

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

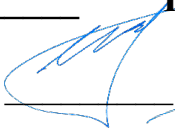
до дипломного проєкту (роботи)

бакалавра

на тему:

**«Вентильний індукторний вітрогенератор потужністю 130 кВт з
конденсаторним збудженням»**

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

	К.А. Данилюк
Керівник	 О.Б. Єгоров
Рецензент	 М.Л. Глєбова

Харків - 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

ННІ Енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури

Кафедра Альтернативної електроенергетики та електротехніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень Бакалавр

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

завідувач кафедри АЕЕ



доц. **О.Б. Єгоров**

“ 15 ” 06 2026 року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНТУ

Данилюку Кирилу Андрійовичу

1. Тема проєкту: «Вентильний індукторний вітрогенератор потужністю 130 кВт з конденсаторним збудженням»

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, характеристики постійних магнітів, ДСТУ 2843-94, ДСТУ 3440-96 Системи енергетичні, Правила улаштування електроустановок, Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Аналіз конструкцій та систем збудження генераторів, Принцип роботи генератора індукторного з конденсаторним збудженням, Методика проектування вентильного індукторного генератора з конденсаторним збудженням, Моделювання статичного магнітного поля електричної машини, Охорона праці.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
1) Цілі та завдання проектування.

2) Електричні генератори, що застосовуються в автономних енергетичних установках

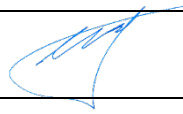
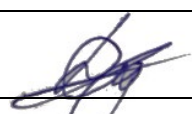
3) Асинхронні генератори з конденсаторним збудженням

4) Вентильні індукторні машини з самозбудженням.

5) Вентильний індукторний генератор із конденсаторним збудженням

6) Моделювання статичного магнітного поля електричної машини

6. Консультанти розділів проєкту

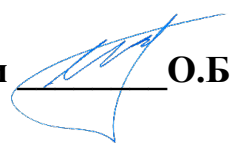
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розрахункова частина	Єгоров О.Б., доц. каф. АЕЕ		
Охорона праці	Серіков Я.О., доц. каф. ОП та БЖД		

7. Дата видачі завдання 25 травня 2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	2	3	4
1	Аналіз конструкцій та систем збудження генераторів	25.05.2026-30.05. 2026	
2	Принцип роботи генератора індукторного з конденсаторним збудженням, Методика проектування вентильного індукторного генератора з конденсаторним збудженням	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  К.А. Данилюк

Керівник роботи  О.Б. Єгоров

Зміст

Зміст	4
Вступ	5
1. ОСНОВНІ ТИПИ ГЕНЕРАТОРІВ В АВТОНОМНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ	8
1.1. 1.1.Аналіз конструкцій та систем збудження генераторів	8
1.2. Обґрунтування необхідності в нових автономних енергетичних установках	19
2. ВЕНТИЛЬНИЙ ГЕНЕРАТОР ІНДУКТОРНИЙ З КОНДЕНСАТОРНИМ ЗБУДЖЕННЯМ	25
2.1. Принцип роботи генератора індукторного з конденсаторним збудженням	25
2.2. Математичне опис електромагнітних процесів вентильного генератора індукторного з конденсаторним збудженням	32
3. КОМП'ЮТЕРНЕ МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	36
3.1. Методика проектування вентильного індукторного генератора з конденсаторним збудженням.....	36
3.2. Математичне моделювання за допомогою методу кінцевих елементів	42
3.3. Математична модель ВІГ КЗ у ANSYS	47
3.4. Моделювання статичного магнітного поля електричної машини	54
3.5. Моделювання нестационарного режиму електротехнічної системи.....	56
4. ОХОРОНА ПРАЦІ	64
ВИСНОВКИ	76
Список літератури	77
ДОДАТКИ.....	79

ВСТУП

Вітрогенераторна установка включає комплекс функціонально взаємопов'язаних елементів, що забезпечують перетворення енергії вітрового потоку в електричну енергію. Привідний механізм установки, як правило, реалізується у вигляді вітроколеса, яке здійснює перетворення кінетичної енергії повітряного потоку в механічну енергію обертального руху.

Механічний перетворювач являє собою механічну передачу, зокрема ремінну або зубчасту. В окремих конструктивних виконаннях застосування механічної передачі не передбачається: ротор генератора розміщується на одному валу з приводним механізмом або з'єднується з ним за допомогою пружної муфти. Таке технічне рішення сприяє покращенню експлуатаційних характеристик установки, підвищенню її надійності та довговічності, а також зниженню витрат на технічне обслуговування.

Електромеханічний перетворювач енергії представлений електричним генератором, який функціонує спільно з електричним перетворювачем — силовим інвертором та/або випрямлячем. Основним призначенням зазначеного вузла є приведення параметрів вихідної напруги у відповідність до вимог навантаження, а також регулювання збудження для забезпечення необхідних вихідних характеристик електроенергії.

Інформаційний перетворювач забезпечує узгодження сигналів, що надходять від датчиків, із форматом, придатним для подальшої обробки системою автоматичного управління. Система автоматичного управління формує керувальні впливи залежно від режимів та умов експлуатації генераторної установки, забезпечуючи стабільність її роботи та підтримання необхідних параметрів електроенергії.

У структурі вітрогенераторної установки доцільно виділити два основні канали: силовий та інформаційний. Силовий канал забезпечує передачу механічної енергії від приводного механізму через механічний перетворювач, якщо його наявність передбачена конструкцією, до валу генератора, а також

передачу виробленої електричної енергії від генератора до навантаження.

Інформаційний канал призначений для обміну даними між окремими елементами системи та зовнішніми пристроями, а також для передачі керувальних сигналів до силового інвертора і приводного механізму.

Як електромеханічні перетворювачі енергії у вітроенергетичних установках застосовуються різні типи електричних генераторів. Їх вибір визначається вимогами до вихідних характеристик, умовами експлуатації, конструктивними особливостями та економічною доцільністю. У складі вітрогенераторних установок переважно використовуються добре досліджені класичні електричні машини, зокрема генератори постійного струму, синхронні генератори з ключовоподібним ротором, синхронні генератори з контактними кільцями, безконтактні синхронні машини з обертовим випрямлячем, синхронні генератори з постійними магнітами, а також асинхронні генератори.

Електричні машини, що застосовуються в автономних енергетичних установках, можуть бути класифіковані відповідно до принципу дії, наявності обмотки збудження, постійних магнітів та щітково-контактного вузла. Класифікація таких електричних машин наведена на рисунку 1.1.

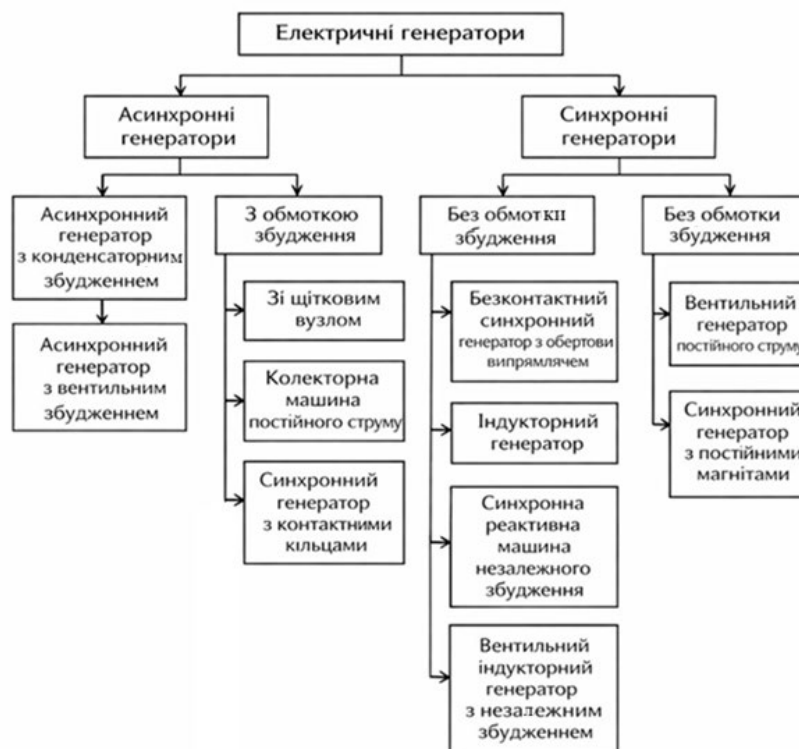


Рисунок 1.1 – Класифікація електричних генераторів у складі вітрогенераторів

Машини постійного струму за своєю суттю можна розглядати як різновид синхронних машин, оснащених пристроями, що комутують. Залежно від типу комутатора вони поділяються на колекторні та вентильні. Колекторні машини конструктивно виконані у вигляді якоря, що обертається з щітково-колекторним вузлом і нерухомими полюсами індуктора [15].

Безконтактні вентильні генератори постійного струму, навпаки, мають нерухомі обмотки якоря і збудження, тоді як полюси, що обертаються, виконуються на основі постійних магнітів. Зазвичай, такі машини комплектуються напівпровідниковим комутатором [16]. Регулювання генераторів цього типу, побудованих з урахуванням машин постійного струму, здійснюється впливом на керований комутатор [7–10].

До переваг колекторних машин постійного струму відносяться можливість роботи в широкому діапазоні швидкостей і практично лінійний характер регульовальних характеристик, що забезпечує простоту налаштування і зручність управління. Однак їх суттєвим недоліком є наявність механічного щітково-колекторного вузла. Саме цей вузол знижує довговічність та надійність машини, ускладнює її конструкцію та технологію виготовлення, підвищує трудомісткість обслуговування, обмежує допустиму частоту обертання, збільшує вартість та погіршує масогабаритні показники. Частина зазначених недоліків може бути зменшена за рахунок застосування сучасних матеріалів та комплектуючих, зокрема композитних та порошкових магнітопровідних матеріалів, а також мідно-графітових колекторів [12].

Глава 1. ОСНОВНІ ТИПИ ГЕНЕРАТОРІВ В АВТОНОМНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ

1.1. Аналіз конструкцій та систем збудження генераторів

Вентильні генератори постійного струму, як правило, складаються із синхронного генератора зі збудженням від постійних магнітів та керованого багатофазного тиристорного мостового випрямляча. Такі генератори набули широкого застосування в автономних системах електропостачання літальних апаратів, самохідної техніки, залізничного транспорту та морських суден. Це пояснюється відсутністю недоліків, характерних для машин із механічним щітково-колекторним вузлом, що досягається завдяки використанню постійних магнітів у системі збудження. За збереження високих експлуатаційних характеристик вентильні генератори відзначаються покращеними масогабаритними показниками та здатністю працювати у широкому діапазоні частот обертання.

Разом із тим застосування постійних магнітів, особливо виготовлених із рідкісноземельних матеріалів, супроводжується низкою технічних та економічних обмежень. Такі магніти характеризуються підвищеною крихкістю, складністю монтажу, обмеженнями за допустимою робочою температурою, а також значною вартістю. Крім того, у процесі експлуатації спостерігаються додаткові втрати енергії, що негативно впливає на ефективність роботи електричної машини. Зазначені фактори зумовлюють підвищення трудомісткості виготовлення генератора та збільшення його загальної вартості. Порівняно з колекторними генераторами постійного струму вентильні генератори також характеризуються більшими пульсаціями вихідної напруги.

Необхідно враховувати і недоліки тиристорних перетворювачів, які є добре відомими в електротехнічній практиці. До основних із них належать складність структури системи керування, а також невизначеність вибору точки відліку кута керування тиристорами за умов зміни частоти обертання

приводного валу [13, 15].

Усунення недоліків, пов'язаних із використанням тиристорних перетворювачів, можливе шляхом переходу до імпульсних стабілізаторів напруги. Такі пристрої, як правило, містять некерований випрямляч на основі діодного мосту та один силовий ключ, найчастіше IGBT-транзистор. Керування силовим ключем здійснюється методом широтно-імпульсної модуляції, що забезпечує покращення якості вихідної напруги, підвищення енергетичної ефективності та спрощення системи керування. Схему такого технічного рішення наведено на рисунку 1.1. [6-9].

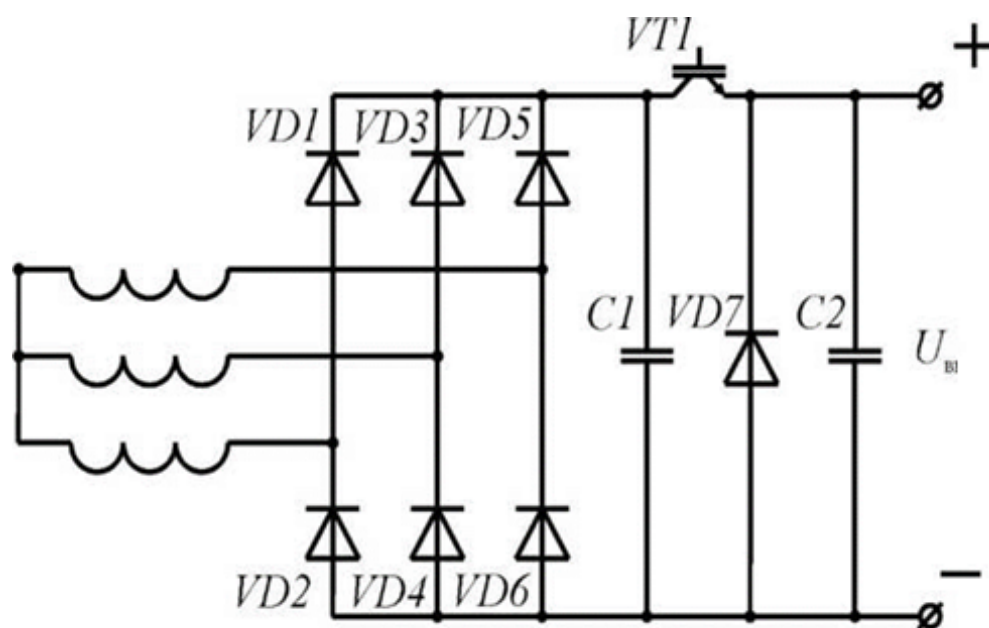


Рисунок 1.1 - Вентильний генератор з імпульсним комутатором

Синхронні генератори з контактними кільцями на сьогодні є одними з найбільш поширених джерел електричної енергії в автономних та стаціонарних енергетичних установках. Їх широке застосування зумовлене відносною простотою конструкції, задовільними масогабаритними показниками та можливістю ефективного регулювання магнітного потоку [10]. Особливо значного поширення такі електричні машини набули на залізничному транспорті.

Живлення обмотки збудження здійснюється через контактні кільця, розташовані на валу ротора. Оскільки потужність кола збудження є незначною

та, як правило, становить близько 0,5–2 % від номінальної потужності генератора, підведення струму до обмотки не створює суттєвих технічних труднощів. Водночас використання контактних кілець і щіткового вузла потребує регулярного технічного обслуговування, ускладнює технологію виготовлення машини та сприяє підвищенню рівня електромагнітних і радіочастотних перешкод.

У явно-полюсних синхронних машинах конструкція ротора дозволяє розміщувати значну кількість міді у зосереджених обмотках збудження, що сприяє зменшенню струмового навантаження на обмотку. Крім того, така конструкція забезпечує покращені умови вентиляції внутрішнього об'єму електричної машини, а наявність демпферної клітки зменшує вплив магнітної асиметрії ротора. Разом із тим явно-полюсні синхронні генератори з контактними кільцями не призначені для роботи за високих частот обертання, оскільки кріплення обмоток характеризується обмеженою механічною міцністю.

Неявнополюсні синхронні машини, навпаки, відзначаються підвищеною жорсткістю та механічною міцністю ротора, що дозволяє використовувати їх при високих швидкостях обертання. Проте вони поступаються явно-полюсним машинам за умовами охолодження та характеризуються більшою трудомісткістю встановлення демпферної клітки [4].

До недоліків синхронних генераторів із контактними кільцями належить також можливість надмірного збільшення струму збудження при різкому зростанні навантаження, що потенційно може призвести до пошкодження електричної машини. Крім того, для забезпечення збудження необхідне зовнішнє джерело живлення, що ускладнює конструкцію автономної енергетичної установки та призводить до збільшення її масогабаритних показників [4].

Синхронні генератори з ключовоподібним ротором набули широкого застосування у системах електропостачання бортових мереж транспортних засобів. Такі машини можуть виконуватися як у колекторному варіанті з електромагнітним збудженням, коли обмотка якоря розташовується на статорі, а обмотка збудження — на роторі та підключається через контактні кільця, так і у

безконтактному виконанні із застосуванням постійних магнітів.

Генератори з електромагнітним збудженням отримали широке поширення в автомобілебудуванні, тоді як безконтактні синхронні генератори з постійними магнітами активно використовуються в авіаційній техніці. Безконтактні синхронні генератори з ключоподібним ротором ефективно працюють при високих частотах обертання, що перевищують 10000 об/хв [13], завдяки високій надійності та здатності функціонувати в жорстких умовах експлуатації. Це забезпечується, зокрема, міцним кріпленням обмотки збудження та підвищеною механічною стійкістю конструкції.

Слід зазначити, що більшість сучасних автомобільних генераторів належить саме до цього типу синхронних машин. Вони забезпечують живлення бортової мережі транспортного засобу та заряджання акумуляторної батареї. Силова схема таких генераторів, як правило, реалізується за схемою Ларіонова з додатковими діодами загальної точки.

Синхронні генератори з ключоподібним ротором характеризуються значною різноманітністю конструктивних виконань. Зокрема, розрізняють машини із зовнішньо- та внутрішньозамкненим магнітним потоком, з одно- та двостороннім збудженням, торцеві, консольні та інші конструкції [44, 45]. Основною перевагою таких генераторів є можливість формування багатополусної магнітної системи із застосуванням лише однієї котушки збудження або одного постійного магніту. Це забезпечує підвищений коефіцієнт заповнення об'єму ротора обмоткою збудження або магнітом, що позитивно впливає на масогабаритні показники електричної машини.

Разом із тим генератори з ключоподібним ротором мають і низку конструктивних недоліків. До них належать складність конструкції ротора, наявність двох повітряних зазорів, значні потоки розсіювання, асиметрія кривої магнітної індукції, а також підвищені значення індуктивного опору, що негативно позначається на зовнішніх характеристиках генератора. У випадку електромагнітного збудження додатковим недоліком є наявність щітково-контактного вузла з характерними для нього експлуатаційними проблемами [6–

8].

Безконтактні синхронні машини з обертовим випрямлячем набули широкого поширення в авіаційній та суднобудівній техніці. Їх особливістю є використання спеціального пристрою — збудника, який забезпечує безконтактну передачу енергії від статора до ротора електромагнітним способом [9]. Оскільки таким способом можлива передача лише змінного струму, на роторі додатково встановлюється випрямляч.

Конструкція таких машин ускладнюється наявністю на валу ротора двох додаткових малопотужних електричних машин — збудника та передзбудника, необхідних для реалізації режиму самозбудження. Як передзбудник зазвичай застосовується машина з постійними магнітами [10]. У ролі збудника можуть використовуватися трансформатор, що обертається, асинхронний або синхронний генератор.

Трансформатор, що обертається, забезпечує передачу енергії незалежно від частоти обертання ротора, проте потребує проектування первинного кола на повну потужність системи збудження. Асинхронний збудник характеризується технологічністю, конструктивною простотою та малою сталою часу, що позитивно впливає на швидкодію системи регулювання. У генераторах, призначених для роботи при високих швидкостях обертання, зокрема в авіаційних і транспортних енергетичних установках, переважно застосовують синхронні збудники [11, 12]. Такі машини мають сприятливі масогабаритні показники, високу перевантажувальну здатність та ефективні регулювальні характеристики. Водночас їх недоліки пов'язані з наявністю обертового випрямляча, який знижує загальну надійність системи та обмежує допустиму робочу температуру рівнем, визначеним термостійкістю напівпровідникових елементів [3].

