідних і нестационарних режимів роботи (рисунк 3.8).

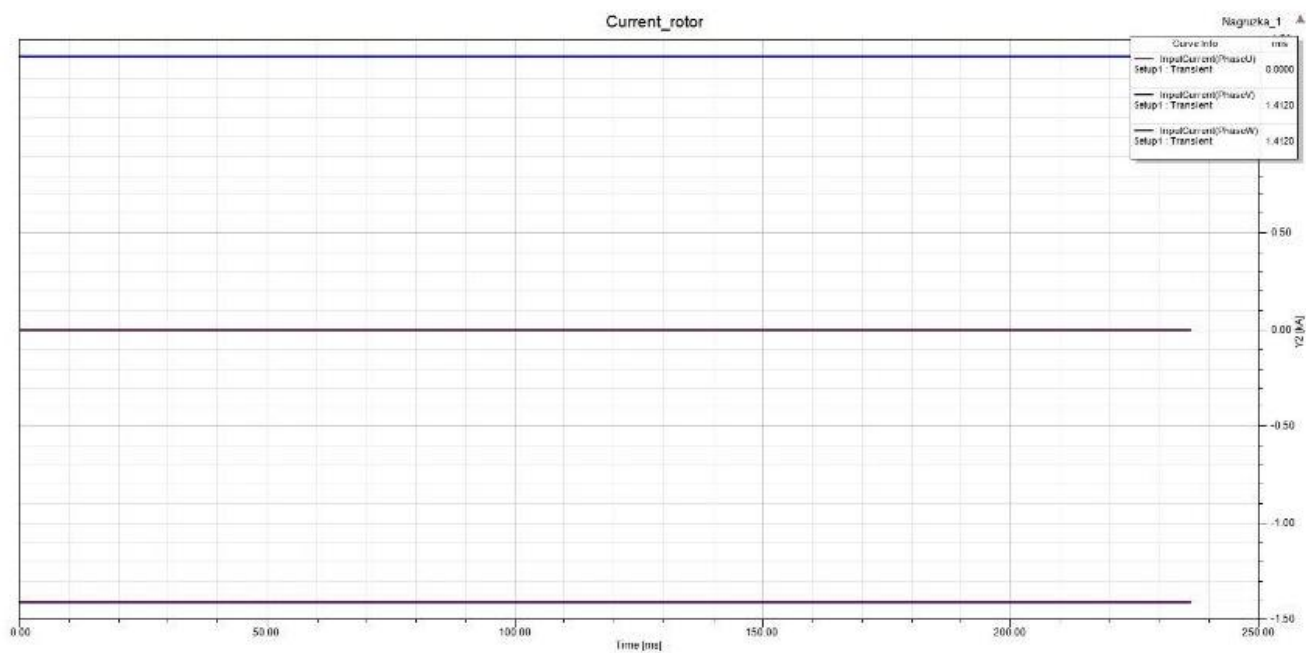


Рис. 3.8. Графік струмів, заданих в обмотці ротора за синхронної швидкості обертання ротора