Синхронні генератори з постійними магнітами широко застосовуються на транспорті, зокрема в авіаційній техніці, гібридних автомобілях, самохідних машинах та на залізничному транспорті [4]. Їх поширення обумовлене високими масогабаритними показниками, значним коефіцієнтом корисної дії та високим

коефіцієнтом потужності [5–7]. Для автомобільного транспорту особливий інтерес становлять машини з роторами колекторного типу, у яких постійні магніти розташовуються паралельно магнітному потоку.

Основним недоліком генераторів із постійними магнітами є відсутність можливості оперативного регулювання магнітного потоку та вихідної напруги. Це призводить до підвищення пожежонебезпеки в аварійних режимах, зокрема при коротких замиканнях, ускладнює процес стабілізації напруги та потребує застосування силових перетворювачів підвищеної потужності, оскільки в окремих режимах роботи можливе значне зростання електрорушійної сили [8].

Додатковою проблемою є асиметрія форми магнітної індукції у повітряному зазорі, спричинена розкидом параметрів постійних магнітів. Висококоерцитивні магніти характеризуються складністю виготовлення, значною вартістю, наявністю власних втрат енергії та обмеженням допустимої робочої температури електричної машини [13].

Асинхронні генератори з конденсаторним збудженням доцільно використовувати в системах із високошвидкісними приводами, зокрема в авіаційній техніці [8]. Це пояснюється тим, що для переведення асинхронної машини у генераторний режим необхідно забезпечити таку частоту обертання ротора, яка перевищуватиме синхронну частоту обертання магнітного поля статора. При переході до режиму роботи з негативним ковзанням за рахунок залишкового намагнічування в машині індукується електрорушійна сила, яка створює струм у конденсаторах, як показано на рисунку 1.3, а. У результаті цього відбувається підсилення початкового магнітного потоку, після чого машина переходить у режим генерації електричної енергії [9–11].

Аналогічним чином може бути реалізоване вентильне збудження асинхронного генератора, підключеного до симетричного напівмостового перетворювача, в якому силові ключі відкриваються відповідно до визначеного положення ротора, що наведено на рисунку 1.3 б. [5].

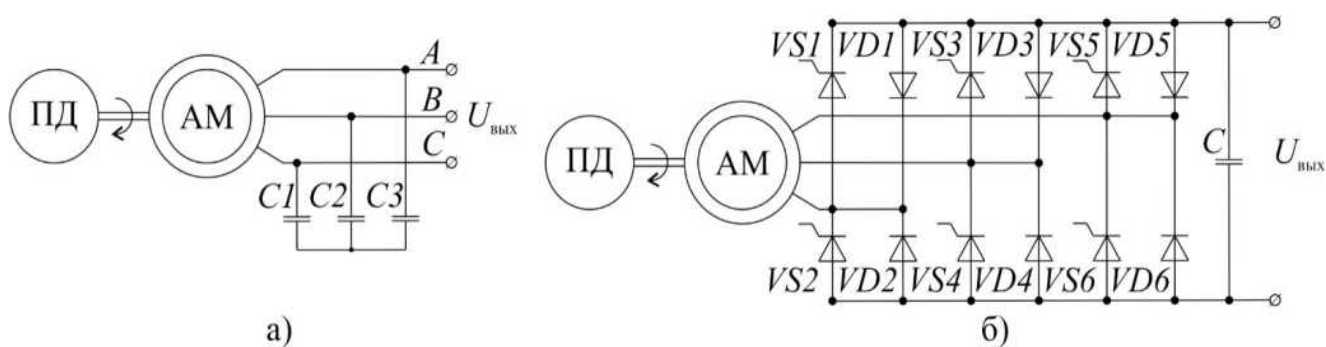


Рисунок 1.2 - а) асинхронний генератор з конденсаторним збудженням,
б) асинхронний генератор з вентильним збудженням

Асинхронні генератори характеризуються високою надійністю, конструктивною простотою, технологічністю виготовлення, задовільними масогабаритними показниками та відносно невисокою вартістю.

Разом із тим асинхронним генераторам притаманний ряд недоліків. До основних із них належать складність стабілізації вихідної напруги, статичний характер збудження, необхідність використання зовнішнього джерела реактивної потужності, можливість роботи у генераторному режимі лише за частоти обертання ротора, що перевищує синхронну, а також значні втрати енергії в роторі [14].

Індукторний генератор являє собою синхронну електричну машину змінного струму, в якій магнітний потік, що індукуює змінну електрорушійну силу, створюється нерухомою обмоткою збудження, розташованою у статорі. Зміна величини магнітного потоку обумовлена зубцевими пульсаціями, при цьому його напрямок у будь-якій точці розточування якоря залишається незмінним. Залежно від характеру зміни напрямку магнітного потоку в зубцях ротора індукторні генератори поділяються на однойменно-полюсні та різнойменно-полюсні [6].

В однойменно-полюсних індукторних генераторах пакети електротехнічної сталі статора та ротора з'єднуються між собою магнітопроводами. Обмотка збудження виконується у вигляді зосередженої кільцевої котушки, розташованої на статорі між пакетами сталі та підключеної до джерела постійного струму. Під дією струму збудження створюється

магнітний потік, який замикається через магнітопровід і формує в пакетах ротора та статора полюси постійної полярності.

Для запобігання наведенню в обмотці збудження високочастотної електрорушійної сили необхідно забезпечити сталість магнітного потоку та магнітного опору вздовж усього шляху магнітних ліній. Це досягається шляхом зміщення одного пакета ротора відносно іншого на половину зубцевого поділу.

У різнойменно-полюсних індукторних генераторах використовується один пакет магнітопроводу. Обмотка збудження виконується зосередженою та розміщується у великих пазах статора, тоді як обмотка змінного струму, конструктивно подібна до обмотки однойменно-полюсних генераторів, укладається в малі пази статора. Зубцеві поділи статора і ротора вибираються таким чином, щоб сумарний магнітний опір на пару полюсів збудження та відповідний магнітний потік, зчеплений з обмоткою збудження, залишалися незмінними під час обертання ротора. Завдяки цьому в обмотці збудження не індукується високочастотна електрорушійна сила.

Індукторні генератори знаходять застосування у складі автономних зварювальних установок [8]. До їх основних переваг належать простота конструкції, відсутність ковзних контактів, відносно невисока вартість, технологічність виготовлення та порівняна простота регулювання, що забезпечується керованим збудженням [2]. Ротори таких машин характеризуються високою механічною міцністю та незначними втратами енергії [80].

Разом із тим індукторні генератори мають і певні недоліки. Зокрема, для них характерне недостатньо ефективне використання об'єму активної частини машини, що призводить до відносно невисоких масогабаритних показників [12]. Додатковою проблемою є ускладнений тепловідвід від обмотки збудження, що обумовлено малою площею її контакту зі статором [3].

Синхронні реактивні машини незалежного збудження належать до відносно простих електричних машин. Конструкція їх статора близька до конструкції статора асинхронного двигуна з одношаровою обмоткою,

виконаною на повний крок, тоді як ротор не містить ані обмотки збудження, ані постійних магнітів [4]. Завдяки простоті конструкції, високій надійності та задовільним експлуатаційним характеристикам такі машини ефективно застосовуються як тягові електродвигуни [5].

У генераторному режимі принцип дії синхронної реактивної машини є близьким до принципу роботи різнойменно-полюсного індукторного генератора. У цьому випадку частина статорних обмоток виконує функцію обмотки збудження, тоді як інша частина використовується як якірні обмотка. Наявність окремого каналу керування полем збудження забезпечує широкі можливості регулювання та дозволяє підтримувати стабільне значення вихідної напруги в широкому діапазоні зміни навантаження і частоти обертання валу.

До основних переваг реактивних машин належать безконтактне виконання, висока механічна міцність ротора, незначні втрати енергії в роторі, а також відносно невисока вартість виготовлення [8]. Крім того, відсутність обмотки збудження та постійних магнітів у роторі сприяє підвищенню надійності конструкції та спрощенню технології виробництва.

Основним недоліком синхронних реактивних машин є необхідність використання складної конструкції ротора з немагнітними вставками, оскільки без їх застосування складно забезпечити високі питомі енергетичні та масогабаритні показники [10].

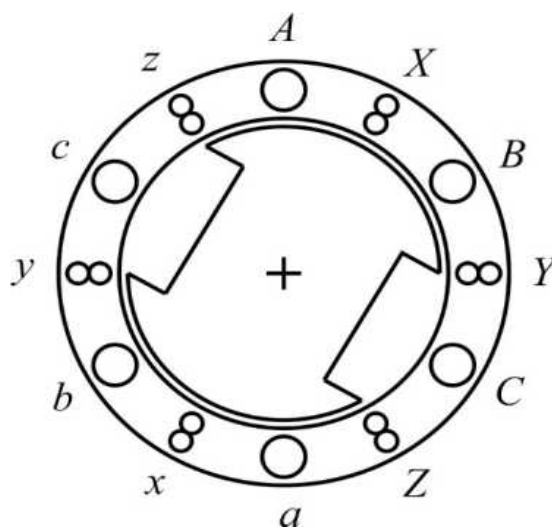


Рисунок 1.4 - Переріз синхронної реактивної машини незалежного збудження:

A, B, C, a, b, c - якірні обмотки, X, Y, Z, x, y, z - обмотки збудження

Вентильні індукторні машини з незалежним збудженням є різновидом однойменно-полюсних індукторних машин з аксіальним збудженням [1]. У режимі двигуна за своїми характеристиками вони наближені до синхронних машин з електромагнітним збудженням від ротора та наявністю ковзних контактів. Даним машинам властиві основні переваги індукторних систем, зокрема відсутність щітково-контактного вузла, відносна простота конструкції та невисока вартість виготовлення.

Оскільки ротор таких машин не містить обмоток і постійних магнітів та не піддається процесам перемагнічування, втрати енергії в роторній частині є суттєво меншими. Наявність керованого електромагнітного збудження забезпечує можливість підтримання стабільної вихідної напруги в широкому діапазоні зміни швидкості обертання та навантаження.

Разом із тим вентильні індукторні машини з незалежним збудженням мають і певні недоліки. Одним із них є складність реалізації бездатчикових систем керування, що обумовлено відсутністю вираженої різниці індуктивностей за осями d та q [2]. Крім того, виникає необхідність застосування спеціальних конструктивних заходів для запобігання замиканню магнітного потоку паразитними шляхами, зокрема через підшипникові щити, оскільки такі струми можуть спричиняти прискорене зношування та вихід з ладу підшипникових вузлів [93]. Додаткові труднощі пов'язані з розміщенням обмотки збудження та забезпеченням динамічного балансування ротора [13].

Вентильні індукторні машини із самозбудженням добре зарекомендували себе як тягові електродвигуни [10]. За принципом дії вони належать до синхронних реактивних машин з вентильним керуванням. Їх функціонування можливе лише у складі інтегрованої системи, що включає електричну машину, силовий інвертор та електронний блок керування [16, 17].

Принцип роботи таких машин аналогічний принципу дії інших індукторних генераторів. Їх характерною особливістю є те, що функції якорної обмотки та обмотки збудження виконуються одними й тими самими обмотками у різні часові інтервали. Усі обмотки розташовуються на статорі у вигляді

зосереджених котушок. Концентричні обмотки, що охоплюють лише один полюс статора, мають меншу довжину лобових частин порівняно з класичними електричними машинами. Це сприяє покращенню масогабаритних характеристик, зменшенню витрат міді та ізоляційних матеріалів, а також підвищенню технологічності виготовлення.

Статор і ротор таких машин виготовляються із шихтованої електротехнічної сталі, а також можуть виконуватися із композитних або порошкових матеріалів [6]. Як і в інших реактивних машинах, ротор не містить ані обмоток, ані постійних магнітів, що забезпечує високу надійність, широкий діапазон допустимих робочих температур та порівняно низьку вартість виготовлення [3].

Вентильні індукторні машини становлять значний інтерес як тягові генератори [11]. Це обумовлено такими їх перевагами, як безконтактне виконання, висока механічна жорсткість ротора, відсутність обмоток у роторній частині, незначні втрати енергії в роторі, широкий діапазон робочих температур, а також відсутність реактивного та залишкового моментів при знеструмлених обмотках [1–3].

При роботі у генераторному режимі кероване електромагнітне збудження забезпечує можливість отримання стабілізованої вихідної напруги в широкому діапазоні зміни частоти обертання валу та навантаження. Це є особливо важливим у системах спільної роботи генератора з двигуном внутрішнього згоряння [1].

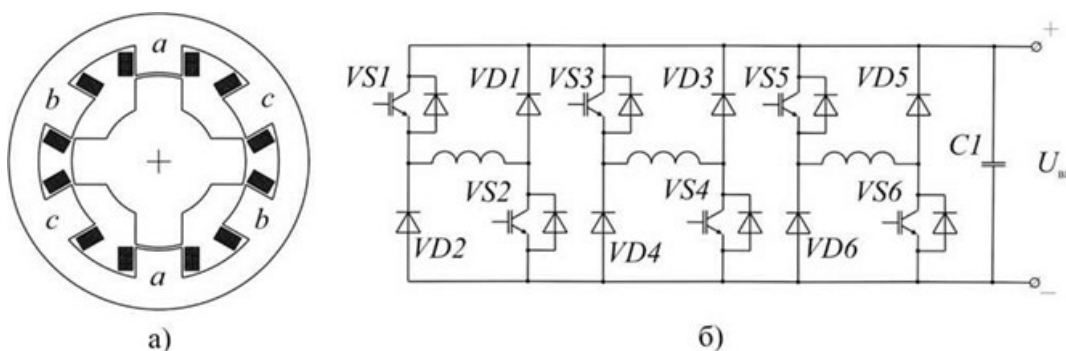


Рисунок 1.5 - а) переріз трифазного вентильного генератора індукторного 6/4, б) силова електрична схема трифазного вентильного індукторного генератора

Однак подібні електричні машини мають і низку суттєвих недоліків, що обмежують масштаби їх практичного застосування. Насамперед до них належить необхідність використання спеціалізованого інвертора, побудованого за схемою асиметричного напівмостового перетворювача. Порівняно з інверторами, які застосовуються у класичних електричних машинах, такі перетворювачі характеризуються більшими габаритами, що обумовлено обмеженим поширенням спеціалізованої силової елементної бази. Додатковим недоліком є збільшена кількість провідників, необхідних для підключення електричної машини, порівняно з традиційними конструктивними рішеннями.

Суттєвою проблемою також є значні пульсації електромагнітного моменту при невеликій кількості фаз, що зумовлено подвійною зубчастістю магнітної системи. Це, у свою чергу, призводить до підвищеного рівня шуму та вібрації під час роботи машини. Крім того, для забезпечення ефективного функціонування таких систем необхідно підтримувати мінімально можливий повітряний зазор між статором і ротором.

Різко виражений несинусоїдальний характер зміни струмів і напруг обумовлює необхідність застосування фільтрувальних пристроїв для забезпечення відповідності параметрів електричної енергії вимогам споживачів. Також слід зазначити, що для таких машин характерні нелінійні регулювальні характеристики [5].

Для досягнення високої енергетичної ефективності та необхідної якості регулювання необхідно здійснювати контроль форми струмів у фазних обмотках, що потребує використання значної кількості спеціалізованих датчиків. До них належать датчики струму за кількістю фаз, датчик вихідної напруги, а також датчик положення ротора.

Крім того, подвійна зубчастість магнітної системи призводить до збільшення витрат електротехнічної сталі при виготовленні таких електричних машин, що негативно впливає на їх матеріаломісткість та собівартість [9].

1.2. Обґрунтування необхідності у нових вітрогенераторах

Кожен із розглянутих типів генераторів характеризується певним поєднанням переваг і недоліків, тому неможливо однозначно визначити електричну машину, яка б мала безумовні переваги над іншими в усіх режимах та умовах експлуатації. Вибір типу генератора для автономної вітроенергетичної установки визначається сукупністю технічних, експлуатаційних та економічних факторів.

Діапазон потужностей автономних вітроенергетичних установок є достатньо широким і охоплює значення від десятків до тисяч кіловат. Первинними перетворювачами енергії в таких системах, як правило, виступають вітродвигуни, для яких характерні певні оптимальні частоти обертання, за яких досягаються максимальні значення питомої потужності та енергетичної ефективності. Розвиток сучасних вітрогенераторних установок безпосередньо пов'язаний із постійним підвищенням вимог до їх характеристик, що обумовлено ускладненням умов експлуатації та розширенням сфер застосування. До таких установок висувається ряд суттєвих вимог, серед яких важливе місце займають стійкість систем регулювання напруги при широких змінах навантаження та швидкості обертання, можливість ефективного регулювання вихідної напруги в широкому діапазоні режимів роботи, забезпечення високої стабільності напруги при несиметричних навантаженнях, різких підключеннях або відключеннях споживачів, а також мінімальний рівень пульсацій вихідної напруги.

Крім того, важливими вимогами є відповідність якості виробленої електроенергії нормативним вимогам споживачів, здатність функціонування в умовах значних механічних та теплових впливів, перевантажень за потужністю, а також експлуатації в нейтральних і агресивних середовищах, при підвищеному або зниженому тиску.

Проведений аналіз електричних машин, що застосовуються в автономних енергетичних установках, свідчить про те, що кожен тип генератора поєднує як позитивні властивості, до яких належать простота конструкції, безконтактне виконання, високі питомі та регульовальні характеристики, так і певні недоліки,

зокрема наявність щітково-контактного вузла, складність конструкції, погіршені масогабаритні показники або недостатньо ефективні регульовальні властивості. Водночас вимоги, що висуваються до сучасних автономних енергетичних установок, передбачають необхідність одночасного забезпечення ряду різнорідних і нерідко взаємно суперечливих характеристик.

Недостатня узгодженість окремих вимог суттєво впливає на технологічність і надійність конструкції, а також на масу, габаритні розміри та спеціальні характеристики джерел електроживлення загалом. У зв'язку з цим розвиток сучасних вітроенергетичних установок здійснюється у напрямку комплексного вдосконалення електричних машин, силових електронних перетворювачів та систем автоматичного керування.

З урахуванням сучасного рівня розвитку силової електроніки традиційні вимоги до електричних машин змінного струму, зокрема трифазність та синусоїдальність вихідних величин, вже не завжди розглядаються як обов'язкові. Комплексне проектування електромеханічного перетворювача та силового перетворювача, а в окремих випадках — створення електричної машини безпосередньо під конкретну систему електронного керування, дозволяє забезпечити високі техніко-економічні показники енергетичних установок [2].

У зв'язку з цим особливої актуальності набувають дослідження, спрямовані на створення нових типів електричних машин у поєднанні з сучасними силовими перетворювачами та системами керування. При цьому основною метою є не лише покращення окремих параметрів, а насамперед формування технічних рішень, у яких сукупність основних характеристик буде найбільш раціональною або оптимальною відповідно до обраного критерію ефективності [12].

Електромагнітні та енергетичні характеристики розглянутих типів генераторів значною мірою визначаються вирішенням комплексу взаємопов'язаних конструктивних, технологічних, електромеханічних та теоретичних задач. Тому можливості вдосконалення існуючих конструкцій і усунення виявлених недоліків не можна вважати повністю вичерпаними.

В останні роки виконано значну кількість оригінальних комплексних досліджень і розробок у галузі систем генерування та перетворення електричної енергії, автоматичного керування та регулювання, а також у сфері синхронних генераторів і силових електроприводів. Зокрема, суттєвий розвиток отримали дослідження, пов'язані із синхронними реактивними машинами, вентильними індукторними машинами з незалежним та самозбудженням, вентильними електричними машинами з аксіальним магнітним потоком, а також машинами з поперечним магнітним потоком [9].