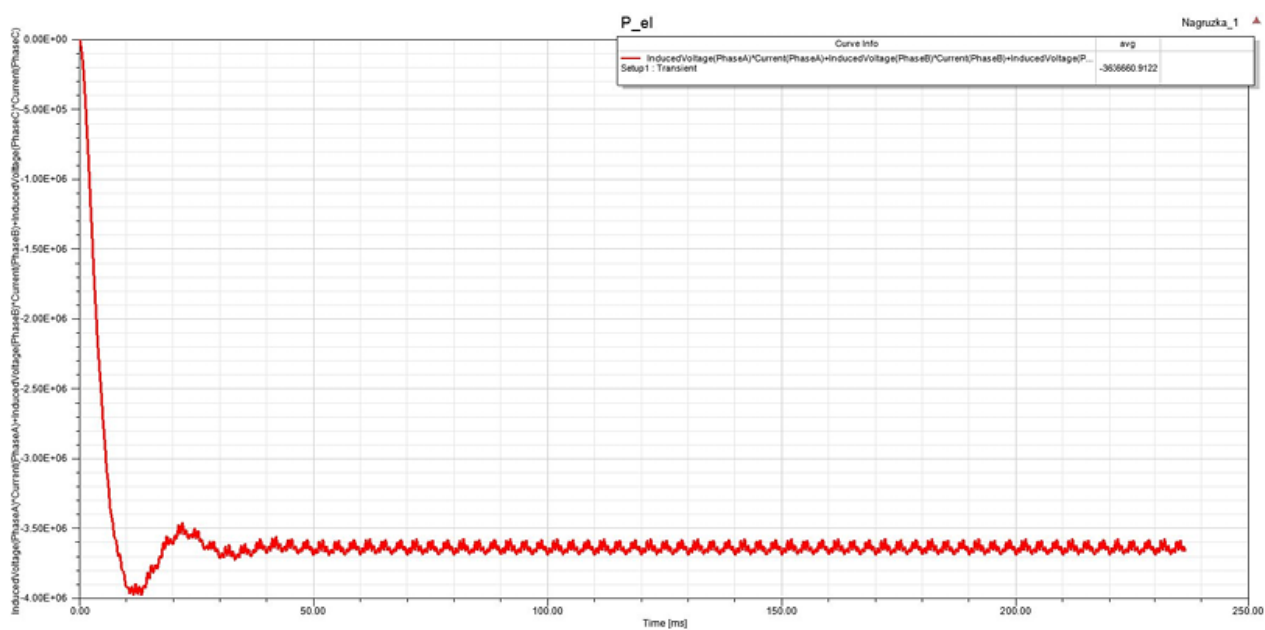


Рис. 3.9. Розрахунок генерованої потужності при синхронній швидкості

обертання ротора

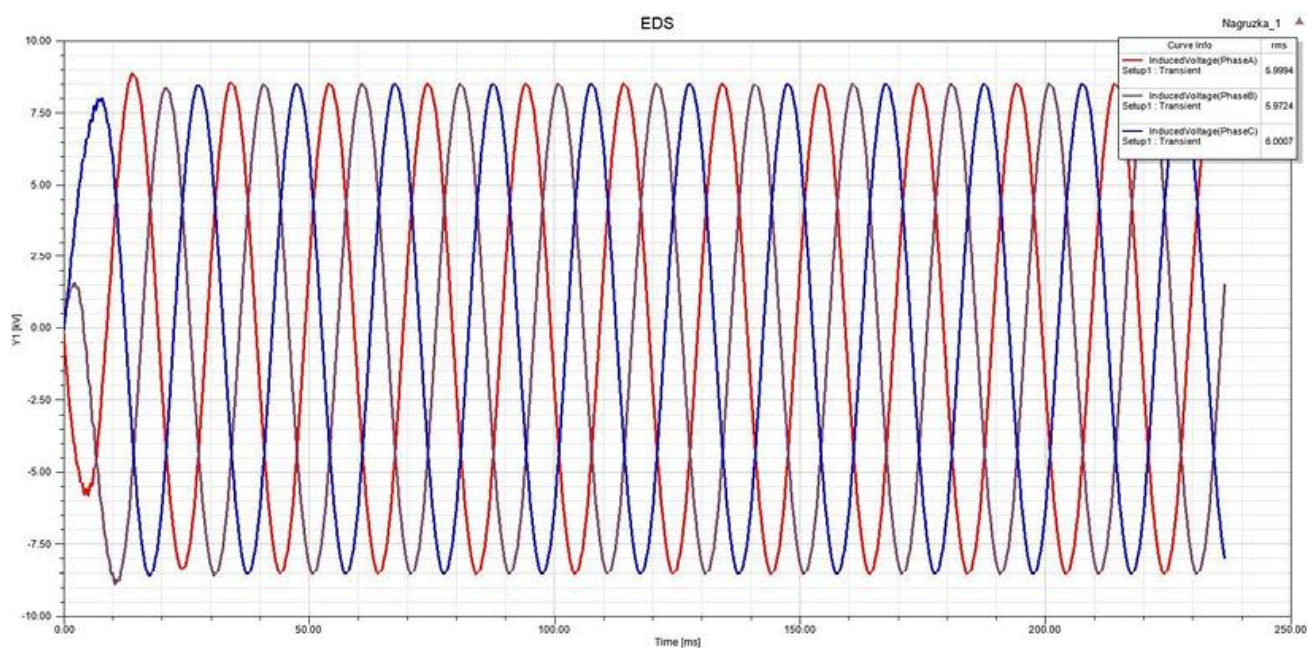


Рис. 3.10. Розрахунок ЕРС в обмотці статора при синхронній швидкості
обертання ротора

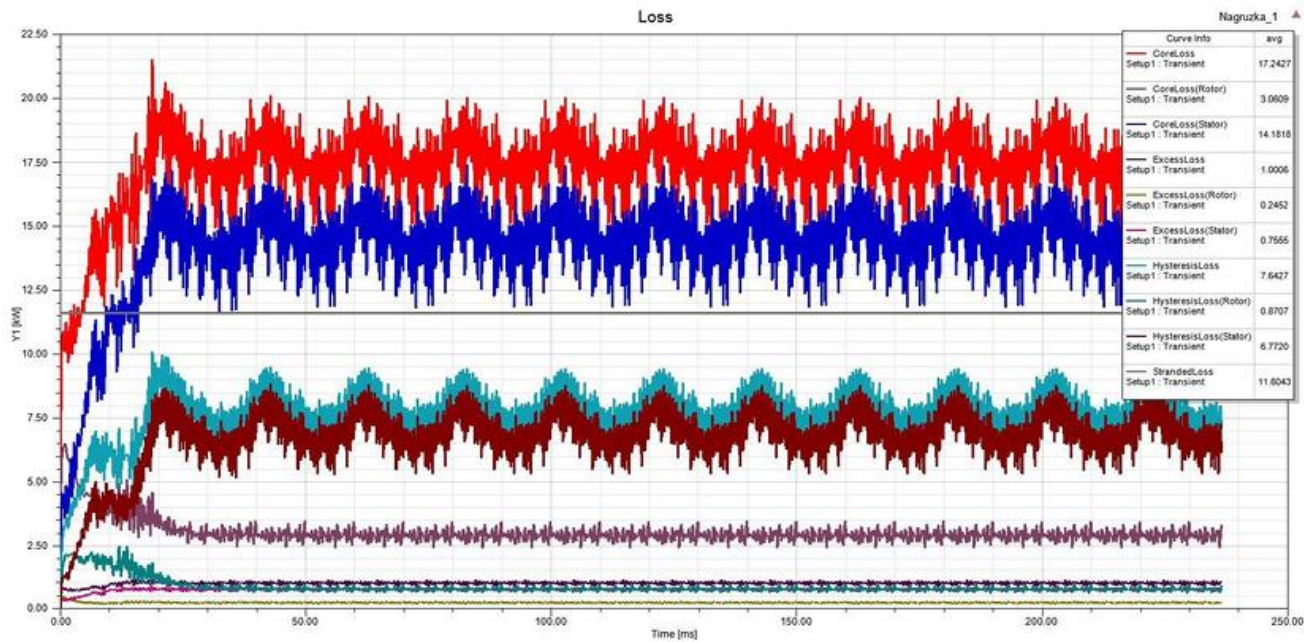


Рис. 3.11. Розрахунок втрат у генераторі

На даному етапі порівнюються результати, отримані розрахунком за програмою оптимізації та методом кінцевих елементів (рисунки 3.8 – 3.11), та

проводиться остаточне налагодження розрахункової моделі.

Заключним етапом аналізу електромагнітного стану Maxwell 2D Design є аналіз генератора в досинхронному і надсинхронному режимах роботи в модулі Transient. З цією метою в обмотках ротора визначається змінна напруга необхідної частоти і фази, яка залежить від швидкості обертання ротора і режиму роботи (рисунок 3.12).

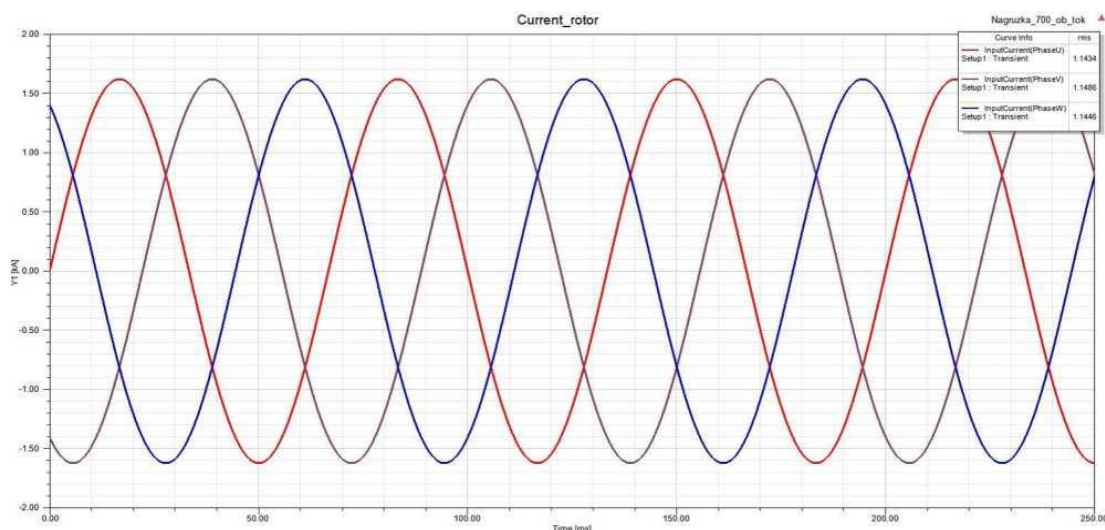


Рис. 3.12. Графік струмів, заданих в обмотці ротора при досинхронній швидкості обертання ротора

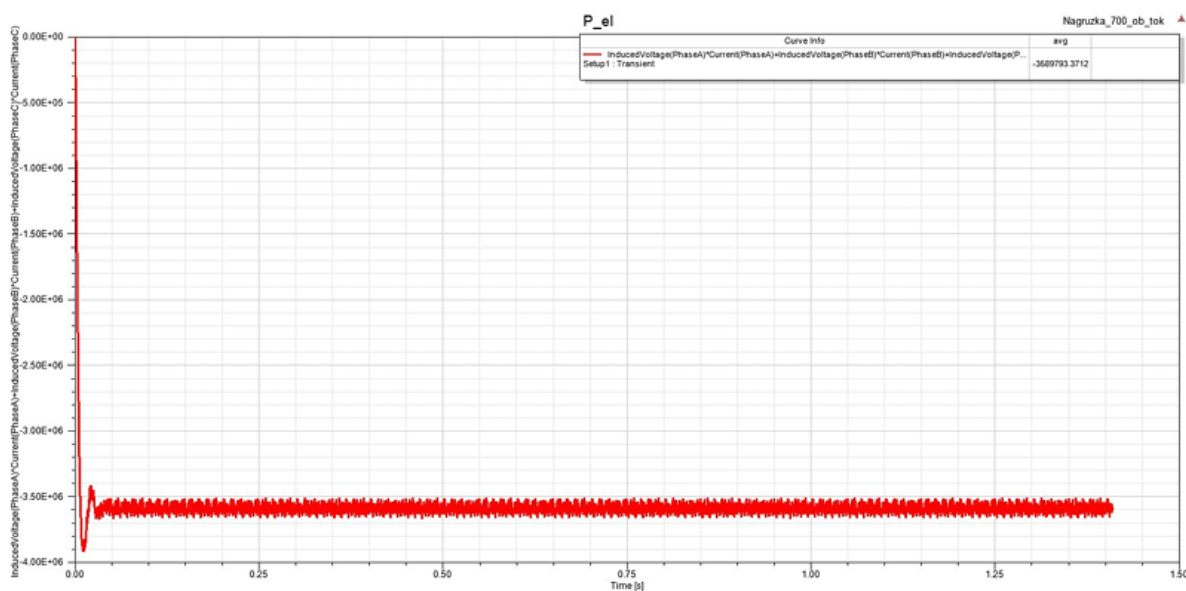


Рис. 3.13. Розрахунок генерованої потужності при досинхронній швидкості обертання ротора

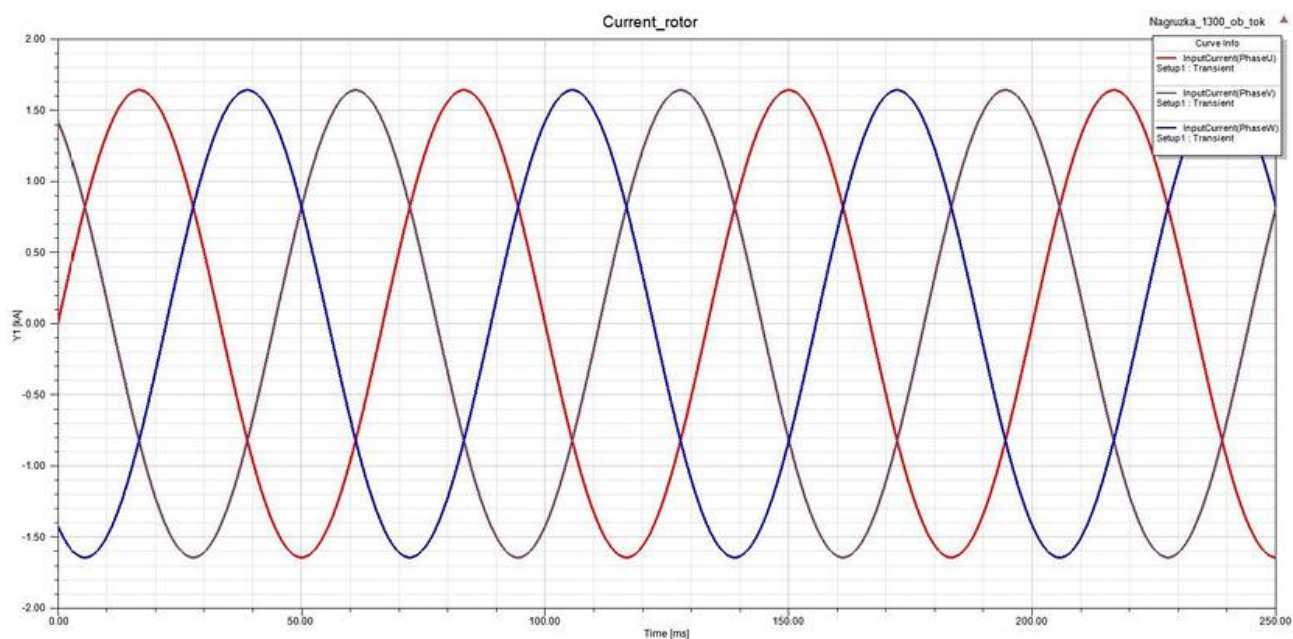


Рис. 3.14. Графік струмів, заданих в обмотці ротора при надсинхронній швидкості обертання ротора

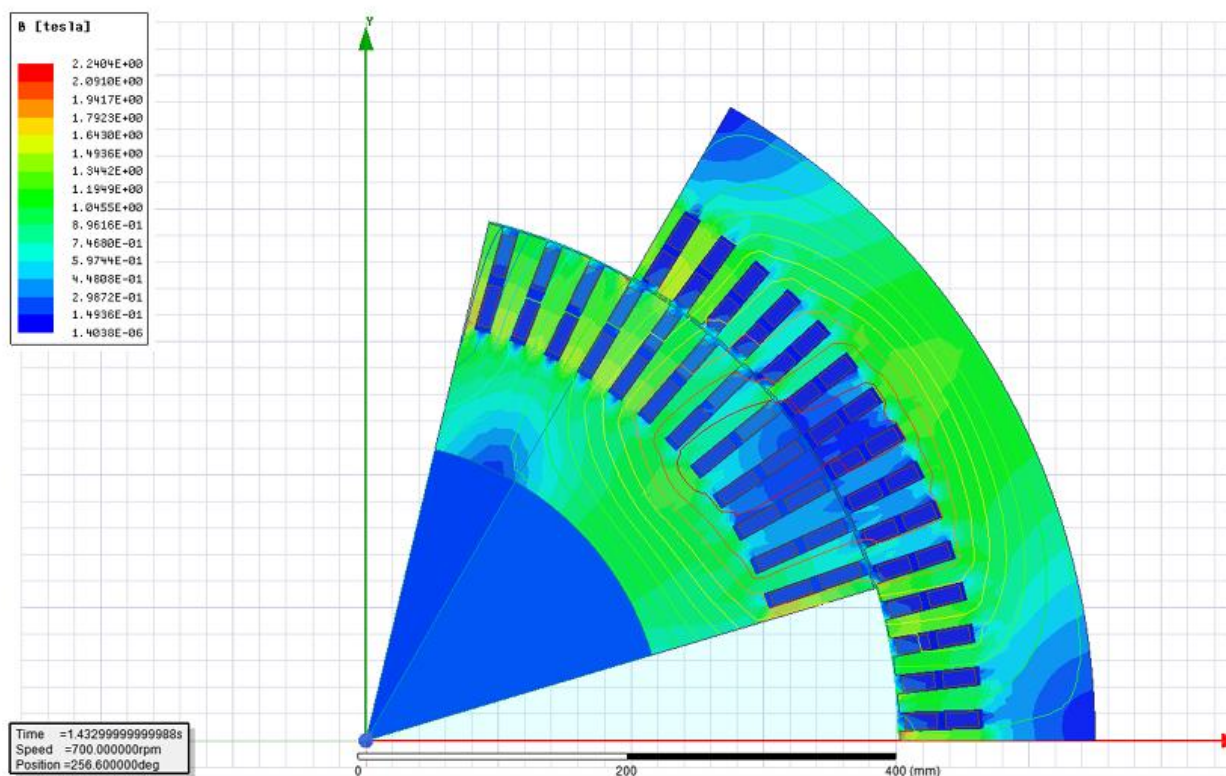


Рис. 3.15. Аналіз магнітного поля при частоті обертання 700 об/хв.