Разом із тим розвиток нових конструкцій вітрогенераторів не є завершеним процесом, а, навпаки, формує основу для створення нових типів електротехнічних систем. Значний науковий і практичний інтерес становлять технічні рішення, спрямовані на використання особливостей електромагнітних процесів в електричних машинах з метою спрощення конструкції та принципових схем вітрогенераторних установок. Одним із результатів реалізації такого підходу є створення вітрогенераторних установок на основі вентильного індукторного генератора з конденсаторним збудженням.

У загальному випадку така система, представлена на рисунку 1, включає такі основні елементи: вітроколесо (В), вентильний індукторний генератор (ВІГ), коло конденсаторного збудження (КВ), що складається із шунтувальних діодів та конденсаторів, пусковий пристрій початкового збудження (ПУ), систему керування збудженням (СУ), представлену тиристорами, драйверами керування та обмоткою збудження, силовий випрямляч (СВ), вихідний конденсатор силового випрямляча (С), вимірювальний випрямляч (ВВ), датчик вихідного струму (ДП), мікроконтролер (МК), який забезпечує автономне керування вітрогенераторною установкою, а також енергоспоживачів (ЕП).

Функціонування зазначеної системи базується на узгодженій роботі електромеханічного перетворювача, системи збудження та електронного блоку керування, що забезпечує стабілізацію вихідних параметрів електроенергії та адаптацію режимів роботи установки до змін швидкості вітрового потоку та характеру навантаження.

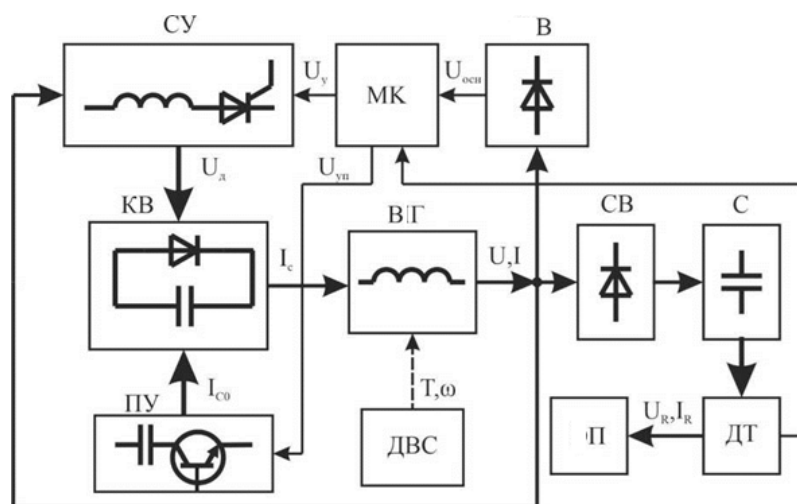


Рисунок 1.6. Структурна схема вітрогенераторів на основі ВІГ КЗ

При обертанні валу вентильного індукторного генератора, що приводиться в рух вітроколесом із заданими моментом T і кутовою швидкістю, початкове збудження генератора здійснюється за допомогою пускового пристрою. Для цього мікроконтролер формує сигнал, що управляє, яким відкриває електронний ключ пускового пристрою. В результаті конденсатор, заздалегідь заряджений від зовнішнього джерела напруги, розряджається через якірні обмотки генератора струмом I_{co} , забезпечуючи початкове збудження машини. Після завершення розряду електронний ключ закривається. Одночасно мікроконтролер підтримує тиристири системи управління у відкритому стані за допомогою подачі сигналів, що управляють, на їх драйвери.

У якірних обмотках генератора виникає струм I , під дією якого додаткових обмотках індукується електрорушійна сила E_d , що забезпечує заряд конденсаторів ланцюга конденсаторного збудження. Надалі, в автономному режимі, при розряді цих конденсаторів та внаслідок зміни ЕРС додаткових обмоток при обертанні ротора, збудження якірних обмоток підтримується струмом I_c . Напруга, що виробляється генератором з конденсаторним збудженням, вимірюється за допомогою вимірювального випрямляча і у вигляді сигналу зворотного зв'язку по напрузі U_{ocn} надходить у мікроконтролер. Після досягнення напругою заданого значення мікроконтролер переходить до

регулювання напруги на обмотках генератора рахунок зміни числа імпульсів струму збудження, формованих протягом встановленого інтервалу часу. Тим самим забезпечується підтримка вихідної напруги на рівні, що відповідає вимогам енергоспоживачів. Датчик струму при цьому може передавати в систему сигнал зворотного зв'язку по струму U_t .

Такий генератор зберігає всі основні переваги, притаманні вентильним індукторним машинам: високий коефіцієнт корисної дії в широкому діапазоні зміни навантаження і швидкості обертання ротора, малі втрати в роторі, широкий діапазон робочих температур, відсутність обмоток і постійних магнітів в обертовій частині, відсутність реакції і залишкового моменту при знеструмленні. низьку вартість, а також застосування концентричних обмоток, що охоплюють один зубець статора. При цьому він позбавлений низки недоліків, характерних для таких машин і пов'язаних з використанням спеціалізованого інвертора, а також зі складною системою керування, що вимагає контролю положення ротора та застосування великої кількості датчиків.

До додаткових переваг даної системи відноситься автоматичне виконання комутації та збудження якірних обмоток, що не вимагає контролю положення ротора та фазних струмів. Істотною перевагою є також незалежність системи від зовнішнього джерела живлення. Додатковим позитивним фактором є невелика кількість витків у додаткових обмотках, що забезпечує зменшення їх габаритних розмірів.

Сукупність перерахованих переваг дозволяє забезпечити високий коефіцієнт корисної дії, сприятливі масогабаритні показники системи, відносну простоту апаратури, що управляє, а також можливість регулювання вихідної напруги в широкому діапазоні.

Водночас система, що розглядається, має і певні недоліки. До них відносяться підвищені струмові навантаження електричної машини, обумовлені протіканням постійної складової струму за якорними обмотками в руховій фазі, а також неможливість роботи в руховому режимі без застосування відповідних електронних засобів управління.

Глава 2. ВЕНТИЛЬНИЙ ІНДУКТОРНИЙ ГЕНЕРАТОР ІЗ КОНДЕНСАТОРНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

2.1. Принцип роботи генератора індукторного з конденсаторним збудженням

Вентильний індукторний генератор із конденсаторним збудженням є різновидом індукторної електричної машини з явно вираженою полюсною магнітною системою, багатофазною силовою обмоткою та додатковою обмоткою, конструктивне виконання яких наведено на рисунку 2.1. Принцип дії такого генератора, як і інших індукторних генераторів, ґрунтується на перетворенні механічної енергії в електричну внаслідок періодичної зміни магнітної провідності магнітного кола під час обертання зубчастого ротора.

Обмотувальна система генератора виконана у вигляді зосереджених котушок, розміщених на полюсах статора. Котушки силової та додаткової обмоток устатковуються на одних і тих самих зубцях статора, що забезпечує їхній електромагнітний зв'язок за трансформаторним принципом. При цьому кількість витків додаткової обмотки є істотно меншою порівняно з кількістю витків силової обмотки. Ротор генератора має пасивне виконання, тобто не містить обмоток або постійних магнітів.

Магнітопроводи статора і ротора можуть виготовлятися як із шихтованих пакетів ізольованих листів електротехнічної сталі, так і з порошкових магнітних матеріалів [3]. Визначення основних геометричних параметрів магнітопроводів статора та ротора може здійснюватися за відомими розрахунковими методиками, які застосовуються під час проєктування вентильних індукторних машин із самозбудженням.

Науково-технічна новизна розглянутої системи зумовлена використанням оригінальних схемотехнічних рішень. Зокрема, фазні обмотки з'єднуються між собою за багатокутною схемою, у якій кількість сторін багатокутника відповідає числу фаз електричної машини [1, 7]. Для формування

струму збудження застосовуються конденсатори, шунтовані діодами. Вони вмикаються послідовно із силовими фазними обмотками та забезпечують заданий напрямок струму збудження в електричному контурі.

Заряджання конденсаторів забезпечується додатковими обмотками, які підключені до них паралельно. Для запобігання протіканню струму збудження через кола додаткових обмоток у ці кола послідовно вмикаються напівпровідникові вентильні елементи — діоди або тиристори. Таке схемне рішення унеможливорює небажане замикання струму збудження, забезпечує керований характер процесу заряджання конденсаторів і сприяє стійкому перебігу електромагнітних процесів у генераторі.

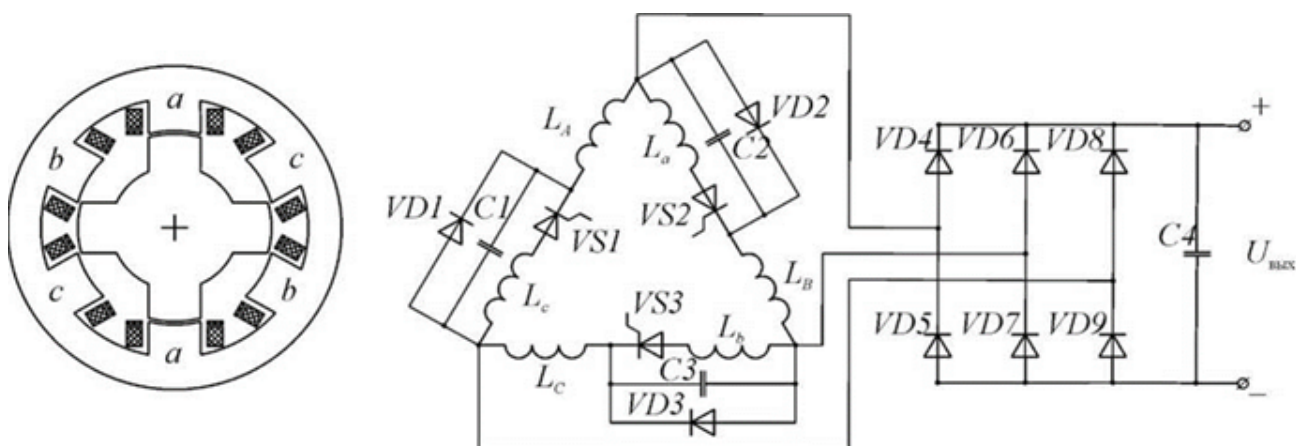


Рисунок 2.1 - а) Магнітна система та б) електрична схема вентильного індукторного генератора з конденсаторним збудженням: а, б, с - фази генератора; VD1-VD3 - шунтуючі діоди; VS1-VS2 - тиристори в ланцюзі збудження; C1-C3 – конденсатори збудження; VD4-VD9 – діоди силового випрямляча; C4 - конденсатор, що згладжує виходу силового випрямляча

Аналіз електромагнітних та електромеханічних перехідних і усталених процесів доцільно виконувати з позицій теорії електричних кіл [5]. Для цього необхідно сформулювати систему рівнянь, яка описує взаємопов'язані електромагнітні, електричні та механічні процеси у генераторі.

Під час складання таких рівнянь слід урахувувати активні опори та індуктивності фазних обмоток, зокрема силових, додаткових і якірних. Зазначені

параметри істотно залежать від миттєвого положення ротора відносно статора, що зумовлено зміною магнітної провідності повітряного проміжку. Крім того, необхідно враховувати ємності конденсаторів, увімкнених у коло збудження, оскільки вони визначають умови формування та підтримання струму збудження.

Під час розгляду електромагнітних процесів у досліджуваній схемі положення полюса ротора відносно полюса статора змінюється за періодичним законом [4, 17], який може бути поданий таким виразом (2.1)

$$L = L_0 + L_m \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{m}(k - 1)\right) \quad (2.1)$$

де L – індуктивність обмотки; L_0 – стала складова індуктивності обмотки; L_m – змінна складова індуктивності обмотки; θ – Кут повороту ротора у електричних градусах; m – кількість фаз електричної машини; k – порядковий номер фази електричної машини;

При цьому постійна та змінна складові індуктивності визначаються відповідно до виразу (2.2):

$$\begin{cases} L_0 = \frac{L_d + L_q}{2} \\ L_m = \frac{L_d - L_q}{2} \end{cases} \quad (2.2)$$

де L_d – індуктивність обмотки у погодженому положенні; L_q – індуктивність обмотки в неузгодженому положенні; аналогічну залежність мають взаємні індуктивності обмоток (2.3) [4]:

$$M = M_0 + M_m \cos\left(\theta + \frac{\pi}{m}(2(k_j + k_{j\pm 1}) - 1)\right) \quad (2.3)$$

де M – взаємна індуктивність обмоток; M_0 – постійна складова взаємної індуктивності обмотки; M_m – змінна складова взаємної індуктивності обмотки; k_j і j – порядкові номери фаз електричної машини.

При цьому постійна та змінні складові взаємної індуктивності розраховуються відповідно до виразу (2.4):

$$\begin{cases} M_0 = \frac{M_d + M_q}{2} \\ M_m = \frac{M_d - M_q}{2} \end{cases} \quad (2.4)$$

де M_d -максимальне значення взаємної індуктивності обмотки; M_q мінімальне значення взаємної індуктивності обмотки.

З урахуванням цих припущень криві зміни струму та індуктивності обмоток матимуть вигляд, представлений відповідно до Рисунку 2.2. Тут L – значення індуктивності фази; L_{min} , L_{max} , L_1 , L_2 - мінімальне, максимальне значення індуктивностей переломних точок; θ – кут повороту ротора. Функція що представлена на Рисунку 2.2 є типовою для вентильних індукторних машин. Для вентильних індукторних машин справедливо, що руховий режим роботи фази відповідає $dL/d\theta > 0$, а генераторному режиму роботи фази відповідає $dL/d\theta < 0$ (рисунок 2.1).

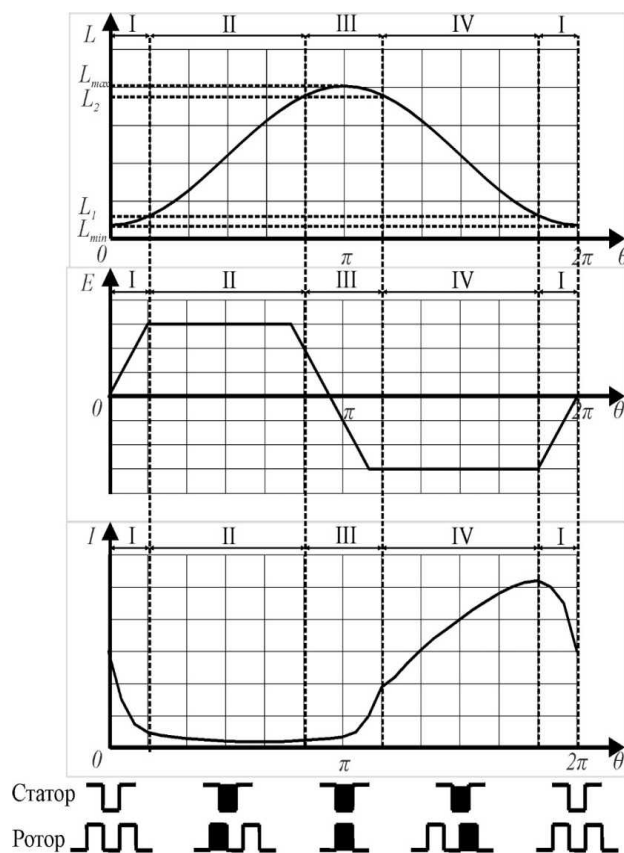


Рисунок 2.2 - Струм, ЕРС та індуктивність обмотки вентильного індукторного генератора з конденсаторним збудженням

- Індуктивність фазної обмотки істотно залежить від взаємного кутового положення ротора і статора, що зумовлено зміною магнітної провідності повітряного проміжку. Під час переміщення ротора від неузгодженого до узгодженого положення магнітна провідність змінюється у широких межах, що безпосередньо впливає на величину потокозчеплення та індуктивності фази. Характер зміни індуктивності можна умовно поділити на чотири характерні ділянки.

- Перша ділянка відповідає області, у якій індуктивність фазної обмотки залишається практично сталою. Вона охоплює інтервал від неузгодженого положення ротора до початку помітної зміни еквівалентного повітряного проміжку. У цьому діапазоні еквівалентний повітряний зазор наближається до максимального значення, тому магнітна провідність магнітного кола та індуктивність обмотки мають мінімальні значення. Наприкінці цієї ділянки еквівалентний повітряний проміжок починає зменшуватися, що спричиняє зростання магнітної провідності та відповідне збільшення індуктивності фазної обмотки.

- Друга ділянка починається з такого кутового положення ротора, за якого виникає взаємне перекриття полюсів статора і ротора. У цей момент відбувається інтенсивне збільшення еквівалентної площі магнітного контакту, яка є пропорційною ступеню перекриття полюсів..

- Третя ділянка характеризується досягненням повного перекриття полюсів статора і ротора. На цьому етапі еквівалентний повітряний проміжок та еквівалентна площа змінюються порівняно незначно. Повне перекриття зубців статора і ротора настає ще до досягнення строго узгодженого положення, що пояснюється відмінністю дугових розмірів полюсів статора та ротора. Надалі еквівалентний повітряний проміжок продовжує зменшуватися, а еквівалентна площа — дещо зростати. Це спричиняє збільшення потокозчеплення, зокрема внаслідок випинання магнітного поля в області бічних поверхонь полюсів. В узгодженому положенні магнітна провідність та індуктивність фазної обмотки досягають максимальних значень.

- Після проходження узгодженого положення подальше обертання ротора супроводжується поступовим зменшенням індуктивності та магнітної провідності. Це зумовлено збільшенням еквівалентного повітряного проміжку та зменшенням ефективної площі перекриття полюсів, унаслідок чого потокозчеплення фазної обмотки починає знижуватися.

- Четверта ділянка відповідає етапу зменшення магнітної провідності та індуктивності фазної обмотки. За характером перебігу цей процес є подібним до зростання зазначених параметрів на другій ділянці, однак відбувається у зворотному напрямі. У зоні часткового перекриття полюсів статора і ротора магнітна провідність та індуктивність змінюються досить інтенсивно, що зумовлено передусім зміною еквівалентної площі перекриття полюсів. Саме на цій ділянці створюються умови для індукування електрорушійної сили та генерування електричної енергії в обмотці.

Після завершення четвертої ділянки робочий цикл знову переходить до першої ділянки. Після виходу полюсів із зони взаємного перекриття індуктивність змінюється порівняно повільно, оскільки основним чинником її зменшення є поступове збільшення еквівалентного повітряного проміжку. Надалі ротор досягає неузгодженого положення відносно статора, за якого еквівалентний повітряний зазор набуває максимального значення, а магнітна провідність та індуктивність фазної обмотки знижуються до мінімального рівня.

Функціонування вентильної індукторної машини, відповідно до її конструктивно-функціональної природи, ґрунтується на комутації фазних обмоток за допомогою електричних вентилів у визначені моменти часу, що відповідають поточному положенню ротора. У традиційному вентильному індукторному приводі комутація фазних обмоток, як правило, здійснюється напівпровідниковим силовим перетворювачем, реалізованим у вигляді системи асиметричних напівмостів. Кількість силових вентилів у такій схемі становить $2N$, де N — кількість фаз електричної машини, як було розглянуто в розділі 1.

У вентильному індукторному генераторі з конденсаторним збудженням комутація фаз має інший характер і реалізується через коло збудження. Її перебіг

визначається зміною трансформаторної електрорушійної сили, що індукується в додаткових обмотках під час зміни магнітного стану машини [1].

Струм силових обмоток містить постійну складову, однак її величина є недостатньою для забезпечення стійкого процесу генерування електричної енергії. Тому для стабілізації режиму генерації необхідним є формування додаткового струму збудження, що забезпечується відповідною схемою конденсаторного збудження. Для забезпечення безперервної генерації необхідно в певні моменти часу подавати імпульси струму досить високої енергії від джерела струму, а саме тоді, коли для відповідної фази виконується умова $dL/d\theta < 0$. У вентильному індукторному генераторі з конденсаторним збудженням такі імпульси формуються конденсаторами, підключеними.