З урахуванням високої вартості помилки на етапі виготовлення дослідного зразка до складу проєктної системи було включено спеціалізовану підсистему поглибленого аналізу електромагнітного та теплового стану асинхронізованого синхронного генератора. Для дослідження електромагнітних процесів обрано середовище Ansys Electronics Desktop, яке забезпечує високоточну розрахункову оцінку на основі методу скінченних елементів. Аналіз теплового стану реалізовано з використанням програмного комплексу MATLAB Simulink.

Розроблена підсистема електромагнітного аналізу побудована на базі CAE-системи Ansys Electronics Desktop та організована як двоетапна розрахункова процедура. На першому етапі геометричні параметри, отримані в підсистемі синтезу, автоматично передаються за допомогою заздалегідь підготовлених скриптів до модуля Ansys RMxprt. У цьому модулі розрахунок виконується на основі методу схем заміщення. Зазначений етап призначений для первинної перевірки результатів оптимізаційного синтезу та, за необхідності, їх попереднього коригування.

На другому етапі розрахункові дані передаються до модуля Ansys Maxwell 2D Design, який реалізує скінченно-елементний підхід. У цьому середовищі виконується розв'язання плоскопаралельної задачі електромагнітного поля, що дає змогу уточнити параметри магнітної системи, оцінити розподіл магнітної індукції в активних елементах конструкції та отримати остаточні значення основних параметрів і енергетичних характеристик асинхронізованого синхронного генератора.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Вступ

У ході дипломної роботи було спроектовано вітрогенератор для отримання електричної енергії та проведено необхідні розрахунки за допомогою спеціального програмного забезпечення. Виходячи з цього визначаються умови експлуатації на даному устаткуванні, виявлення та вивчення фізичних та біологічних факторів, що негативно впливають на здоров'я людини та навколишнє середовище.

У цьому розділі викладено комплекс заходів, що мінімізують - несприятливі наслідки виробництва та експлуатації розробки. Усі рекомендовані заходи узгоджуються з існуючими стандартами техніки безпеки, ергономіки, нормами санітарії, екологічної та пожежної безпеки.

4.1. Аналіз виявлених шкідливих факторів виробничого середовища

При проектуванні вітрогенератора для отримання енергії, важливе значення сфокусовано на тому, щоб фізичні та біологічні фактори були мінімізовані і не чинили шкідливого впливу на людей. Оптимальними умовами користування пристроєм прийнято вважати умови, при яких людина зберігає своє здоров'я, а також дозволяє користуватися даним обладнанням тривалий час, без втрати якості продукції.

4.1.1. Підвищений рівень шуму під час роботи установки

Одним з найбільш небезпечних і шкідливих факторів є шум, тому при роботі установки повинні дотримуватися норм за рівнем шуму. Згідно ДСТУ без шкоди для органів слуху людина здатна виносити постійний шум вдень 55 децибел, вночі 40 децибел.

Шум - це безладне поєднання різних за силою і частотою звуків, здатних надавати несприятливий вплив на організм.

У цій роботі розроблено вітрогенератор. Вітряні енергетичні установки виробляють два різновиди шуму:

- механічний шум - шум від роботи механічних та електричних компонентів (для сучасних вітроустановок практично відсутній, але є значним у вітроустановках старших моделей)
- аеродинамічний шум - шум від взаємодії вітрового потоку з лопатями (посилюється при проходженні лопаті повз вежу вітроустановки) .

Шум від спроектованої установки не перевищує 40 децибел, що є нижчим від допустимих норм, це обумовлено тим, що вітрогенератор тихохідний.

4.1.2. Підвищений рівень вібрації під час роботи установки

Джерелом вібрації у вітроенергетичній установці є насамперед обертання ротора вітрогенератора. Під час роботи вітроколеса на кінцях лопатей формуються вихрові потоки, які можуть бути джерелом низькочастотних коливань та інфразвукових складових. Інтенсивність таких коливань залежить від потужності установки, частоти обертання ротора, геометрії лопатей, ступеня балансування вітроколеса та умов обтікання повітряним потоком. Чим більшою є потужність вітроенергетичної установки, тим вищою може бути інтенсивність вібраційного впливу та його потенційний вплив на навколишнє середовище. Водночас зазначені явища є найбільш характерними для потужних вітроелектростанцій, тоді як установки малої вітроенергетики за цим показником є значно безпечнішими.

Вібрація, що створюється установкою, може впливати на людину переважно у випадку її перебування в безпосередній близькості до працюючого обладнання. Тривалість такого впливу, відстань до джерела вібрації, технічний стан установки та рівень її балансування є основними чинниками, що визначають потенційний ризик для здоров'я.

Розрізняють два основні типи вібраційного впливу: загальну та локальну вібрацію.

Загальна вібрація впливає на організм людини в цілому. Її тривала дія може спричиняти головний біль, зниження працездатності, запаморочення, порушення сну, погіршення загального самопочуття, розлади серцево-судинної діяльності та інші функціональні порушення.

Локальна вібрація діє на окремі частини тіла людини. Найбільш чутливими до такого впливу є верхні кінцівки, особливо кисті та передпліччя. Тривалий локальний вібраційний вплив може призводити до розвитку професійних захворювань, зокрема вібраційної хвороби, порушень периферичного кровообігу, неврологічних розладів, а також тунельних синдромів.

Відповідно до вимог ДСТУ 12.1.012-90 «Вібраційна безпека», допустимі параметри вібрації мають регламентуватися залежно від частотного діапазону, напрямку дії та умов перебування людини в зоні впливу. Зокрема, для частот від 31,5 до 63 Гц амплітуда вібрації у приміщенні не повинна перевищувати $0,0072 \cdot 10^{-3}$ м.

Для зниження рівня вібрації та запобігання її негативному впливу в конструкції установки необхідно передбачити комплекс технічних заходів. До них належать жорстке та надійне кріплення основних вузлів і деталей, застосування лопатей з оптимальним аеродинамічним профілем, якісне балансування вітроколеса, забезпечення справного технічного стану генератора, а також своєчасне проведення профілактичного огляду та технічного обслуговування установки. Дотримання зазначених вимог дає змогу зменшити рівень механічних коливань, підвищити надійність роботи обладнання та забезпечити безпечніші умови експлуатації.

4.2. Електромагнітне випромінювання обладнання

Усі електричні прилади, пристрої, електричні машини та провідникові елементи, що перебувають під напругою або через які протікає електричний струм, є джерелами електромагнітного поля. За певних рівнів інтенсивності електромагнітне випромінювання може чинити негативний вплив на організм людини, тварин та інших живих істот, а також створювати електромагнітні завади, що несприятливо впливають на роботу електронного обладнання.

Проектowana вітроенергетична установка містить електричний генератор, який є одним із потенційних джерел електромагнітних завад. Водночас для установок малої потужності рівень електромагнітного впливу, як правило, є порівнянним із випромінюванням побутових електротехнічних пристроїв, зокрема електродвигунів кондиціонерів, ручного електроінструменту або іншого обладнання з електромеханічним перетворенням енергії. Вітрогенератори великої потужності, зокрема понад 100 кВт, можуть створювати електромагнітні поля більшої інтенсивності, однак такі установки зазвичай розміщують із дотриманням нормативних санітарно-захисних відстаней і не встановлюють безпосередньо поблизу житлової забудови.