У ті інтервали часу, коли фаза знаходиться в генераторному режимі ($dL/d\theta < 0$), напруга на конденсаторах дорівнює напрузі додаткової обмотки даної фази за винятком падіння напруги на електричному вентилі, яким у даному випадку є діод. Заряд конденсатора відбувається в період наростання генерованої фазою електрорушійної сили. Розряд конденсатора здійснюється в момент припинення генерації даною фазою, тобто при зниженні напруги на додатковій обмотці і, при досягненні неузгодженого положення зубців статора і ротора для даної фази.

Зазначена особливість має важливе практичне значення при побудові системи керування генератором або випрямлячем тиристора, оскільки дозволяє з високою точністю визначати положення ротора. Точність дискретизації при цьому прямо пропорційна числу фаз m і числу пар полюсів $2p$. У ті моменти часу, коли фаза знаходиться поза режимом генерації, конденсатор шунтується паралельно до включеного діода. Струм розряду конденсатора, що являє собою імпульс струму збудження, протікає через усі обмотки, з'єднані за схемою трикутника, а необхідний напрямок його протікання також забезпечується діодами, включеними в електричний ланцюг.

2.2 Математичне опис електромагнітних процесів вентильного індукторного генератора з конденсаторним збудженням

Наведені вище припущення доцільно доповнити такими моментами:

- напівпровідникові елементи в електричному ланцюзі ідеальні (не мають тимчасових затримок та падіння напруги);
- параметри всіх секцій обмоток однакові;
- кутова швидкість обертання ротора протягом одного обороту стала;
- магнітна характеристика вентильної індукторної машини лінійна на ділянці апроксимації;
- втрати в сталі та механічні втрати не враховуються.

З цими припущеннями розглянемо трифазну систему з простою конфігурацією зубців зони електричною машиною з однією парою полюсів, представлену відповідно до рисунка 2.3.

Електрична схема заміщення вентильного індукторного генератора з конденсаторним збудженням, що працює на випрямляч за схемою Ларіонова і активне навантаження представлена відповідно до рисунка 2.4, де L_A , L_b , L_C , I_A , I_b , I_C - власні індуктивності обмоток якоря і якоря та збудження, C_1 , C_2 , C_3 - конденсатори ланцюга збудження, $\Gamma_{\text{диф}1}$, $\Gamma_{\text{диф}2}$, $\Gamma_{\text{диф}3}$ - еквівалентні диференціальні опори напівпровідникових приладів (діод, тиристор або транзистор з послідовно включеним діодом) в ланцюзі збудження, $\Gamma_{\text{диф}4}$, $\Gamma_{\text{диф}5}$, $\Gamma_{\text{диф}6}$ - еквівалентні диференціальні опори шунтуючих діодів ланцюга збудження, $r_{re f1}$ - $r_{re f6}$ - еквівалентні диференціальні опори випрямляча, R - активний опір навантаження.

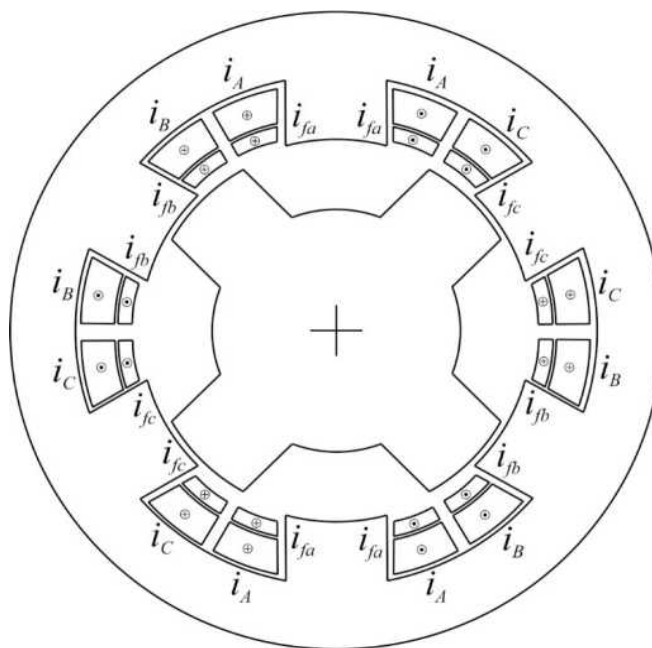


Рисунок 2.3 - Електромагнітна система електричної машини: i_a, i_b, i_c – фазні струми силових обмоток; i_{fa}, i_{fb}, i_{fc} – фазні струми додаткових обмоток

Математична модель вентильного генератора індукторного являє собою сукупність співвідношень, що описують встановилися і перехідні електромагнітні процеси, що виникають в генераторі в ході його функціонування [5]. Електромагнітні процеси у такій системі виражаються системою нелінійних диференціальних рівнянь, на яку відсутня загальне аналітичне рішення.

Основні труднощі формування математичного опису вентильного індукторного генератора з конденсаторним збудженням зумовлені складною конфігурацією його магнітної системи, наявністю додаткових обмоток, напівпровідникових елементів у фазних електричних колах, а також конденсаторів, які забезпечують переведення відповідних фаз у режим генерування електричної енергії.

Додаткові обмотки характеризуються порівняно малими значеннями власної індуктивності, які за порядком величини можуть бути співмірними із взаємною індуктивністю між фазами. У зв'язку з цим під час побудови математичної моделі недоцільно приймати припущення про повну відсутність взаємного індуктивного зв'язку між фазними обмотками, оскільки таке спрощення може призвести до зниження точності опису електромагнітних

процесів.

Водночас допустимим розрахунковим спрощенням може бути нехтування взаємною індуктивністю між додатковою обмоткою однієї фази та силовою або додатковою обмоткою іншої фази. Таке припущення є прийнятним за умови, що зазначені взаємні зв'язки мають незначний вплив на формування струмів, потокозчеплень і електрорушійних сил у досліджуваному режимі роботи генератора.

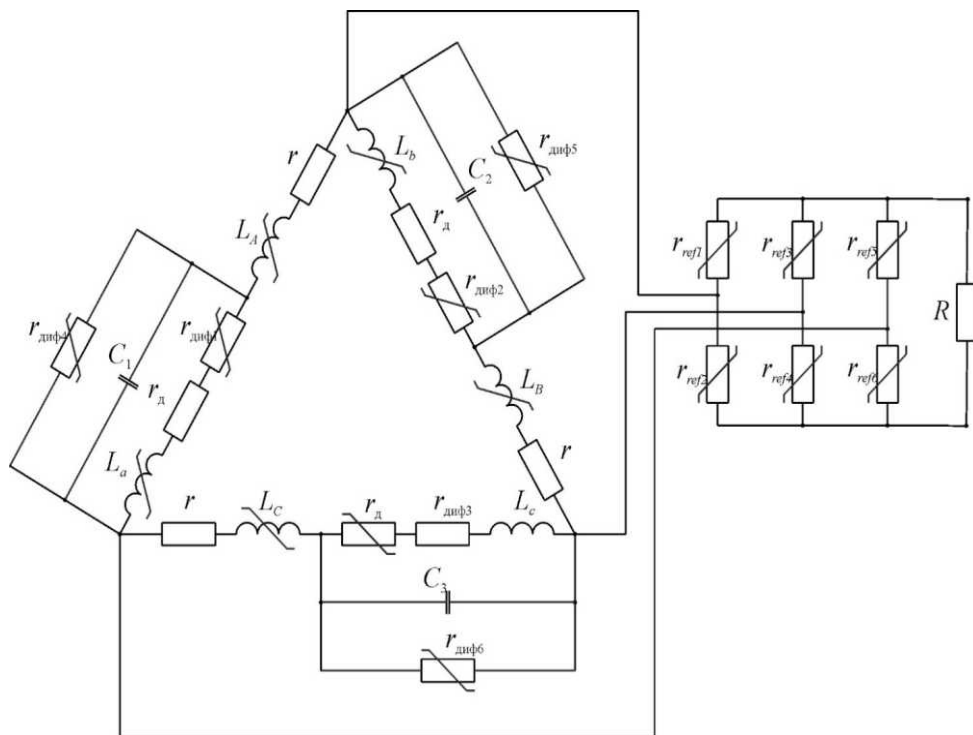


Рисунок 2.4 – Електрична схема заміщення ВІГ КЗ

Вищеперелічені обставини викликають необхідність для опису електромагнітних процесів в електротехнічній системі розбити електричний ланцюг, представлений на Рисунку 2.3 на декілька простих електричних ланцюгів відповідно до рисунків 2.5-2.12, відповідно до фаз роботи і станів напівпровідникових елементів, що відповідають за комутаційні процеси. Таких ланцюгів 7, причому перша (рисунок 2.4) ілюструє початкове збудження генератора, а інші (рисунок 2.6-2.11) ілюструють роботу системи. При цьому 3 схеми (рисунки 2.6, 2.8, 2.10) комутаційні процеси, що ілюструють, необхідно додатково розбити ще на дві системи інтегро-диференціальних рівнянь кожен,

ілюстрації це вже не вимагає. Через війну цикл комутаційних процесів описується 10 системами диференціальних рівнянь. Для того, щоб скласти дані рівняння необхідно дати деякі необхідні вирази:

Вирази для обчислення повних магнітних потокозчеплень обмоток генератора представлені відповідно до виразів (2.5) [6]:

$$\eta_m = \frac{P_{Rcp}}{P_{mexcp}} \quad (2.5)$$

Електромагнітний ККД є важливим енергетичним показником в оцінці техніко-економічної ефективності застосування електротехнічної системи.

Висновки

1. Сформовано теоретичний опис електромагнітних процесів, процесів комутації обмоток і формування збудження у вентильному індукторному генераторі з конденсаторним збудженням на прикладі трифазної автономної енергетичної установки. Це дало змогу розробити аналітичну математичну модель електромагнітних процесів у зазначеному типі генератора з урахуванням багатокутної схеми з'єднання фазних обмоток, а також збудження якірних обмоток за рахунок енергії, накопиченої в конденсаторах. Під час побудови моделі враховано фізичні особливості функціонування електричної машини та прийнято загальновживані розрахункові припущення, характерні для аналізу вентильних індукторних машин.

2. Отримано аналітичні залежності для визначення миттєвих і середніх значень електромагнітного моменту та потужностей для нового підкласу вентильного індукторного електроприводу — вентильного індукторного генератора з конденсаторним збудженням. На основі середніх значень потужностей виведено співвідношення для розрахунку коефіцієнта корисної дії електричної машини, що забезпечує можливість кількісного оцінювання її енергетичних характеристик та ефективності роботи генераторної системи.

Глава 3. КОМП'ЮТЕРНЕ МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

3.1. Методика проектування вентильного індукторного генератора з конденсаторним збудженням

Розроблення будь-якої електротехнічної системи, незалежно від її типу, функціонального призначення та принципу дії, розпочинається з формування технічного завдання. У разі проектування генератора, призначеного для роботи у складі автономної енергетичної установки, основними вихідними параметрами, що задаються технічним завданням, є:

вихідна електрична потужність P , кВт;

напруга бортової мережі U_d , В;

мінімальна $n_{\min}$,

номінальна n_n

та максимальна $n_{\max}$ частоти обертання вала генератора, об/хв;

масогабаритні показники, зокрема максимальний зовнішній діаметр електричної машини D , мм; максимальна довжина електричної машини l , мм; маса електричної машини m , кг.

Зазначені вихідні дані доповнюються вимогами споживачів електричної енергії до якості вихідної напруги, зокрема до допустимого коефіцієнта пульсацій, величини відхилення напруги при зміні навантаження, а також іншими спеціальними вимогами, що визначаються сферою застосування, режимами роботи та умовами експлуатації автономної енергетичної установки.

Більшість експлуатаційних і якісних показників електротехнічних систем регламентується відповідними нормативними документами та стандартами [16]. Зокрема, ДСТУ Р 50783-95 [8] установлює вимоги до якості електричної енергії, основні показники якої наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Норми якості електроенергії

Найменування показника норм якості електричної енергії	Значення
Номинальна напруга постійного струму,	28,5; 115; 230
Відхилення напруги, що встановилося, у встановленому тепловий стан при зміні навантаження від 0 до 100% номінальної потужності, %	$\pm 2,0$; $\pm 3,0$; $\pm 5,0$;
Перехідне відхилення напруги при скиданні 100% навантаження, %	$\pm 10,0$; $\pm 15,0$; $\pm 20,0$;
Час відновлення, з	0,5; 1; 2; 3; 5.
Коефіцієнт пульсацій напруги при роботі на активне навантаження, %	$\pm 3,0$; $\pm 6,0$;

З огляду на принцип дії автономної енергетичної установки, розрахунок електротехнічної системи слід розглядати як індивідуалізоване інженерне завдання, параметри якого визначаються конкретними умовами застосування, режимами роботи та технічними вимогами. Проектування вентильного індукторного генератора не є однозначною процедурою, оскільки потребує поетапного виконання комплексу взаємопов'язаних електромагнітних, електричних, конструктивних і теплових розрахунків.

При цьому необхідно враховувати задані критерії якості, експлуатаційні вимоги та технічні обмеження, зумовлені властивостями застосовуваних матеріалів, умовами роботи генератора, допустимими масогабаритними показниками, а також доступністю елементної бази. Усі етапи проектування вентильного індукторного генератора з конденсаторним збудженням мають ітераційний характер. Це передбачає, що на кожній стадії розрахунку отримані результати необхідно зіставляти з контрольними або заданими значеннями, а у

разі невідповідності — вносити відповідні коригування до вихідних параметрів, конструктивних рішень або подальших розрахункових процедур.

На початковому етапі проєктування визначаються основні геометричні розміри електричної машини, параметри зубцево-пазової зони, обмотувальні дані, а також параметри робочого кола збудження і кола початкового збудження. Розрахунок активної частини машини може виконуватися на основі відомих методик проєктування вентильних індукторних машин, розроблених як зарубіжними [12], так і вітчизняними дослідниками [4]. Водночас застосування цих методик потребує певного уточнення з урахуванням схемотехнічних і конструктивних особливостей досліджуваної системи.

Зазначені особливості насамперед пов'язані зі специфікою збудження генератора. По-перше, конструкція передбачає наявність додаткової обмотки кола збудження, яка розміщується у пазу статора разом із якірною обмоткою. По-друге, необхідним є розрахунок параметрів кола збудження, зокрема вибір його робочої напруги, визначення кількості витків додаткової обмотки та обґрунтування ємності конденсатора збудження. По-третє, окремого визначення потребують параметри початкового конденсатора збудження, який забезпечує запуск процесу формування магнітного поля та перехід генератора до робочого режиму.

На підставі визначених параметрів кола збудження здійснюється подальший вибір напівпровідникових компонентів системи, зокрема діодів, тиристорів або інших вентильних елементів, що забезпечують необхідний режим комутації, заряджання конденсаторів та стабільність електромагнітних процесів у генераторі.

Ескіз електричної машини для пояснення прив'язки геометричних розмірів представлений відповідно до Рисунку 3.1.

- D_a — зовнішній діаметр статора;
- L_s — довжина активної частини електричної машини;
- ω_r — номінальна швидкість обертання валу ротора;
- P_n — номінальна потужність генератора;

- U_H – номінальне значення постійної складової напруги на висновках генератора;

$$Z_2 = Z_1 - 2p \quad (3.1)$$

- I_H - номінальне значення постійної складової струму навантаження генератора;

- δ_M - мінімальне значення повітряного зазору, що визначається технологічними можливостями;

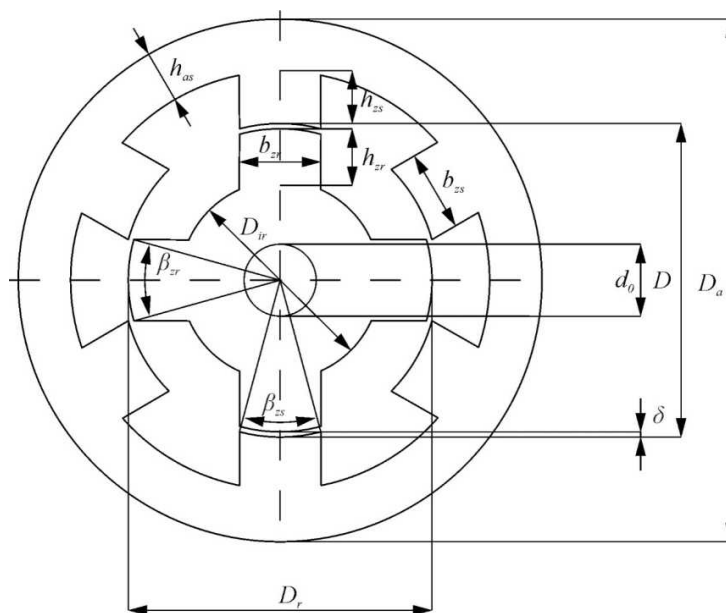


Рисунок 3.1 - Поперечний переріз електричної машини

- $K_{зст} \sim 0,5$ - коефіцієнт заповнення паза статора міддю;
- J_{max} - щільність струму в обмотці, залежить від режиму роботи електричної машини та системи охолодження, в більшості випадків $J_{max} < 5 \text{ A/mm}^2$;
- B_s – максимальна індукція в зубці статора;
- m - число фаз генератора, даної системи оптимальним є $m=3$;
- $2p$ - кількість полюсів фази, що вибирається виходячи з технологічних можливостей, обраних матеріалів та необхідних критеріїв якості роботи системи;
- кількість зубців статора відповідно до виразу (3.1):

$$Z_1 = 2pm; \quad (3.2)$$

Параметр числа паралельних гілок безпосередньо пов'язаний із кількістю

витків обмотки. Для вентильних індукторних машин його доцільно приймати максимально можливим; як правило, число паралельних гілок вибирають рівним числу полюсів електричної машини.

Така вимога зумовлена специфікою електромагнітних процесів у вентильних індукторних машинах. Електромагнітний момент, що розвивається машиною, має виражений пульсуючий характер, обумовлений зубчастою будовою магнітної системи та періодичною зміною магнітної провідності повітряного проміжку. Відповідно, електромагнітні сили, які діють на ротор, також змінюються у часі та залежать від миттєвого значення повітряного зазору між статором і ротором.

Оскільки технологічно забезпечити абсолютно рівномірний повітряний проміжок по всьому колу машини практично неможливо, виникає необхідність зменшення впливу механічних і електромагнітних асиметрій на роботу ротора. З цією метою котушки однієї фази доцільно з'єднувати паралельно. Таке з'єднання забезпечує перерозподіл струмів між паралельними гілками та сприяє вирівнюванню електромагнітних сил, прикладених до ротора з протилежних сторін.

З огляду на зазначене, у цій роботі варіант послідовного з'єднання котушок однієї фази не розглядається. У подальших розрахунках число паралельних гілок приймається рівним числу полюсів електричної машини.

Необхідний переріз провідника обмотки може бути забезпечений як одним елементарним провідником, так і сукупністю кількох елементарних провідників меншого перерізу. За наявності технологічної можливості виконання намотування одним провідником малого перерізу перевагу слід надавати саме цьому варіанту. Це пояснюється тим, що використання кількох паралельних елементарних провідників у котушці може призводити до прояву ефекту витіснення струму в пазу статора під час роботи електричної машини. Усунення цього явища потребує додаткового ускладнення технології виготовлення обмоток, зокрема спеціального розташування, транспозиції або вирівнювання умов протікання струму в окремих провідниках.

- активний опір котушки якірної обмотки та додаткової обмотки відповідно до виразу (3.3):

$$\begin{cases} r = \rho \frac{l_{\text{ср}} w}{S_{\text{пр}}} \\ r = \rho \frac{l_{\text{ср}} w_{\text{д}}}{S_{\text{пр}}} \end{cases} \quad (3.3)$$

де ρ - питомий опір матеріалу дроту, при цьому рекомендую спочатку задавати значення, що відповідає на максимальній температурі ізоляції обраної марки дроту; $l_{\text{порівн}}$ - середня довжина витка котушки; Z - ємність конденсатора в ланцюзі збудження.

$B_s = 1,5$ Тл - значення магнітної індукції в зубці статора, відповідне насичення сталі; $AU_C = 0,1 U_H$ - збільшення напруги конденсатора під час його розряду; $p_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – абсолютна магнітна проникність; $\omega_r Z_2$ - швидкість обертання поля при номінальній частоті обертання ротора.

Подальший етап розрахунку доцільно виконувати із застосуванням методів математичного моделювання на основі аналітичної математичної моделі, наведеної в роботі, а також моделі вітрогенераторної установки, побудованої з використанням методу скінченних елементів. Такий підхід забезпечує можливість визначення необхідних вихідних параметрів системи, їх кількісного оцінювання та, за потреби, оптимізації окремих параметрів електротехнічної системи.

Технічні вимоги до вітрогенератора визначаються насамперед необхідними характеристиками енергетичної установки. При цьому параметри генератора мають бути узгоджені з аеродинамічними та механічними характеристиками вітроколеса, оскільки саме взаємодія цих елементів визначає ефективність перетворення енергії вітрового потоку в електричну енергію.

На рисунку 3.3а наведено тягову характеристику системи. З урахуванням прийнятого передавального числа редуктора $i=26,5$ та діаметра колеса $D=1,08$ м було визначено необхідну тягову характеристику генератора, подану на рисунку 3.3б. Відповідно вхідною характеристикою системи є залежність «струм — напруга», наведена на рисунку 3.3в. Для вентильного індукторного генератора з

конденсаторним збудженням ця залежність розглядається як вихідна електрична характеристика.

Водночас вхідні характеристики самого генератора, зокрема залежності «електромагнітний момент — частота обертання» та «потужність — частота обертання», мають бути узгоджені з вихідними характеристиками вибраного вітроколеса, представленими на рисунку 3.3г. Таке узгодження є необхідною умовою забезпечення ефективної роботи генератора в заданому діапазоні швидкостей обертання та навантажень.

Слід зазначити, що на наведених рисунках не відображено залежність споживаної вітроколесом енергії вітрового потоку від частоти обертання. У зв'язку з цим необхідно уточнити, що мінімальні значення споживаної вітрової енергії відповідають діапазону частот обертання від 1200 до 1400 об/хв. У зазначеному інтервалі, відповідно до характеристики вітроколеса, забезпечується необхідний рівень механічної потужності для роботи генераторної системи.

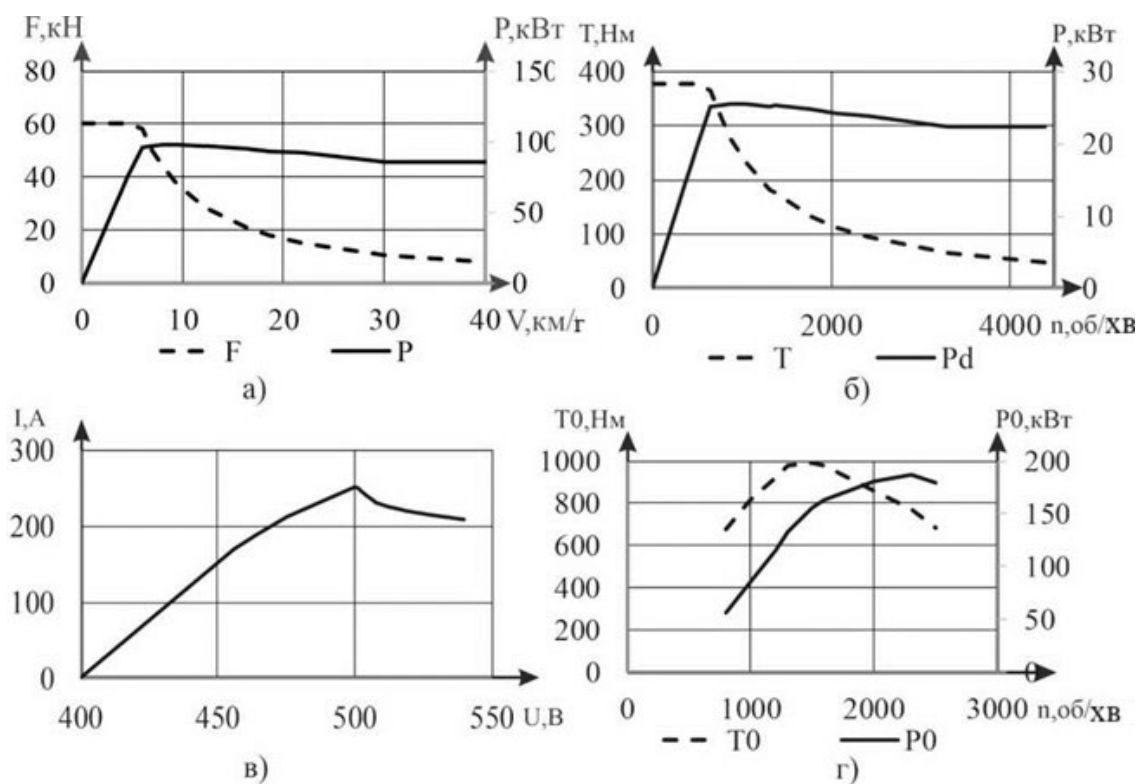


Рисунок 3.3 а) тягові характеристики; б) розрахункові тягові показники;
в) вихідна характеристика вітрогенератора; г) тягові характеристики
вітроколеса

Так як у паспорті вітроколеса, максимальна швидкість та потужність вказуються за номінальні, для автономної енергетичної установки номінальна швидкість обертання та потужність будуть вказані аналогічним чином. Крім того, ВІГ КЗ встановлюється в існуючу раму трактора, а отже, на нього накладаються обмеження за габаритами, що представлено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Основні параметри вітрогенераторів

Показник	Значення
Номінальна швидкість обертання валу, об/хв	2300
Мінімальна швидкість обертання валу, об/хв	900
ККД у номінальному режимі роботи з урахуванням споживання енергії перетворювачем регулятором струму збудження та втрат енергії у випрямлячі, не менше	0,92
Номінальна вихідна електрична потужність у тривалому режимі роботи (режим S1 за ДСТУ 183 74 [143], ДСТУ Р 52776-2007 [144]), кВт	130
Номінальне значення постійної складової випрямленої напруги (середнє значення),	540
Зовнішній діаметр активної частини, не більше, мм	410
Довжина активної частини, не більше, мм	350

3.2. Математичне моделювання за допомогою методу кінцевих елементів

Після визначення початкових геометричних розмірів поперечного перерізу електричної машини доцільно перейти до етапу математичного моделювання електротехнічної системи. Таке моделювання може виконуватися на основі наведеного раніше математичного опису. Водночас необхідно враховувати, що припущення, прийняті під час формування аналітичної моделі, можуть знижувати достовірність отриманих результатів, особливо за наявності нелінійних електромагнітних процесів.

Відмова від частини спрощувальних припущень і введення до моделі додаткових чинників, зокрема локального насичення електротехнічної сталі, неоднорідності магнітного поля, впливу зубцево-пазової структури та зміни параметрів магнітного кола, істотно ускладнює математичний апарат. У зв'язку з цим для підвищення точності розрахунку електромагнітних процесів у системі доцільно застосовувати сучасні програмно-обчислювальні засоби чисельного моделювання.

Моделювання електротехнічної системи доцільно здійснювати за двома основними напрямками. Перший напрям передбачає розрахунок магнітного поля електричної машини із застосуванням методу скінченних елементів. Другий напрям пов'язаний із моделюванням зовнішньої електричної схеми, зокрема кіл збудження, силових обмоток, напівпровідникових елементів і конденсаторів.

Для розв'язання задачі розрахунку магнітного поля зазвичай застосовують такі програмні комплекси, як ANSYS Maxwell, ELCUT та FEMM [10]. Також можуть використовуватися інші середовища чисельного моделювання, зокрема Elmer, FEMLAB та Ansoft, що забезпечують можливість дослідження просторового розподілу магнітної індукції, потокозчеплення, електромагнітного моменту та інших параметрів електромеханічного перетворювача енергії.

Моделювання електричної схеми системи, як правило, виконується у середовищах Scilab або MATLAB Simulink. Крім того, для комплексного аналізу можуть бути використані вбудовані засоби програмних пакетів, зокрема модуль Lua у FEMM, а також Simplorer, Maxwell Circuit, ANSYS Workbench та ANSYS Multiphysics у середовищі ANSYS. Подальше дослідження роботи вітрогенераторів у складі електромеханічної трансмісії може здійснюватися як у середовищі ANSYS, так і в MATLAB Simulink [12].

Програмно-обчислювальний комплекс ANSYS є одним із найбільш розвинених інструментів інженерного аналізу, що охоплює широкий спектр задач чисельного моделювання. Результати, отримані з його використанням, характеризуються високим рівнем достовірності, що підтверджується

практикою застосування цього програмного середовища як у сфері інформаційних технологій математичного моделювання [16], так і в дослідженнях електричного приводу [4].

З огляду на це, для скорочення обсягу розрахункових процедур, підвищення точності моделювання та отримання універсальних проєктних залежностей, які адекватно відображають реальні фізичні процеси в електромеханічному перетворювачі енергії, доцільно використовувати зазначений обчислювальний апарат. Його застосування дає змогу виконувати розрахунок магнітних і теплових полів у зубцево-пазовій зоні машини, визначати електромагнітні параметри, аналізувати роботу зовнішнього електричного кола та оцінювати вплив конструктивних і режимних факторів на характеристики генератора.

Крім того, використання сучасних програмно-обчислювальних комплексів забезпечує високу наочність, інформативність і керованість процесу розрахунку, що є важливим для подальшої оптимізації параметрів вентильного індукторного генератора з конденсаторним збудженням.

Детальний опис методики математичного моделювання із застосуванням методу скінченних елементів у середовищі ANSYS наведено в роботі [12]. У зв'язку з цим у цьому розділі доцільно обмежитися розглядом основних теоретичних і методичних положень, безпосередньо пов'язаних із моделюванням електричної машини методом скінченних елементів.

Математичною основою опису процесів, неперервних у часі та просторі, зокрема розподілу теплового поля, електромагнітного поля, а також полів механічних напружень і деформацій у технічних об'єктах та системах, є диференціальні рівняння в частинних похідних. Такі рівняння належать до класу рівнянь математичної фізики та використовуються для формалізованого опису просторово-часових змін фізичних величин.

Стаціонарні процеси, параметри яких не залежать від часу, зазвичай описуються рівняннями еліптичного типу. Нестационарні процеси, що характеризуються часовою зміною досліджуваних параметрів, описуються

рівняннями параболічного або гіперболічного типу залежно від фізичної природи процесу, характеру поширення збурень і прийнятої математичної постановки задачі. Для електромагнітних полів відповідні рівняння щодо характеристик поля - векторів напруженості електричного та магнітного полів $\vec{E}$ і $\vec{H}$, векторів електричної та магнітної індукції $\vec{D}$ і $\vec{B}$, векторного магнітного потенціалу $\vec{A}$, а також скалярного електричного потенціалу φ - можуть бути отримані шляхом перетворення електромагнітних (3.4):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rot } \vec{H} = \vec{J}_{cm} + \vec{J}_{np} + \vec{J}_{cm} \\ \text{rot } \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \\ \text{div } \vec{B} = 0 \\ \text{div } \vec{D} = 0 \\ \vec{B} = \mu\mu_0\vec{H} \\ \vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E} \\ \vec{J}_{np} = \gamma(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \end{array} \right. \quad (3.4)$$

де $\vec{J}_{cm}$ - вектор густини сторонніх струмів; $\vec{J}_{np}$ - вектор щільності струму провідності, викликаного у провідному середовищі зміною електромагнітного поля в часі та рухом у ній це середовища зі швидкістю $\vec{v}$; $\vec{J}_{cm} = d\vec{D}/dt$ - вектор густини струму електричного зміщення; μ і ε - відносні магнітна та діелектрична проникність матеріалу; $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнітна постійна; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - електрична постійна; γ - питома електрична провідність; ρ - об'ємна щільність заряду.

Рівняння Максвелла доповнюються рівняннями, що пов'язують основні силові характеристики з їхніми потенціалами відповідно до (3.5):

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \text{rot } \vec{A}; \\ \vec{H} &= -\text{grad} \varphi_{эл}; \\ \vec{E} &= -\text{grad} \varphi. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Система рівнянь Максвелла в сукупності з граничними умовами на зовнішніх кордонах і умовами сполучення на внутрішніх межах розрахункової області утворює математичну модель електромагнітного поля електротехнічного

пристрою. Така модель дозволяє однозначно визначити у будь-якій точці простору та у будь-який момент часу значення векторів E , H , D та B при заданні початкових умов на момент часу t_0 .

Метод скінченних елементів є чисельним методом розв'язання варіаційних задач, сутність якого полягає у знаходженні такої шуканої функції, за якої відповідний функціонал набуває мінімального значення [2]. Реалізація цього підходу передбачає попереднє формулювання функціонала, що характеризує досліджуваний фізичний процес, а також визначення функції або сукупності функцій, які забезпечують його мінімізацію.

Зазначений підхід до розв'язання крайових задач належить до класу варіаційних методів і ґрунтується на фундаментальному принципі найменшої дії. У межах цього принципу реальний стан фізичної системи відповідає такому розподілу узагальнених змінних, за якого енергетичний функціонал системи має екстремальне, зокрема мінімальне, значення.

Для задач магнітостатики за граничних умов першого роду, тобто умов Діріхле, мінімізованим функціоналом є величина, пропорційна енергії магнітного поля, накопиченій у досліджуваній області. У загальному вигляді цей функціонал подається виразом (3.6):

$$W = \frac{1}{2} \int \mu \mu_0 \vec{H}^2 dv. \quad (3.6)$$

Оскільки $H = - \text{grad } p$, то функціонал, що мінімізується, можна подати відповідно до виразу (3.7)

$$W = \frac{1}{2} \int \mu \mu_0 (\text{grad } \varphi)^2 dv. \quad (3.7)$$

А функцією, що шукається, буде $\varphi(\xi)$. У загальному випадку варіаційна задача розрахунку поля зводиться до знаходження такої функції, при якій $W(\varphi) \min$.

Розв'язання задачі методом скінченних елементів доцільно виконувати із застосуванням сучасних засобів обчислювальної техніки та спеціалізованих програмних комплексів. Для підвищення наочності й послідовності

модельовання вентильного індукторного генератора з конденсаторним збудженням у середовищі ANSYS доцільно реалізовувати розрахунок у два основні етапи.

Перший етап передбачає виконання магнітостатичного розрахунку для однієї фази генератора за різних взаємних положень полюсів статора і ротора. Такий підхід дає змогу визначити характер зміни магнітного поля, потокозчеплення, індуктивності та електромагнітних параметрів залежно від кутового положення ротора.

Другий етап пов'язаний із розрахунком нестационарного магнітного поля, у межах якого аналізуються перехідні електромагнітні процеси, зумовлені протіканням струмів в обмотках, підключених до зовнішніх електричних кіл. Для цього можуть використовуватися інструменти ANSYS Maxwell Circuit Editor або ANSYS Simplorer, які забезпечують можливість сумісного моделювання електромагнітної системи та зовнішньої електричної схеми.

На першому етапі моделювання як вихідні дані використовуються:

- геометричні розміри поперечного перерізу електричної машини;
- граничні умови на зовнішній межі розрахункової області та на внутрішніх межах поділу середовищ;
- магнітні й електричні властивості матеріалів та середовищ;
- схема з'єднання та включення обмоток;
- задані значення густини струму в обмотках.

На другому етапі зазначений набір вихідних даних доповнюється параметрами зовнішнього електричного кола, зокрема характеристиками конденсаторів, напівпровідникових елементів, навантаження та інших компонентів схеми збудження і силового кола.

Алгоритм моделювання магнітної системи електромагнітного пристрою у програмному комплексі ANSYS охоплює низку послідовних етапів [2]:

- формування вихідної розрахункової постановки, що включає побудову геометричної моделі пристрою відповідно до заданих початкових розмірів;
- задання властивостей матеріалів елементів моделі, зокрема з

урахуванням нелінійної залежності магнітної індукції від напруженості магнітного поля та кривої намагнічування $B(H)$;

дискретизацію геометричної моделі шляхом розбиття розрахункової області на скінченні елементи;

задання граничних умов, джерел електричного струму та параметрів обмоток;

вибір електромагнітних параметрів, які підлягають визначенню в процесі чисельного розрахунку;

виконання розрахунку та подальший аналіз отриманого розподілу магнітного поля, потокозчеплення, індуктивностей і електромагнітного моменту.

Такий поетапний підхід забезпечує методично коректну постановку задачі, підвищує достовірність результатів чисельного моделювання та дає змогу комплексно оцінити вплив конструктивних і схемотехнічних параметрів на робочі характеристики вентильного індукторного генератора з конденсаторним збудженням.

Побудова геометричної моделі магнітної системи може виконуватися із застосуванням сторонніх CAD-систем із подальшим імпортуванням графічної моделі до розрахункового середовища за допомогою поширених нейтральних форматів файлів. Проте для мінімізації можливих похибок на етапі формування геометрії доцільно використовувати вбудований графічний інтерфейс ANSYS.

Такий підхід є обґрунтованим не лише з погляду зменшення ймовірності помилок під час передавання та адаптації геометричних даних, а й з позиції можливості параметричного задання основних розмірів магнітної системи електричної машини. Параметризація геометрії забезпечує оперативну зміну конструктивних параметрів моделі, що є особливо важливим під час подальшої оптимізації форми зубцево-пазової зони, повітряного проміжку та інших елементів електромеханічного перетворювача.

З метою скорочення тривалості розрахунків і зменшення вимог до обчислювальних ресурсів усі основні етапи моделювання доцільно виконувати

на двовимірних моделях. Такий підхід є прийнятним за умови, що просторові крайові ефекти не мають визначального впливу на досліджувані електромагнітні процеси або можуть бути враховані за допомогою відповідних коригувальних коефіцієнтів.

3.3. Математична модель ВІГ КЗ у ANSYS.

Для проведення досліджень експериментального зразка вентильного генератора індукторного з конденсаторним збудженням була розроблена математична модель електротехнічної системи в програмному комплексі ANSYS. Зазначена модель включає дві динамічно пов'язані частини: математичну модель електричної схеми, реалізовану в ANSYS Simplorer, та звичайно-елементну модель електричної машини, побудовану в ANSYS Maxwell. Такий підхід забезпечує можливість комплексного розрахунку системи та дозволяє максимально наблизити досліджувану модель до реальних умов експлуатації.

З метою зниження обчислювальних витрат при виконанні розрахунків було створено двовимірну модель для кінцево-елементного аналізу. Остаточний варіант цієї моделі було отримано в результаті багаторазових розрахунків, спрямованих на оптимізацію геометричних параметрів та інших вихідних даних. Для автоматизації розрахункового процесу геометричні розміри електричної машини та обмотувальні параметри були задані у параметричній формі. З цією метою використовувалася система глобальних змінних, а відповідні позначення були запроваджені згідно з рисунком 3.5.

Відповідно до рисунка 3.5 прийнято такі позначення, враховуючи, що в ANSYS Maxwell кола задаються радіусами: SD — зовнішній радіус статора; SDA — внутрішній радіус статора; SHY - висота ярма статора; SBZ - ширина зубця статора; SBY - ширина основи зубця статора; RDA — зовнішній радіус ротора; RHY - висота ярма ротора; RBZ - ширина зубця ротора; BRY - ширина основи зубця ротора; DELTA — величина повітряного зазору; Ls - довжина активних

частин статора та ротора; Θ - Кут повороту ротора; CH - висота котушки; CB - ширина котушки; W - число витків котушки; DR - радіус області руху; $SPACE$ - радіус повітряної області, що оточує електричну машину.