Гранично допустимі рівні електромагнітного поля у виробничих умовах регламентуються відповідними санітарними нормами та правилами. Для умов впливу протягом усієї робочої зміни допустимі рівні напруженості електричного та магнітного поля можуть становити відповідно 500 В/м і 50 А/м.

Для зниження впливу електромагнітного випромінювання та забезпечення електромагнітної сумісності обладнання доцільно застосовувати такі захисні заходи:

- екранування джерел електромагнітного випромінювання або об'єктів захисту, зокрема активне, пасивне чи комплексне екранування;
- винесення джерел електромагнітного поля за межі ближньої зони та робочої зони перебування персоналу;

- конструктивне вдосконалення обладнання з метою зниження рівнів електромагнітних завад, загальної споживаної та випромінюваної потужності;
- обмеження часу перебування людей у зоні дії електромагнітного поля;
- використання заземлення, фільтрів електромагнітних завад і раціонального прокладання кабельних ліній.

Застосування зазначених заходів дає змогу зменшити рівень електромагнітного впливу, підвищити безпечність експлуатації вітроенергетичної установки та забезпечити стабільну роботу електронних систем керування.

4.3 Аналіз виявлених небезпечних факторів виробничого середовища

4.3.1 Рухомі частини обладнання

Рухливі частини обладнання є небезпекою для людей, які так чи інакше взаємодіють з обладнанням. Неправильне використання обладнання та порушення техніки безпеки може спричинити серйозні каліцтва та травми. Обладнання такого типу повинно мати захист від раптового або випадкового включення для забезпечення безпеки робочих при налагодженні обладнання.

Як сказано раніше, рухомі частини обладнання являють собою небезпеку, у разі, коли людина буде перебувати у стані прямого контакту з обладнанням. Тому для того, щоб убезпечити себе від цієї ситуації, не варто торкатися установки, яка знаходиться в робочому стані.

Вимоги щодо безпеки обладнання регламентовані у ДСТУ 12.2.003-91.

Безпека конструкції обладнання забезпечується:

1. Вибором принципів дії та конструктивних рішень, джерел енергії та характеристик енергоносіїв, параметрів робочих процесів, системи управління та її елементів;
2. Мінімізацією споживаної та накопичуваної енергії при функціонуванні -обладнання;

3. Вибір комплектуючих виробів і матеріалів для виготовлення конструкцій $\neg$, а також застосовуваних при експлуатації;
4. Вибір технологічних процесів виготовлення;
5. Застосуванням вбудованих у конструкцію засобів захисту працюючих, а також засобів інформації, що попереджають про виникнення небезпечних (у тому числі пожежонебезпечних) ситуацій;
6. Надійністю конструкції та її елементів (у тому числі дублюванням від -ділових систем управління, засобів захисту та інформації, відмови яких можуть призвести до створення небезпечних ситуацій);
7. Застосуванням засобів механізації, автоматизації (у тому числі автоматичного регулювання параметрів робочих процесів) дистанційного управління та контролю;
8. Можливістю використання засобів захисту, що не входять до конструкції;
9. Виконання ергономічних вимог;
10. Обмеженням фізичних та нервово-психічних навантажень на працюючих.

Для забезпечення захисту людей від травм і робочих органів від попадання води, снігу встановлено захисний кожух. Кожух є листовою конструкцією, звареною між собою. Установку слід встановлювати на висоті, з метою безпеки від попадання у вітрогенератор дитини. Якщо ж встановити вітрогенератор на рівні землі, то слід встановити в коло огорожу.

Обладнання укомплектовується нормативно-технічною документацією. При виконанні вимог експлуатації при роботі обладнання повинно відповідати вимогам безпеки протягом усього терміну служби.

4.3.2. Регіональна безпека

В даний час одним з важливих завдань людства є захист навколишнього середовища. Промислові відходи, які підприємства викидають в атмосферу, водойми та надра землі, на даний момент перевищують допустимі санітарні

норми. Для зменшення кількості викидів в атмосферу слід відмовитись від старих методів виробництва на користь методів, які забезпечують безвідходність.

Розроблена установка є засобом видобутку електричної енергії найбільш екологічним і безвідходним для навколишнього середовища методом. Проектовану конструкцію потрібно встановлювати у відкриту зону, на селитебну територію, оскільки роботи установки необхідна активна взаємодія Космосу з вітровими потоками.

У результаті, при роботі установки не виникає шкідливих відходів, тому що головною особливістю даного обладнання є те, що отримання електричної - енергії здійснюється альтернативним.

4.3.3. Захист у надзвичайних ситуаціях

«Надзвичайна ситуація; НС: Обстановка на певній території або акваторії, що склалася в результаті аварії, небезпечного природного явища, катастрофи, стихійного або іншого лиха, які можуть спричинити або спричинили за собою людські жертви, шкоду здоров'ю людей або навколишньому природному середовищу, значні матеріальні втрати і порушення умов. [18]

Найбільш ймовірна НС при роботі даного обладнання - пожежа, - викликана коротким замиканням. Недотримання техніки безпеки загрожує зникненням пожежі та знищенням установки.

Для виключення можливості виникнення пожежі рекомендується:

Проводити організаційні заходи:

- Проводити техогляд;
- З'єднувати робочі органи проводами необхідного перерізу та відповідного матеріалу

Для виключення можливості виникнення пожежі рекомендується проводити пожежно-профілактичні заходи:

- Організаційні заходи:
1. Розміщення інструкцій щодо запобігання та боротьби з пожежею.

- Експлуатаційні заходи:
 1. Дотримання техніки безпеки під час роботи устаткування;
 2. Дотримання норм експлуатації устаткування;
 3. Забезпечення вільного проходу;
 4. Зміст обладнання у справному стані.

Правові та організаційні питання забезпечення безпеки

Відповідно до ДСТУ 12.2.062-81, обладнання має бути обладнане - захисними пристроями:

- Включно виліт робочих елементів із робочої зони;
- Включно взаємодію людини з вузлами обладнання, що рухаються, за межами робочої зони.
- Включно розташування не закритих захисними огорожами - елементів устаткування, що рухаються, за межами робочої зони.
- Захисні пристрої не повинні обмежувати можливості встановлення.
- Устаткування має бути оснащено кнопками екстреної зупинки.

Висновки

У ході виконаної роботи у розділі Охорона праці було виявлено, що технологія не породжує шкідливих факторів. Вона безшумна, не створює вібрації та електромагнітних випромінювань, що позначається сприятливо на оточуючих людей, які використовують дане обладнання. А також були складені вимоги щодо експлуатації пристрою та рекомендації щодо захисту установки від збоїв у роботі.

Експлуатація вітрогенераторних установок пов'язана з впливом комплексу небезпечних та шкідливих факторів, серед яких основними є електрична небезпека, робота на висоті, механічні ризики, шум, вібрація та пожежна небезпека. Забезпечення безпечних умов праці потребує комплексного підходу, що включає технічні, організаційні та санітарно-гігієнічні заходи.

Використання сучасних систем автоматичного контролю, аварійного захисту, засобів індивідуального захисту та систем моніторингу дозволяє значно

підвищити рівень безпеки експлуатації ВГУ. Особливе значення має підготовка персоналу та дотримання вимог нормативної документації.

Подальший розвиток вітроенергетики потребує удосконалення систем охорони праці, впровадження інтелектуальних систем діагностики та підвищення рівня автоматизації технологічних процесів.