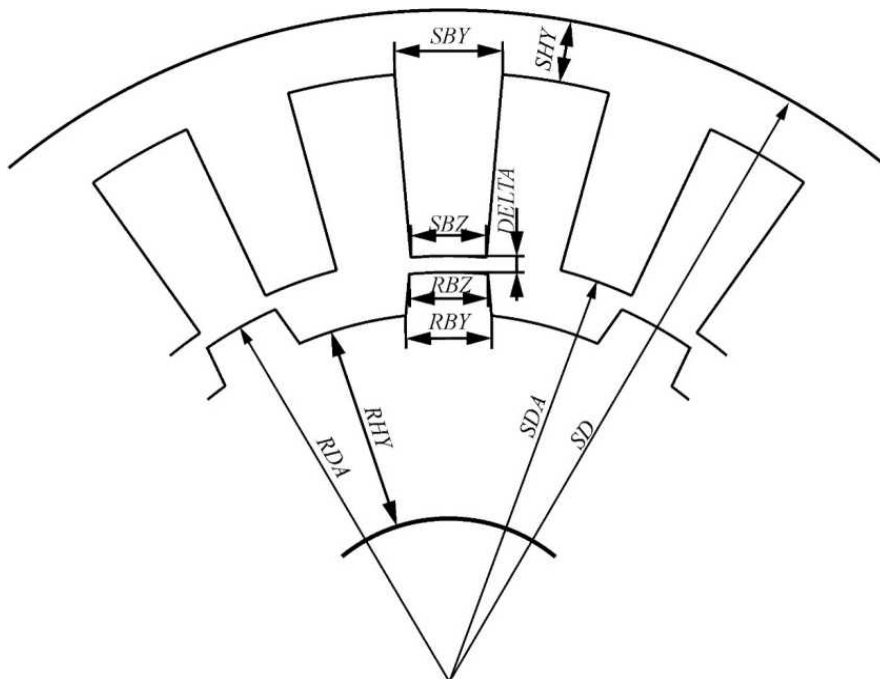


Рисунок 3.5 - Основні геометричні параметри електричної машини ВІГ КЗ у глобальних змінних

Вид моделі для кінцево-елементного аналізу показаний Рисунок 3.6.

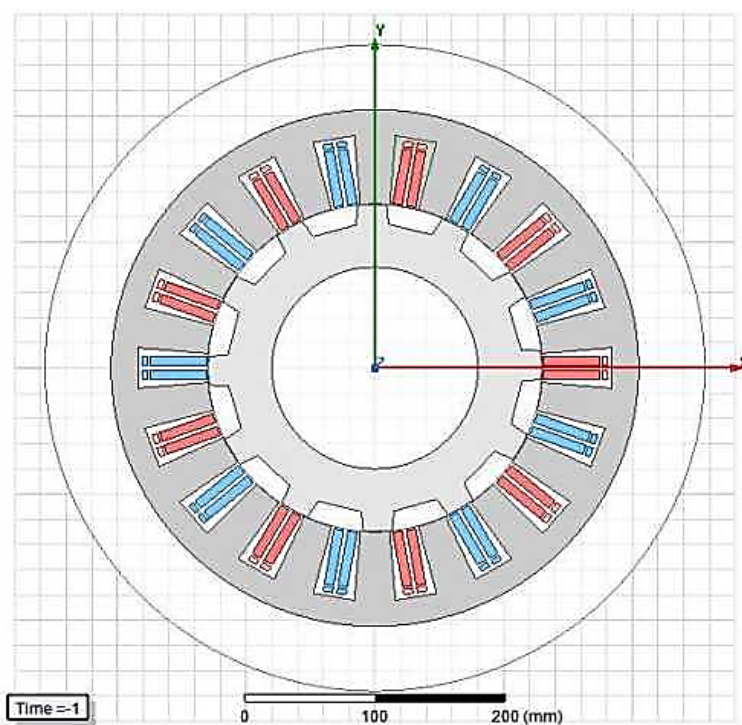


Рисунок 3.6 - Модель електричної машини в ANSYS Maxwell

Моделювання проводилося на розробленому експериментальному зразку генератора.

Для роботи зовнішньої схеми, виконаної в ANSYS Simplorer, були задані глобальні змінні: r - активний опір якірної обмотки; r_d – активний опір додаткової обмотки; C - ємність конденсатора ланцюга збудження; Ω – швидкість обертання ротора; J – момент інерції ротора. Основні розміри електричної машини представлені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Основні геометричні параметри експериментального зразка

Параметр	Од. змін.	Значення
Зовнішній діаметр статора	мм	410
Внутрішній діаметр статора	мм	260
Кількість зубів статора	шт.	18
Центральний кут зубця статора	град.	10
Ширина зуба статора	мм	22,8
Висота зуба статора	мм	56
Товщина ярма статора	мм	19
Скіс зуба статора	град.	5
Зовнішній діаметр ротора	мм	259
Діаметр отвору під вал	мм	97,5
Кількість зубів ротора	шт.	12
Центральний кут зубця ротора	град.	10
Ширина зуба ротора	мм	22,6
Висота зуба ротора	мм	15
Скід зуба ротора	град.	5
Ширина повітряного зазору	мм	0,5
Довжина пакетів статора та ротора	мм	350
Товщина станини	мм	6
Матеріал пакетів статора та ротора		Сталь2412
Товщина листа шихтованої сталі	мм	0,35

Наступним етапом чисельного моделювання є дискретизація розрахункової області на скінченні елементи. У програмному комплексі ANSYS Maxwell для двовимірних задач як скінченні елементи зазвичай використовуються трикутні елементи, тоді як для тривимірних постановок застосовуються тетраедральні елементи.

Під час моделювання вентильних індукторних машин особливе значення має коректне врахування локального насичення в області коронок зубців статора і ротора. Це зумовлено тим, що саме в зубцево-пазовій зоні спостерігаються найбільші градієнти магнітної індукції та істотна нелінійність магнітних властивостей матеріалу. Тому зубцеві зони доцільно виділяти як окремі геометричні області, відокремлені від ярма ротора та спинки статора. Такий підхід дає змогу задати для них дрібнішу скінченно-елементну сітку та забезпечити більшу щільність елементів порівняно з іншими ділянками магнітопроводу.

Граничні умови для магнітного потенціалу на зовнішній межі розрахункової області задаються у вигляді умов Діріхле та приймаються рівними нулю. Під час розрахунку магнітного поля електричної машини такі умови доцільно накладати не безпосередньо на зовнішню поверхню статора, а на фіктивний зовнішній контур, діаметр якого перевищує зовнішній діаметр статора. Це дає змогу зменшити вплив штучної межі розрахункової області на розподіл магнітного поля та уникнути похибок у визначенні інтегральних електромагнітних характеристик.

Після задання геометрії, матеріалів, сітки та граничних умов необхідно вибрати тип розв'язувача магнітного поля. На першому етапі розрахунку використовується магнітостатична постановка задачі, яка дає змогу визначити розподіл магнітного поля для фіксованого положення ротора та заданих струмів в обмотках.

Далі задаються струми в котушках обмотки. У двовимірній постановці задачі зазвичай використовується густина струму, яка визначається як відношення магніторушійної сили обмотки до площі її поперечного перерізу,

тобто Iw/S , де I — струм у провіднику, w — кількість витків, S — площа перерізу області обмотки.

Для підвищення ефективності моделювання доцільно застосовувати параметричний розрахунок за кутом повороту ротора в межах зубцевого поділу із заданим фіксованим кроком. Такий підхід дає змогу отримати залежності основних електромагнітних параметрів від кутового положення ротора, зокрема:

- розподілу магнітної індукції в розрахунковій області;
- електромагнітної сили або електромагнітного моменту;
- індуктивності котушок вентильного індукторного генератора.

Отримані залежності є вихідною основою для подальшого аналізу електромагнітних процесів, оцінювання енергетичних показників електричної машини та уточнення її конструктивних параметрів.

Точність розрахунку магнітного поля значною мірою визначається коректністю задання фізико-технічних властивостей матеріалів, використаних у моделі. У зв'язку з цим необхідно визначити характеристики матеріалів магнітопроводів статора і ротора, а також провідників котушкових обмоток. Для матеріалів магнітопроводів мають бути задані крива намагнічування $B(H)$, питома електрична провідність, густина, коефіцієнт заповнення пакета у разі застосування шихтованої електротехнічної сталі, напрям шихтування для врахування анізотропії властивостей, а також питомі втрати за заданих значень частоти зміни магнітного поля та магнітної індукції. На основі цих параметрів у подальшому можуть бути визначені втрати в магнітопроводі аналітичним способом, зокрема із застосуванням рівняння Штейнмеца.

Програмний комплекс ANSYS містить вбудовану бібліотеку матеріалів, тому в більшості випадків необхідні властивості можуть бути задані на основі наявних бібліотечних даних. Оскільки матеріалом провідників котушкових обмоток зазвичай є мідь, її доцільно вибирати з бібліотеки матеріалів із подальшим коригуванням питомої електричної провідності відповідно до робочої температури. Параметри повітряного середовища, яке оточує електричну машину, також можуть бути прийняті за бібліотечними значеннями

без додаткового уточнення.

Водночас криву намагнічування матеріалу магнітопроводу необхідно задавати з підвищеною точністю. Це пояснюється тим, що досліджувана електрична машина працює поблизу області магнітного насичення, а в коронках зубців статора і ротора можуть виникати локальні процеси перемагнічування. У зв'язку з цим до характеристики $B(H)$ доцільно включати точки, що відповідають значенням магнітної індукції, близьким до насичення, за напруженості магнітного поля порядку 300–500 кА/м.

Слід зазначити, що довідкові дані для вітчизняних марок електротехнічних сталей часто є недостатньо повними для коректного чисельного моделювання. Натомість сучасні бібліотеки матеріалів містять широкий перелік зарубіжних марок електротехнічних сталей, значна частина яких може розглядатися як повні або близькі аналоги вітчизняних матеріалів. Підбір таких аналогів доцільно здійснювати на основі каталогів провідних світових виробників електротехнічної сталі.

Наприклад, для сталі марки 2412 товщиною 0,35 мм, обраної як матеріал магнітопроводу електричної машини, повним аналогом може бути японська електротехнічна сталь 35JN270 виробництва компанії JFE. Після задання відповідних фізико-технічних характеристик матеріали призначаються відповідним областям геометричної моделі, що забезпечує коректне формування розрахункової постановки задачі магнітного поля.

3.4 Моделювання статичного магнітного поля електричної машини

В результаті моделювання статичного магнітного поля ANSYS Maxwell отримані картини індукції для положень d , q і dq для струму 200 А представлені на Рисунку 3.8.

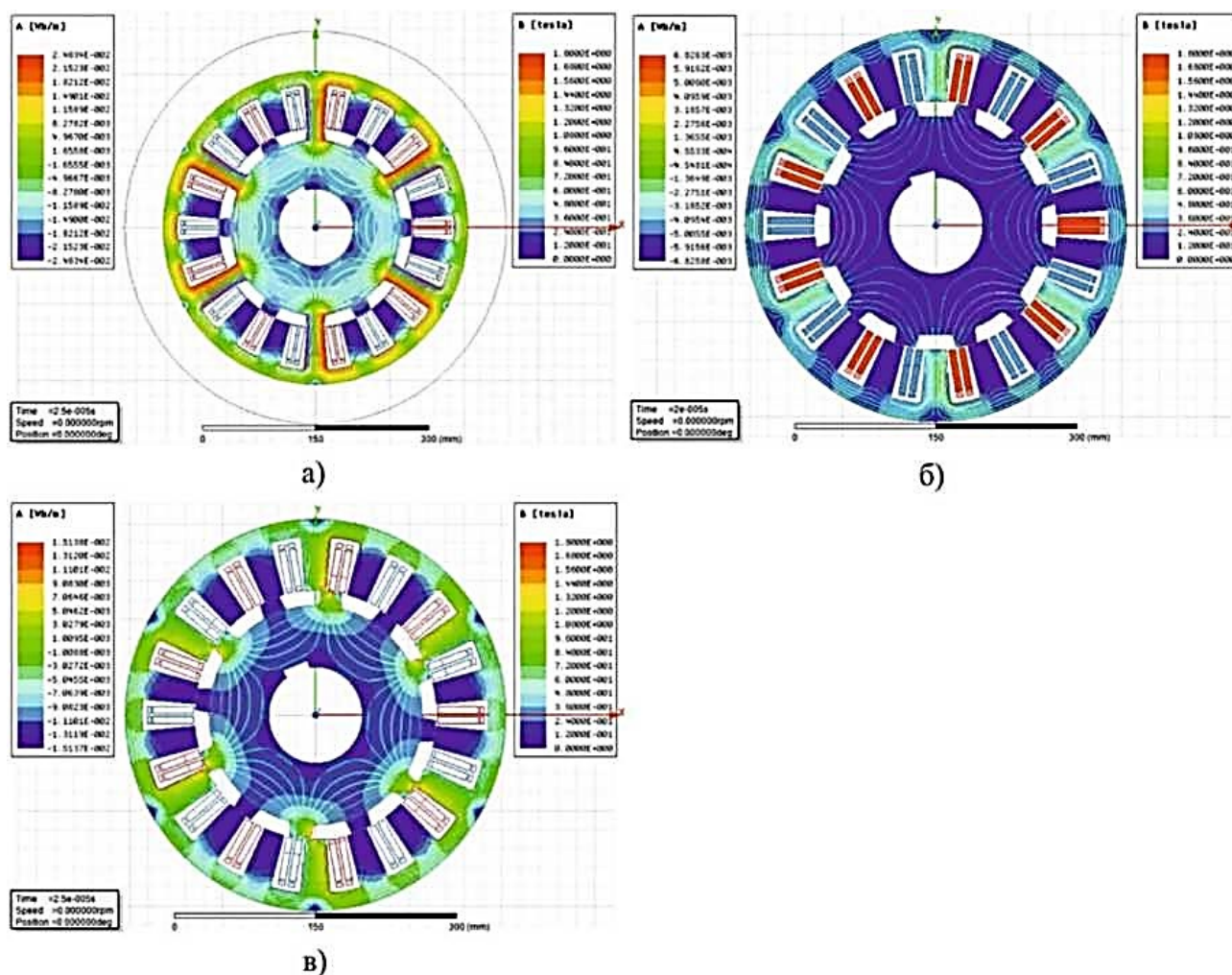


Рисунок 3.8 – а) Картина магнітного поля в положенні d; б) Картина магнітного поля у положенні q; в) картина магнітного поля в положенні dq

Крім картин магнітної індукції були отримані залежності індуктивності від кута повороту ротора Θ представлена на Рисунку 3.7, потокозцеплення від кута повороту ротора при заданих значеннях струму $y(\theta, i)$ представлена на Рисунку 3.8, електромагнітного моменту від кута повороту ротора при заданих значеннях струму $T(\theta, i)$.

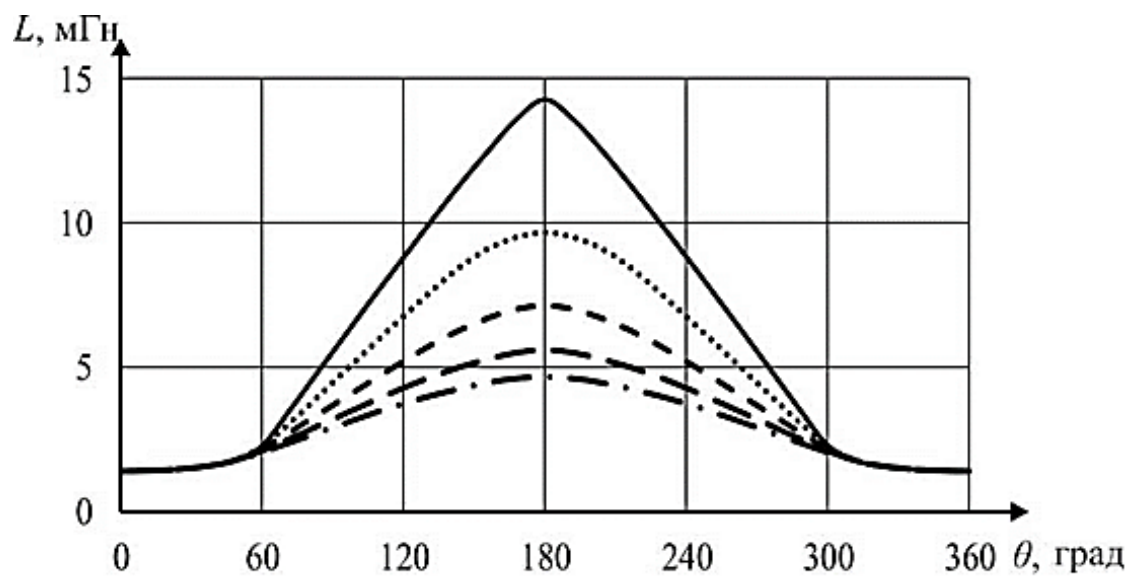


Рисунок 3.7 - Залежність індуктивності якірної обмотки від кута повороту ротора за заданими значеннями струму

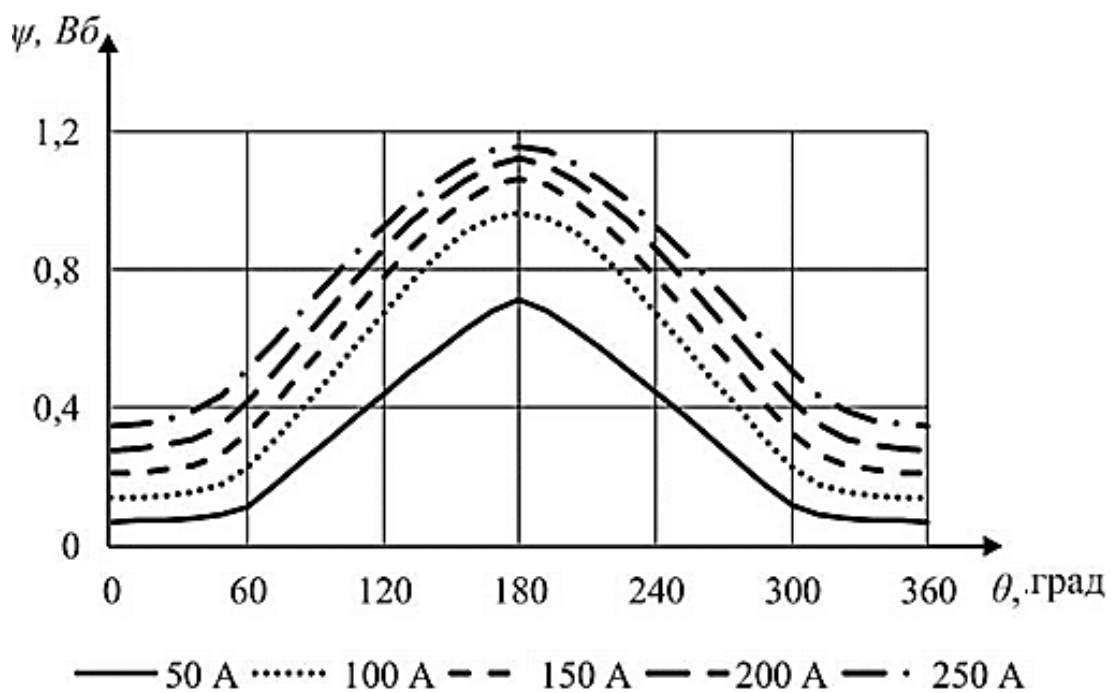


Рисунок 3.8 - Залежність потокозчеплення від кута повороту ротора при заданих значеннях струму $\psi(\theta, i)$

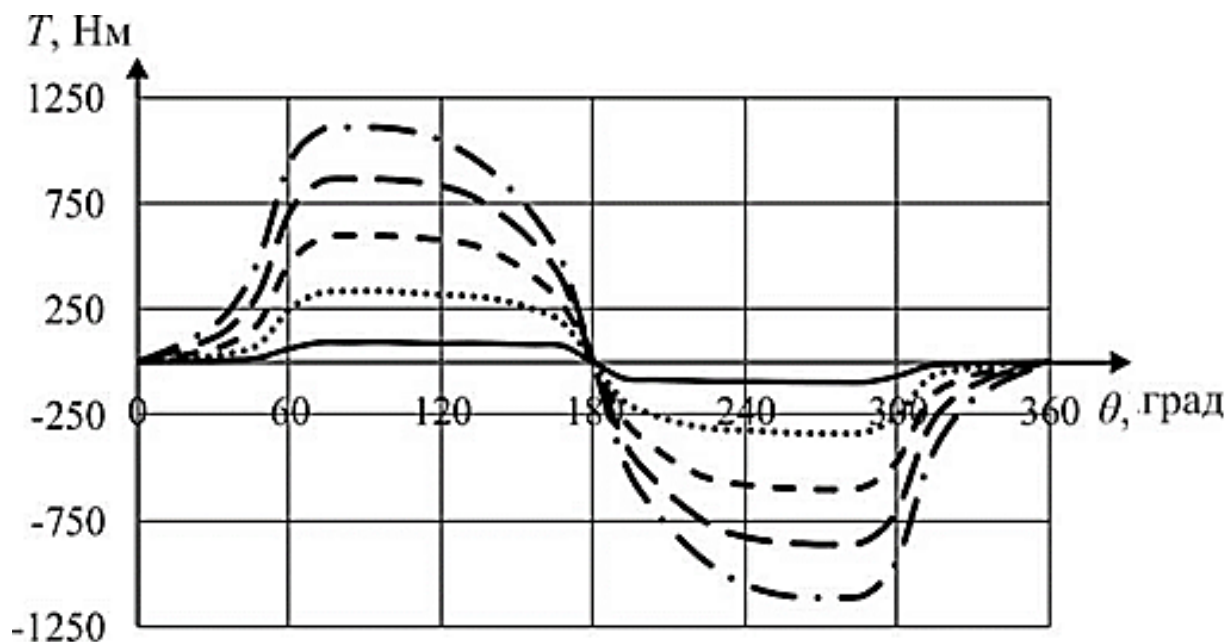


Рисунок 3.9 - Залежність електромагнітного моменту від кута повороту ротора при заданих значеннях струму $T(\theta, i)$

Також отримані картини індукції для різних кутів повороту ротора і заданих значень струму, аналізуючи які можна отримати залежності індукції в різних частинах електричної машини від кута повороту ротора і заданих значеннях струму.