ВИСНОВКИ

У роботі виконано комплексне дослідження асинхронізованих синхронних генераторів, які широко застосовуються у складі вітроенергетичних установок. Отримані результати дали змогу суттєво розвинути теоретичні та методичні положення, пов'язані з проєктуванням електричних машин цього класу. Розв'язання поставленої технічної задачі має важливе значення для подальшого розвитку вітчизняного електромашинобудування як однієї з важливих галузей промисловості.

На основі виконаних досліджень отримано такі основні результати.

Як базовий тип генератора для вітроенергетичних установок великої потужності обґрунтовано вибір асинхронізованого синхронного генератора, або машини подвійного живлення. Зазначений тип електричної машини забезпечує можливість безпосереднього вироблення електроенергії зі стандартними параметрами без введення додаткових ступенів перетворення за зміни частоти обертання ротора в широкому діапазоні — від нульових значень до надсинхронної області. Це сприяє підвищенню коефіцієнта корисної дії процесу електромеханічного перетворення енергії. Крім того, така машина не потребує споживання реактивної потужності з мережі та за відповідних режимів роботи може сама виконувати функцію її джерела. Оскільки основні перетворювальні процеси зосереджені в колі збудження, з'являється можливість зменшити габаритні розміри, встановлену потужність і вартість силового електронного обладнання. Для реалізації безконтактного струмопідведення до роторного кола в тихохідних вітроенергетичних установках із вертикальною віссю обертання запропоновано використовувати акумуляторну батарею, яка одночасно виконує функцію накопичувача електричної енергії. Для швидкохідних установок обґрунтовано доцільність застосування безщіткового збуджувального пристрою або обертового трансформатора.

Розроблено математичну модель, призначену для визначення гранично допустимих габаритних параметрів ротора за умови відсутності критичних

частот обертання в робочому діапазоні. У межах цієї моделі з урахуванням вимог механічної міцності та стійкості визначаються мінімально допустимий внутрішній діаметр осердя ротора, максимально допустимий зовнішній діаметр ротора та гранична довжина його активної частини. Запропонований підхід забезпечує узгодження параметрів механічної стійкості ротора з електромагнітними параметрами машини. На відміну від відомих методик, ця модель призначена не лише для перевірконого оцінювання вже прийнятих конструктивних рішень, а й для синтезу проєктних варіантів на ранніх етапах розроблення.

Сформовано математичну модель електромагнітного розрахунку асинхронізованого синхронного генератора, орієнтовану на оптимізацію геометрії активних частин машини. Як незалежні змінні використано узагальнені параметри, що характеризують співвідношення площ активних зон електричної машини. У межах моделі встановлено основні аналітичні залежності та формалізовано показники якості, які застосовуються під час оптимізаційного проєктування.

На основі проведеного аналізу розроблено підсистему синтезу асинхронізованого синхронного генератора, яка реалізує багаторівневу однокритеріальну оптимізацію для різних проєктних умов. Запропонована підсистема дає змогу враховувати до п'яти типових проєктних ситуацій, що забезпечує її застосування до широкого кола практичних задач, які виникають під час розроблення генераторів цього класу.

Створено підсистему аналізу електромагнітного стану, засновану на використанні САЕ-середовища Ansys Electronics Desktop, яка містить два послідовно реалізовані етапи. На першому етапі виконується попередній розрахунок у модулі Ansys RMXprt, що ґрунтується на методі схем заміщення. На другому етапі розрахункові дані передаються до модуля Ansys Maxwell 2D Design, де аналіз виконується методом скінченних елементів. У результаті розв'язується плоскопаралельна польова задача та визначаються уточнені параметри й енергетичні характеристики асинхронізованого синхронного

генератора.

За підсумками проведеного дослідження розроблено проєктну систему для створення асинхронізованих синхронних генераторів великої потужності. Вона дає змогу, починаючи з вихідних вимог технічного завдання, визначати допустимі габаритні параметри ротора для подальшого використання в оптимізаційному циклі, виконувати оптимізацію геометрії за заданими критеріями, а також проводити поглиблений аналіз електромагнітного та теплового стану машини із застосуванням сучасних CAE-систем. Розроблена система може бути використана не лише для вітроенергетичних установок, а й під час проєктування генераторів цього класу для інших сфер застосування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Титко О. І., Васьковський Ю. М. Синхронно-асинхронні турбогенератори. – Київ : Наукова думка, 2021. – 247 с.
2. Титко О. І., Васьковський Ю. М. Синхронно-асинхронні турбогенератори в структурі генеруючих потужностей енергосистем. Наукові основи створення та їхня експлуатація // Інститут електродинаміки НАН України Технічна електродинаміка. – 2022. – № 2. – С. 87–92.
3. Покровський К., Музичак А. Voltage Deviations Influence on Asynchronous Characteristics of Powerful Asynchronized Turbogenerator // Energy Engineering and Control Systems. – 2020. – Vol. 6, No. 2. – P. 104–109.
4. Артюх С. Ф., Червоненко І. І. Заощадження енергоресурсів за рахунок підвищення ефективності використання гідроагрегатів при їх роботі зі змінною частотою обертання // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – № 2.
5. Кісленко Я. О. Електромеханічні процеси генератора автономної вітроустановки : магістерська дисертація. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024.
6. Перминов Ю., Волков Л., Монахов Є. Робота синхронного генератора вітроустановки зі збудженням від постійних магнітів на мережу // Відновлювана енергетика. – 2022. – № 1(68). – С. 79–86.
7. Васьковський Ю. М. Електричні машини змінного струму. – Київ : Вища школа, 2025. – 447 с.
8. Жежеленко І. В., Шидловський А. К. Електромеханічні системи автономних джерел енергії. – Київ : Наукова думка, 2008. – 312 с.
9. Blaabjerg F., Teodorescu R., Liserre M., Timbus A. Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems // IEEE IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2006. – Vol. 53, No. 5. – P. 1398–1409.
10. Jarzyna W. A Survey of the Synchronization Process of Synchronous Generators and Power Electronic Converters // Bulletin of the Polish Academy of

Sciences: Technical Sciences. – 2019. – Vol. 67, No. 6. – P. 1069–1083.

11. Elistratov V., Ramadan A. Modeling and Control of Grid-Connected Wind Power Installation with Doubly Fed Induction Generator // Journal of Engineering Sciences and Technology. – 2018. – Vol. 24, No. 3. – P. 224–236.

12. Tang C. Y., Guo Y., Jiang J. N. Nonlinear Dual-Mode Control of Variable-Speed Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generators // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2011. – Vol. 19, No. 4. – P. 744–756.

13. Schaefer R. C. The Art of Generator Synchronizing // IEEE Pulp and Paper Industry Conference. – 2016. – P. 1–9.

14. Chiasson J. Modeling and High Performance Control of Electric Machines. – Hoboken : Wiley-IEEE Press, 2015. – 736 p.

15. Krause P. C., Wasynczuk O., Sudhoff S. D. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. – 3rd ed. – Hoboken : Wiley-IEEE Press, 2023. – 632 p.

16. Boldea I. Variable Speed Generators. – Boca Raton : CRC Press, 2016. – 456 p.

17. Müller S., Deicke M., De Doncker R. Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines // IEEE Industry Applications Magazine. – 2022. – Vol. 8, No. 3. – P. 26–33.