3.5 Моделювання нестационарного режиму електротехнічної системи

Комп'ютерне моделювання розробленої системи в середовищі ANSYS Simplorer у режимі Transient дає змогу отримати результати, що характеризують перебіг перехідних електромагнітних процесів в електричній машині. Для виконання розрахунку в режимі нестационарного магнітного поля необхідно перевести розв'язувач магнітного поля у відповідну часову постановку задачі. Після цього задається рух ротора: для рухомих тіл встановлюються окремі граничні умови, а відповідній області моделі призначається кутова швидкість обертання.

Параметри зовнішнього електричного кола задаються засобами ANSYS Simplorer. Інтеграція польової моделі електричної машини з електричною

схемою у середовищі ANSYS Simplorer підвищує достовірність результатів моделювання завдяки можливості використання розширеної бібліотеки математичних моделей електротехнічних, силових напівпровідникових і пасивних компонентів.

У результаті моделювання нестационарного магнітного поля може бути визначено практично повний комплекс параметрів електротехнічної системи, що охоплює як характеристики магнітного поля, так і параметри зовнішнього електричного кола. У процесі чисельного експерименту було отримано значення крутного моменту, що розвивається генератором у різних режимах роботи, вхідної та вихідної потужностей, втрат у магнітопроводі й обмотках, а також втрат у компонентах електричного кола.

Крім того, було визначено коефіцієнт корисної дії генератора за різних частот обертання ротора в діапазоні від 1000 до 2300 об/хв та за різних навантажень у межах від 40 до 2,5 Ом.

У ході моделювання також було отримано навантажувальні характеристики генератора для різних частот обертання ротора, які наведено на рисунку 3.10. Залежності вихідної потужності та коефіцієнта корисної дії від струму навантаження для різних швидкісних режимів подано відповідно на рисунках 3.11 і 3.12. Узагальнення отриманих результатів виконано у вигляді граничних характеристик генератора, представлених на рисунку 3.13.

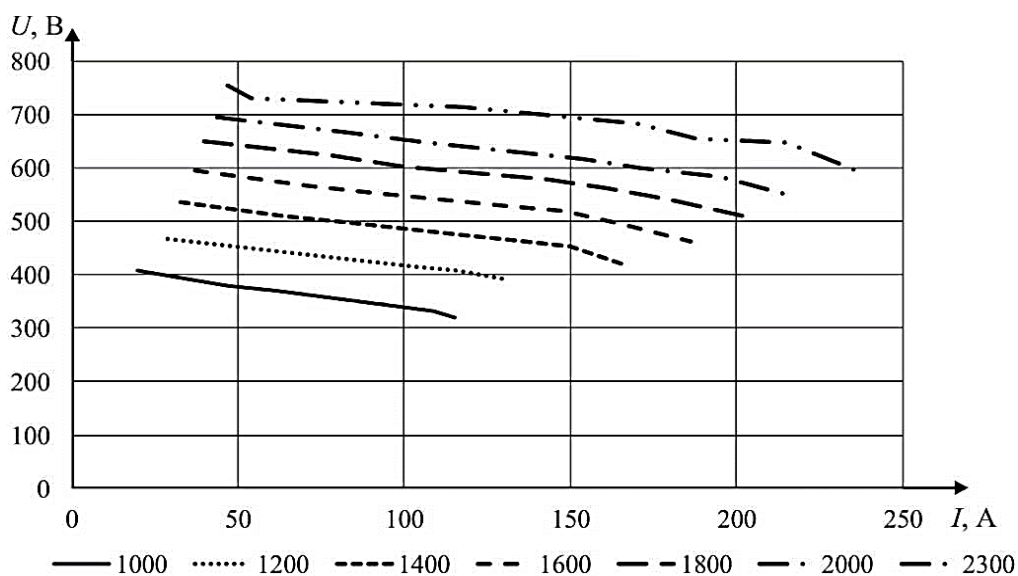


Рисунок 3.10 - Навантажувальні характеристики ВІГ КЗ

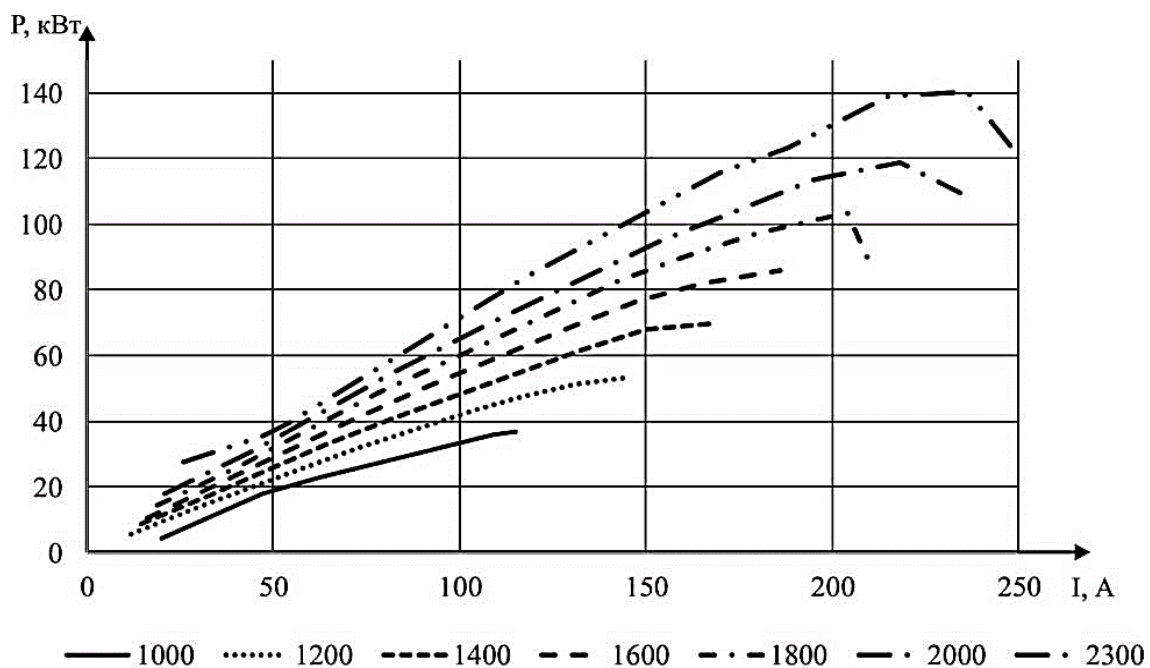


Рисунок 3.11 - Залежність потужності від струму навантаження ВІГ КЗ

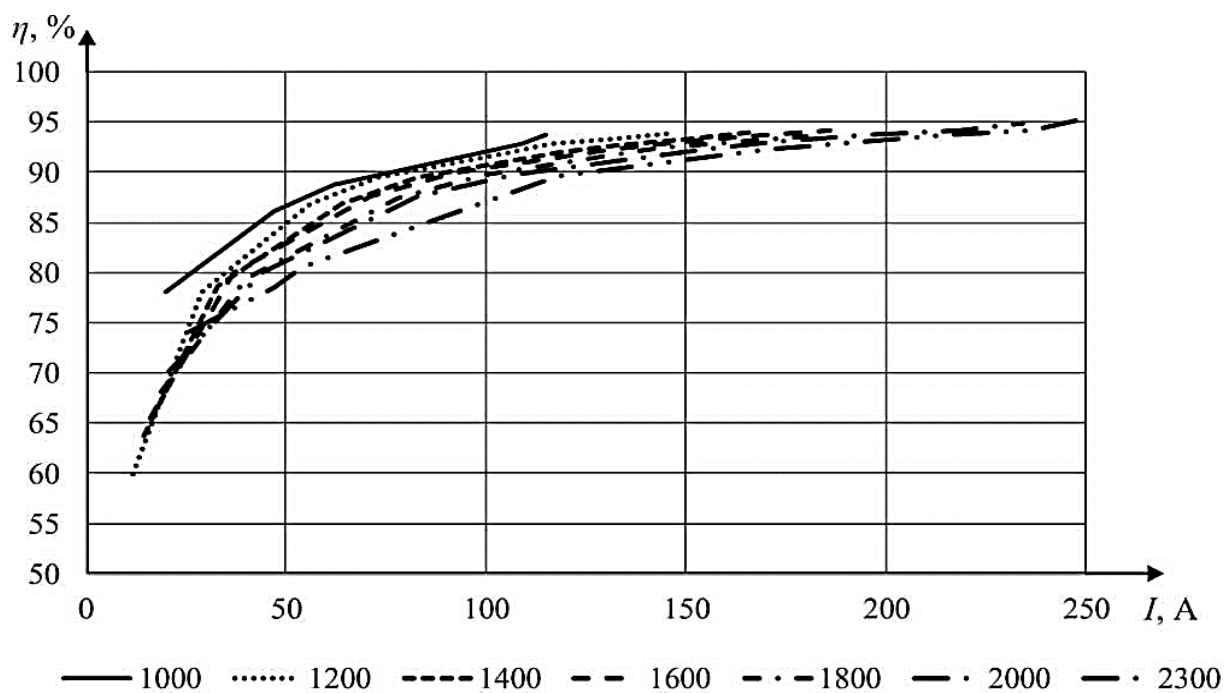


Рисунок 3.12 - Залежність ККД від струму навантаження ВІГ КЗ

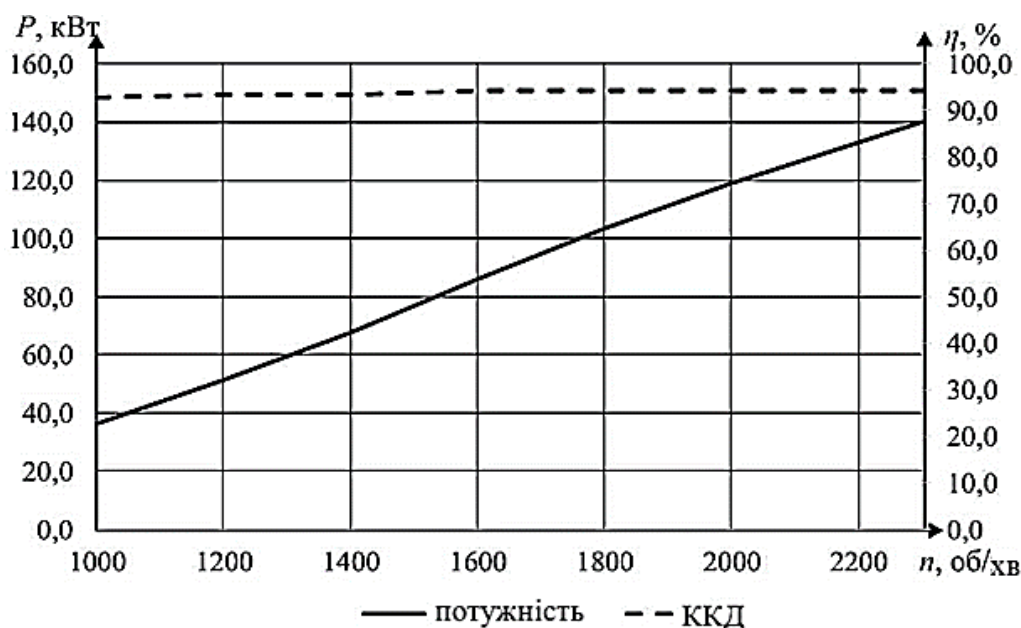


Рисунок 3.13 - Граничні характеристики ВП КЗ: потужність та ККД

Для досліджуваного генератора характерною особливістю є різке пом'якшення навантажувальної характеристики після досягнення певного значення струму навантаження. Найбільш виразно цей ефект проявляється на графіках навантажувальних характеристик генератора, що працює спільно із системою керування, де зазначена зміна має ще більш виражений характер.

Вказані робочі точки одночасно відповідають режимам, у яких генератор віддає максимальну потужність. Подальше збільшення струму навантаження призводить не до зростання, а до зменшення вихідної потужності. Саме для таких точок, у яких на навантажувальній характеристиці спостерігається перелом кривої, побудовано граничні характеристики генератора.

Слід зазначити, що в зазначених режимах коефіцієнт корисної дії системи становить близько 94 %, що свідчить про достатньо високий рівень енергетичної ефективності електромеханічного перетворення. За подальшого збільшення струму навантаження процес генерування електричної енергії повністю припиняється.

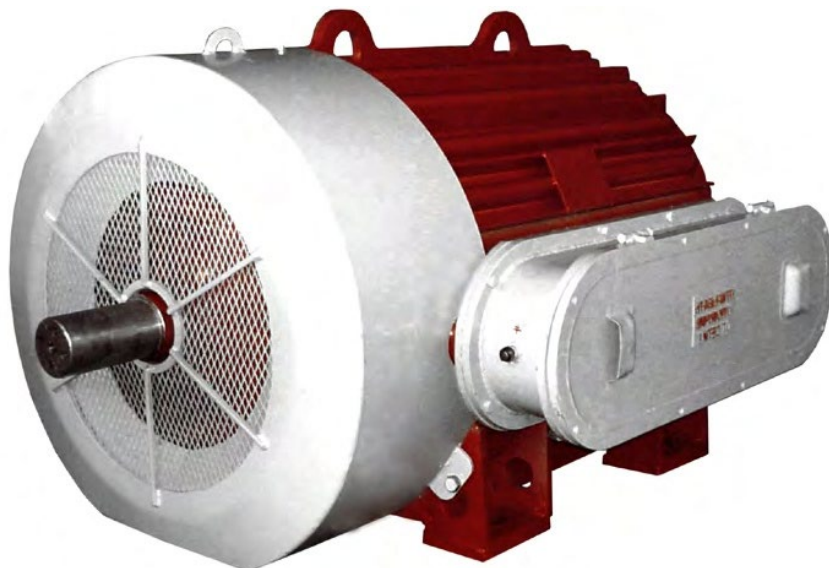
З одного боку, така властивість може розглядатися як обмежувальний чинник, оскільки потребує контролю струму навантаження та узгодження режимів роботи генератора із зовнішнім електричним колом. З іншого боку, вона

має важливу захисну функцію: у разі короткого замикання з боку навантаження генератор не переходить у небезпечний аварійний режим, а припиняє вироблення електричної енергії. Це підвищує експлуатаційну безпеку системи та зменшує ризик пошкодження її елементів..

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4. 1. Загальні положення

Експлуатація вентильних генераторів пов'язана з впливом комплексу небезпечних та шкідливих виробничих факторів, зумовлених наявністю електричного струму високої напруги, частин, що обертаються, підвищеного рівня електромагнітних полів, вібрації, шуму, а також можливістю виникнення аварійних режимів роботи обладнання. У зв'язку з цим забезпечення вимог охорони праці під час експлуатації вентильних генераторів є найважливішим завданням для забезпечення безпеки обслуговуючого персоналу та надійності роботи енергетичних установок.



Вентильні генератори широко застосовуються в автономних енергетичних системах, вітроенергетичних установках, електротранспорті, авіаційній та промисловій енергетиці завдяки високій ефективності, надійності та можливості роботи в широкому діапазоні швидкостей обертання. Однак використання напівпровідникових перетворювачів, систем збудження та автоматичного регулювання висуває підвищені вимоги до організації безпечної експлуатації обладнання.

Основними нормативними документами, що регламентують вимоги охорони праці під час експлуатації електричних машин та перетворювальної техніки, є:

Правила влаштування електроустановок (ПУЕ);

Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів;

Правила безпечної експлуатації електроустановок;

«Електробезпека. Загальні вимоги»;

«Шум. Загальні вимоги безпеки»;

«Вібраційна безпека».

Дотримання цих нормативних документів забезпечує зниження ймовірності виробничого травматизму та аварійних ситуацій.

4.2. Небезпечні та шкідливі виробничі фактори

Під час експлуатації вентильних генераторів на обслуговувальний персонал можуть впливати небезпечні та шкідливі виробничі фактори, зумовлені особливостями конструкції електричної машини, наявністю силових напівпровідникових елементів, високих рівнів напруги і струму, а також режимами роботи електротехнічної системи.

4.2.1. Електричний струм

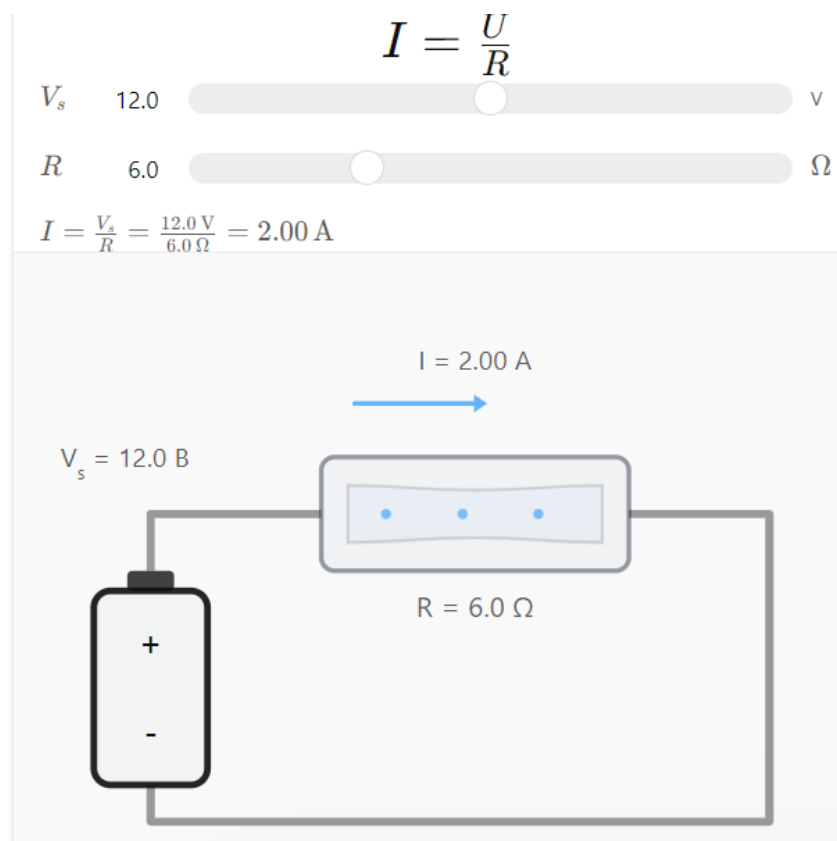
Одним із найбільш небезпечних виробничих факторів під час експлуатації вентильних генераторів є дія електричного струму на організм людини. Вентильні генератори можуть працювати у колах постійного та змінного струму, у яких рівень напруги, залежно від призначення та режиму роботи установки, може досягати сотень або тисяч вольт.