18. Ackermann T. Wind Power in Power Systems. – 2nd ed. – Chichester : Wiley, 2021. – 1400 p

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

Асинхронізований синхронний генератор для вітроенергетичних установок

Виконав: студент 4 курсу,
групи НВДЕ-2022
Р.Є. Руденко

Керівник: доц. О.Б. Єгоров

Цілі та завдання проєктування

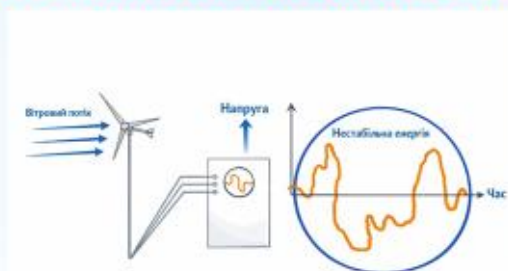
Виконати комплексне дослідження асинхронізованих синхронних генераторів, які широко застосовуються у складі вітроенергетичних установок.

Розробити математичну модель, призначену для визначення гранично допустимих габаритів ротора за умови відсутності критичних частот обертання в робочому діапазоні.

Провести електромагнітний розрахунок асинхронізованого синхронного генератора, що орієнтований на оптимізацію геометрії активних частин машини.

Розглянути питання Охорони праці при експлуатації асинхронізованого синхронного генератора.

ВИБІР ТИПУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ



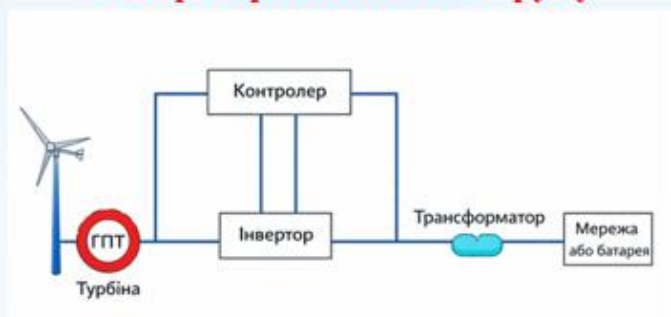
при зміні швидкості обертання генератор формує напругу, параметри якої амплітуда, частота і фаза також змінюються

Для забезпечення стабільності частоти вихідної напруги можуть застосовуватися два основні підходи:

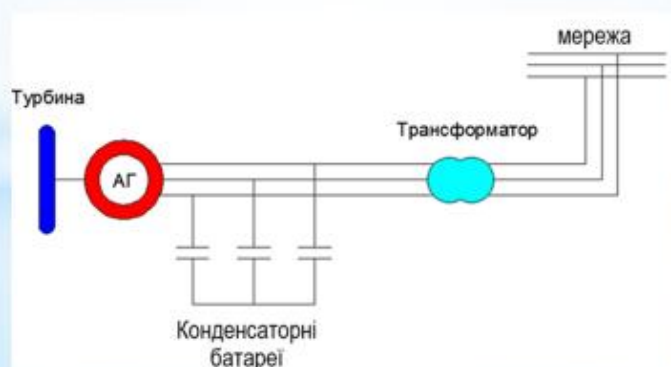
Перший з них заснований на механічному впливі безпосередньо на частоту обертання вітроколеса. Технічна реалізація такого способу можлива, наприклад, шляхом зміни кута атаки лопатей.

Другий підхід полягає в електричному перетворенні енергії з нестандартними параметрами в енергію зі стандартними характеристиками.

Генератор постійного струму



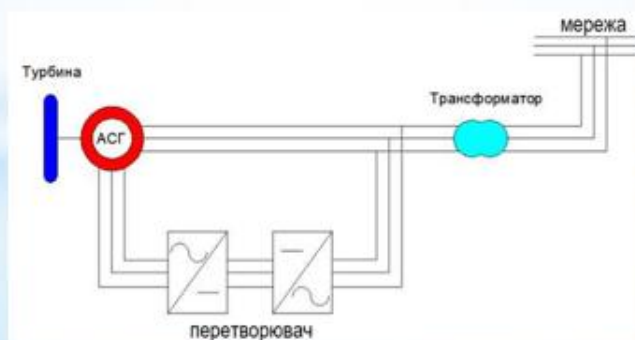
Асинхронний генератор



Синхронний генератор

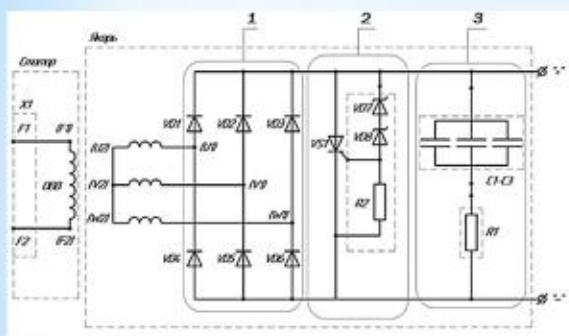


Асинхронізований синхронний генератор (машина подвійного живлення)

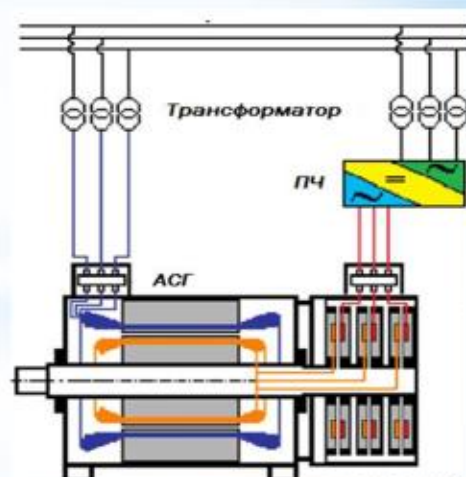


Варіанти виключення щіткового вузла для синхронних асинхронізованих генераторів

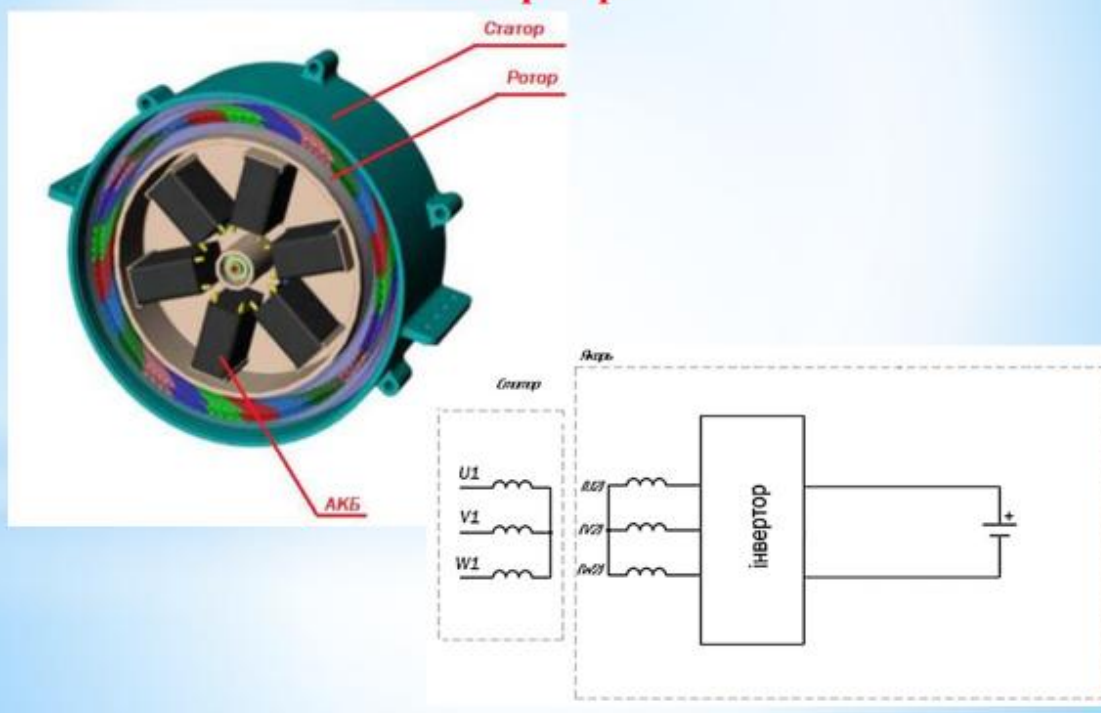
Безщітковий пристрій, що збуджує



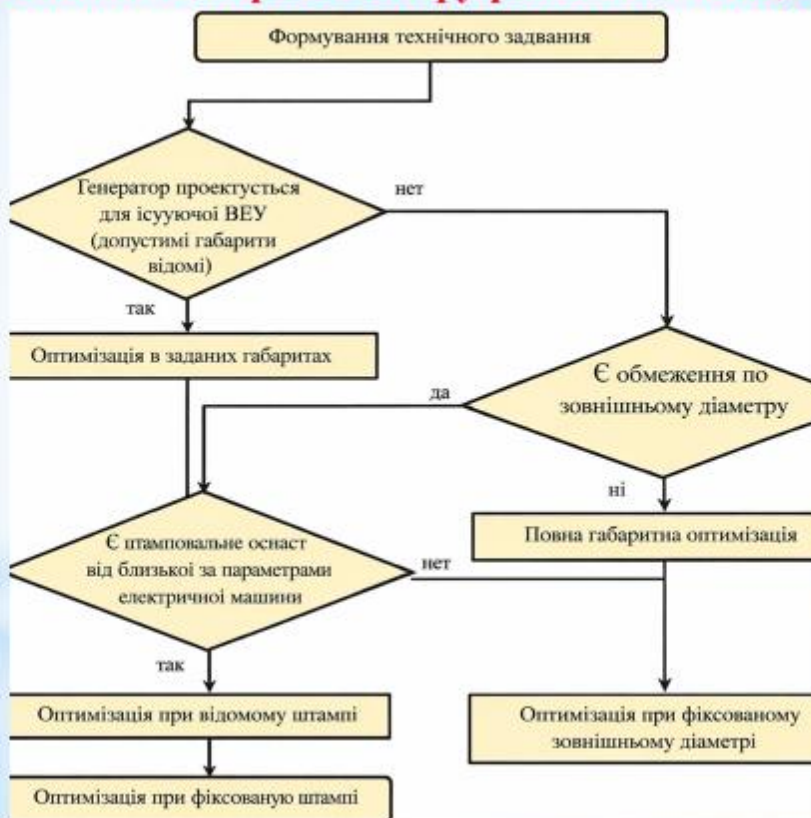
Трансформатора, що обертається



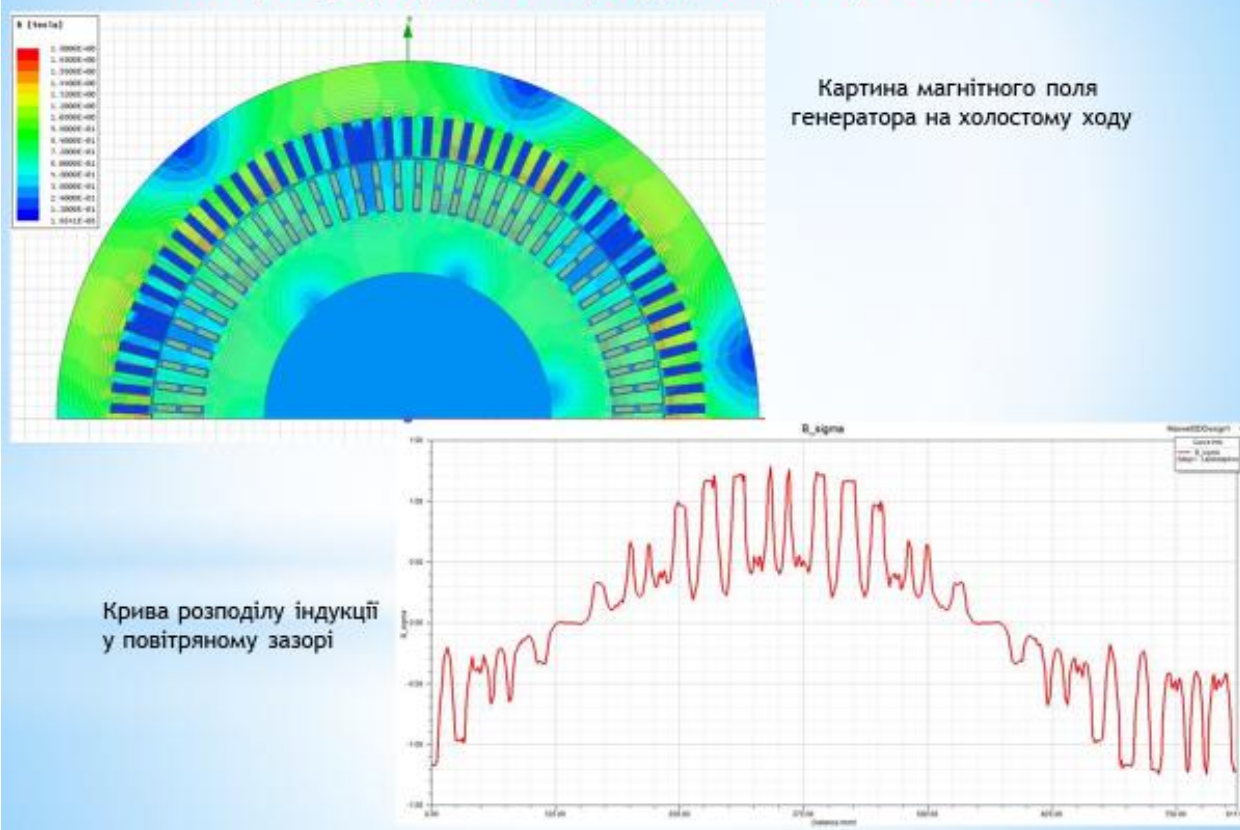
Використання акумуляторної батареї для безконтактного живлення ланцюга ротора асинхронізованого синхронного генератора



Загальний алгоритм вибору рівня оптимізації



Аналіз електромагнітного стану асинхронізованого синхронного генератора у програмному середовищі Ansys Electronics



Висновки по роботі

1. У роботі виконано комплексне дослідження асинхронізованих синхронних генераторів, які широко застосовуються у складі вітроенергетичних установок. Отримані результати дозволили суттєво розвинути теоретичні та методичні положення, що належать до проектування електричних машин цього класу.
2. Для реалізації безконтактного струмопідведення до роторного ланцюга у тихохідних вітроенергетичних установках з вертикальною віссю обертання запропоновано використовувати акумуляторну батарею, яка одночасно виконує функцію накопичувача енергії.
3. Розроблено математичну модель, призначену для визначення гранично допустимих габаритів ротора. За її допомогою проведено електромагнітного розрахунку асинхронізованого синхронного генератора, орієнтовану на оптимізацію геометрії активних частин машини.
4. Проаналізовані питання охорони праці при експлуатації асинхронізованих синхронних генераторів.