Небезпека ураження електричним струмом виникає у таких випадках:
випадковий або вимушений дотик персоналу до струмовідних частин;
пошкодження або старіння електричної ізоляції;

пробій силових напівпровідникових елементів;
 порушення правил безпечного виконання ремонтних і налагоджувальних робіт;
 відсутність, несправність або недостатня ефективність захисного заземлення;
 недотримання вимог щодо знеструмлення обладнання перед проведенням технічного обслуговування.

Ступінь небезпеки ураження електричним струмом залежить від значення напруги, сили струму, тривалості його дії, шляху проходження струму через тіло людини, стану шкіри, вологості навколишнього середовища та загального технічного стану електрообладнання. Тому під час експлуатації вентильних генераторів необхідно забезпечувати справність ізоляції, надійне заземлення корпусів і відкритих провідних частин, застосування захисної апаратури, а також суворе дотримання вимог електробезпеки обслуговувальним персоналом.

приклад



При пробі ізоляції статора корпус генератора може бути під напругою. Якщо захисне заземлення відсутнє, то дотик оператора до корпусу призведе до проходження електричного струму через тіло людини.

4.2.2. Електромагнітні поля

Під час роботи вентильного генератора формуються електромагнітні поля, зумовлені протіканням струмів в обмотках електричної машини, роботою силових напівпровідникових перетворювачів, а також комутаційними процесами в електричних колах. Інтенсивність електромагнітного поля залежить від режиму навантаження генератора, частоти комутації силових елементів, рівня струмів, конструктивного виконання машини та ефективності електромагнітного екранування.

Тривала дія електромагнітних полів підвищеної інтенсивності може негативно впливати на функціональний стан персоналу та спричиняти:

- підвищену втомлюваність;
- головний біль;
- зниження концентрації уваги;
- погіршення загального самопочуття;
- порушення функціонування серцево-судинної системи за тривалого або інтенсивного впливу.

Особливо значний рівень електромагнітних завад може виникати під час роботи імпульсних перетворювачів частоти, силових транзисторів IGBT, діодних і тиристорних вузлів, що функціонують у режимах швидкої комутації струмів і напруг. Такі процеси супроводжуються виникненням високочастотних складових електромагнітного поля та можуть створювати додаткові перешкоди для роботи електронних систем керування, вимірювальної апаратури й засобів автоматики.

Для зниження рівня впливу електромагнітних полів на персонал та обладнання доцільно застосовувати такі технічні й організаційні заходи:

екранування силових електричних кіл, кабельних трас і блоків перетворювачів;

надійне захисне та функціональне заземлення електрообладнання;

використання фільтрів електромагнітних завад;

раціональне компонування силових і сигнальних кіл;

застосування дистанційного керування та моніторингу;

обмеження часу перебування персоналу в зонах підвищеного електромагнітного впливу;

періодичний контроль рівнів електромагнітних полів на робочих місцях.

4.2.3. Механічні небезпеки

Вентильний генератор як електромеханічний перетворювач енергії містить рухомі та обертові елементи, які можуть становити потенційну небезпеку для обслуговувального персоналу. До таких елементів належать:

ротор;

вал генератора;

муфти та з'єднувальні елементи;

вентилятори системи охолодження;

інші елементи механічної передачі або приводу.

Механічна небезпека виникає внаслідок високої частоти обертання зазначених елементів, можливого порушення їх балансування, зношування підшипникових вузлів, ослаблення кріплень, руйнування муфт або потрапляння сторонніх предметів у зону обертання. Такі фактори можуть призвести до травмування персоналу, пошкодження обладнання або виникнення аварійних

режимів

роботи

установки.



Небезпеку становлять:

- захоплення одягу елементами, що обертаються;
- руйнування ротора;
- механічні удари;
- виліт кріпильних елементів

4.2.4. Шум та вібрація

Під час експлуатації вентильного генератора можливе виникнення підвищених рівнів шуму та вібрації, що зумовлено як електромагнітними, так і механічними процесами в електромеханічній системі.

Основними джерелами шуму є:

- підшипникові вузли;
- вентилятори системи охолодження;
- змінні електромагнітні сили;
- механічний дисбаланс ротора;
- робота елементів силової електроніки та системи керування.

Підвищений рівень шуму негативно впливає на умови праці персоналу та може спричиняти зниження слуху, підвищену втомлюваність, погіршення

концентрації уваги й зниження працездатності. Допустимий рівень шуму на робочих місцях, як правило, не повинен перевищувати 80 дБ, якщо інше не встановлено чинними нормативними документами для конкретних умов експлуатації.

Вібрація генератора може призводити до послаблення або руйнування кріпильних елементів, прискореного зношування підшипників, порушення центрування валів, погіршення технічного стану обладнання та зниження безпечності експлуатації. Для зменшення рівня вібрації застосовують балансування ротора, віброізолювальні елементи, демпфувальні опори, контроль стану підшипників і регулярну діагностику механічних вузлів.

4.3. Вимоги безпеки перед початком роботи

Перед введенням вентильного генератора в експлуатацію необхідно виконати комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечної роботи обладнання та запобігання аварійним режимам.

4.3.1. Огляд обладнання

Перед запуском генератора необхідно перевірити:

- стан електричної ізоляції обмоток і кабельних ліній;
- справність захисного заземлення;
- відсутність механічних пошкоджень корпусу;
- надійність кріплення генератора та з'єднувальних елементів;
- стан кабельних з'єднань і контактних вузлів;
- справність системи вентиляції та охолодження;
- відсутність сторонніх предметів у зоні обертання рухомих частин.

Якщо опір ізоляції обмоток статора є нижчим за нормативно допустиме значення, експлуатація генератора забороняється до повного усунення несправності. Контроль опору ізоляції здійснюють за допомогою мегомметра відповідно до встановленої методики вимірювання.

4.3.2. Перевірка захисних пристроїв

Перед початком роботи обов'язково перевіряють справність захисних і комутаційних пристроїв, зокрема:

- автоматичних вимикачів;
- пристроїв захисного відключення;
- реле перевантаження;
- систем аварійної зупинки;
- температурного захисту;
- пристроїв контролю ізоляції та заземлення.

Експлуатація вентильного генератора за наявності несправних або відключених захисних пристроїв не допускається, оскільки це може призвести до ураження персоналу електричним струмом, пошкодження обладнання або виникнення пожежі.

4.3.3. Допуск персоналу

До експлуатації вентильних генераторів допускаються особи, які:

- досягли 18-річного віку;
- пройшли попередній медичний огляд;
- пройшли навчання та інструктаж з охорони праці;
- володіють безпечними методами виконання робіт;
- мають відповідну групу з електробезпеки;
- ознайомлені з інструкціями з експлуатації конкретного обладнання.

Для виконання робіт в електроустановках напругою понад 1000 В персонал повинен мати групу з електробезпеки не нижче III–IV залежно від характеру робіт, рівня відповідальності та умов експлуатації.

4.4. Вимоги охорони праці під час роботи

Під час експлуатації вентильного генератора персонал зобов'язаний дотримуватися встановлених вимог охорони праці, правил електробезпеки та інструкцій з експлуатації обладнання.

4.4.1. Контроль робочих параметрів

У процесі роботи генератора необхідно здійснювати постійний або періодичний контроль основних робочих параметрів, зокрема:

- струму статора;
- вихідної напруги;
- температури обмоток;
- температури силових напівпровідникових елементів;
- частоти обертання ротора;
- рівня вібрації;
- стану системи охолодження;
- параметрів навантаження.

Перегрівання обмоток є однією з найпоширеніших причин аварійних режимів роботи електричних машин. Зростання струму призводить до збільшення теплових втрат в обмотках, оскільки втрати в провідниках пропорційні квадрату струму. Зокрема, збільшення струму вдвічі спричиняє зростання теплових втрат приблизно у чотири рази, що може викликати прискорене старіння ізоляції та пошкодження обмоток.

4.4.2. Заборонені дії

Під час роботи вентильного генератора забороняється:

- торкатися струмовідних частин;
- знімати захисні кожухи та огороження під час роботи обладнання;
- виконувати ремонтні або налагоджувальні роботи без знеструмлення;
- використовувати несправний або неперевірений інструмент;

- залишати відкритими розподільні шафи та силові блоки;
- відключати або блокувати захисні пристрої;
- допускати сторонніх осіб до зони експлуатації обладнання.

Дотримання цих вимог є необхідною умовою запобігання електротравмам, механічним ушкодженням, аварійним режимам і пошкодженню електротехнічної системи.

4.4.3. Використання засобів індивідуального захисту

Обслуговувальний персонал повинен застосовувати засоби індивідуального захисту відповідно до характеру виконуваних робіт і рівня небезпеки. До таких засобів належать:

- діелектричні рукавички;
- захисні окуляри або щитки;
- захисні каски;
- спеціальний одяг;
- діелектричні килимки;
- захисне взуття;
- ізольований інструмент.

За підвищеного рівня шуму персонал повинен використовувати протишумні навушники або інші засоби захисту органів слуху. Засоби індивідуального захисту мають бути справними, перевіреними та відповідати умовам експлуатації електроустановки.

4.5. Пожежна безпека

Вентильні генератори містять електроізоляційні матеріали, обмотки, силові напівпровідникові елементи, конденсатори та інші компоненти електричних кіл, що за несприятливих умов може підвищувати ризик

виникнення пожежі. Особливу небезпеку становлять аварійні режими, пов'язані з перегріванням, короткими замиканнями та порушенням роботи системи охолодження.

Основними причинами виникнення пожежі можуть бути:

- коротке замикання в обмотках або зовнішніх електричних колах;
- перегрівання обмоток електричної машини;
- пробій силових напівпровідникових елементів;
- іскріння або перегрів контактних з'єднань;
- порушення роботи вентиляції або системи охолодження;
- пошкодження електричної ізоляції;
- перевантаження генератора.

4.5.1. Засоби пожежогасіння

Для гасіння електроустаткування застосовують засоби пожежогасіння, придатні для роботи з електроустановками, зокрема:

- вуглекислотні вогнегасники;
- порошкові вогнегасники;
- автоматичні системи пожежогасіння;
- стаціонарні системи пожежної сигналізації та аварійного відключення живлення.

Використання води або пінних засобів для гасіння електроустановок, що перебувають під напругою, забороняється. Перед початком гасіння, за можливості, необхідно знеструмити обладнання та забезпечити безпечний доступ до осередку загоряння.

4.5.2 Приклад аварійної ситуації

При виході з ладу системи охолодження температура силових модулів IGBT може перевищити допустиме значення, що призводить до теплового пробою та займання.

Для запобігання подібним аваріям встановлюються:
температурні датчики;
системи аварійного вимкнення;
вентиляційний контроль.

4.6. Висновки

Охорона праці під час експлуатації вентильних генераторів є найважливішим елементом забезпечення надійної та безпечної роботи енергетичного устаткування. Основну небезпеку становлять електричний струм, частини, що обертаються, електромагнітні поля, шум, вібрація і можливість виникнення аварійних режимів.

Для запобігання виробничому травматизму необхідно суворо дотримуватись вимог нормативної документації, забезпечувати справність захисних систем, проводити регулярне технічне обслуговування та навчання персоналу.

Застосування сучасних систем діагностики, автоматичного контролю та захисних пристроїв дозволяє значно підвищити рівень безпеки експлуатації вентильних генераторів та знизити ймовірність аварійних ситуацій.

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження дозволяють сформулювати такі основні результати та висновки:

1. Для аналізу електромагнітних процесів у вентильному індукторному генераторі нової конструкції, призначеному для роботи у складі вітроенергетичних установок, а також для вирішення завдань його проектування були отримані аналітичні системи рівнянь, що стали основою побудови математичної моделі.

2. На базі виведених систем рівнянь розроблено методику попередньої оцінки потужності та визначення параметрів елементів ланцюга збудження нової електротехнічної системи, що включає вентильний індукторний генератор з конденсаторним збудженням, а також сформульовані рекомендації щодо її проектування.

3. З використанням сучасних обчислювальних засобів, зокрема програмно-обчислювального комплексу ANSYS, створено динамічну математичну модель вентильного індукторного генератора з конденсаторним збудженням, засновану на кінцево-елементному підході. Ця модель враховує спільне функціонування електричної машини, електричних та електронних компонентів системи. Застосування комп'ютерної моделі дозволило докладно дослідити електромагнітні процеси, що протікають як у самій електричній машині, так і в електричній схемі системи за різних режимів роботи.

4. Запропоновано простий та ефективний спосіб управління вихідними параметрами вітрогенераторів на основі вентильного індукторного генератора з новою принциповою схемою. Даний спосіб заснований на застосуванні тиристорів для регулювання струму збудження шляхом зміни співвідношення між інтервалами напруги до тиристорів і інтервалами проходження струму через них. Це дозволило виключити перезбудження генератора, знизити втрати в обмотках, підвищити коефіцієнт корисної дії системи на 5–25 % залежно від режиму роботи та забезпечити стабільне значення вихідної напруги у широкому діапазоні зміни навантаження та швидкості обертання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лущик В.Д. Вентильні генератори індукторного типу з суміщеними обмотками // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. – 2020. – № 84. – С. 129–130.
2. Лущик В.Д., Гречко М.В. Дослідження індукторного генератора з несиметричною суміщеною обмоткою // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – 2012. – № 14. – С. 49–52.
3. Law J. Magnetic Circuit Modeling of the Field Regulated Reluctance Machine, Part II: Saturation Modeling and Results / J. Law, T. Busch, T. Lipo // IEEE Transaction on Energy Conversion. – 2016. – JSTol. – Vol. 1. – P.56 – 62.
4. Matsuo T. Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine /T. Matsuo, T. Lipo // IEEE Transaction on Energy Conversion. – 2014. – № 22. – Vol. 9.– P. 359 – 365.
5. Toliyat H. Simulation and Detection of Dynamic Air-Gap Eccentricity in Salient-Pole Synchronous Machines / H. Toliyat, N. Al-Nuaim // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1999. – Vol. 35. – № 1. – P. 86 – 93.
6. Toliyat H. Analysis and Simulation of Five Phase Synchronous Reluctance Machines Including Third Harmonic of Air-Gap MMF / H. Toliyat, S. Waikar, T. Lipo // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2018. – Vol. 34. – № 2. – P. 332 – 339.
7. Arefeen M. An Analysis of the Accuracy of Indirect Shaft Sensor for Synchronous Reluctance Machine / M. Arefeen, M. Ehsani, T. Lipo // IEEE Transaction on Industry Application. – 1994. – Vol. 30. – № 5,6. – P. 1202 – 1209.
8. Hopper E. The Development of SRM Applications. / E. Hopper // PCIM Europe. -Sept./Oct., 2015. – P. 236 – 241.
9. Lawrenson P. Variable-Speed Switched Reluctance Motors / P. Lawrenson // IEEE Proc. – Vol. 127. – July 1980. – Vol. 127. – № 24.
10. Matsuo T. Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine / T. Matsuo, T. Lipo // IEEE Transaction on Energy Conversion. – 2024. – № 2. – Vol.

9. – Р. 359 – 365.

11. Thomas A. Sutrina, David W. Variable reluctance alternating current generator // United States Patent №5780997. 2018

12. Афонін А. А., Крамаж В., Цежневський П. Синхронні дискові електродвигуни із постійними магнітами. Технічна електродинаміка. 2000. № 5. С. 40 - 44.

13. Афонін А.А. Електромагнітні навантаження електричних машин з постійними магнітами. Технічна електродинаміка. 2005. № 1. С. 39 - 46.

14. Афонін А.А., Гребеніков В.В., Цежневський П. Особливості топології магнітоелектричних дискових електродвигунів. Технічна електродинаміка. 1999. № 1. 3. 50 – 58.

15. Васько П.Ф. Сучасний стан, потенційні можливості та передумови подальшого розвитку малої гідроенергетики в Україні. Відроджується енергетика. 2006. №1. С. 60-66.

16. Васько П.Ф., Віхорєв Ю.О. Мала гідроенергетика: світові тенденції розвитку та українські перспективи. Електропанорама. 2009. №11. 3. 59 – 61.

17. Васьковський Ю.М. Математичне моделювання електромеханічних перетворювачів енергії. Київ: НТУУ "КПІ", 2003. 161 с.

18. Вишневський Л. В., Веретенник А. М., Тумольський А.П. Поліпшення динамічних характеристик системи регулювання напруги синхронного генератора. Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2014. № 16. С . 48 – 53.

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

Вентильний індукторний вітрогенератор потужністю 130 кВт з конденсаторним збудженням

**Виконав: студент 4 курсу,
групи НВДЕ-2022
К.А. Данилюк**

Керівник: доц. О.Б. Єгоров

Цілі та завдання проєктування

Розробити математичний опис електромагнітних процесів, що протікають у математичній моделі, яка враховує спосіб збудження якірних обмоток, та запропонувати інженерну методику проєктування.

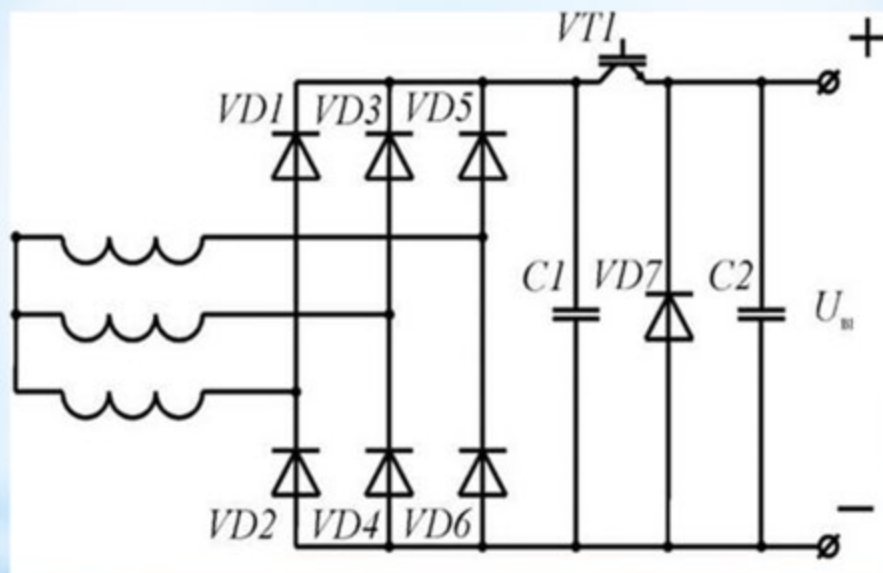
Провести синтез комп'ютерної моделі на базі кінцево-елементного методу для дослідження працездатності та якості функціонування системи у різних режимах при різноманітних зовнішніх впливах.

Розглянути питання Охорони праці при експлуатації вентильних індукторних вітрогенераторів

Електричні генератори, що застосовуються в автономних енергетичних установках

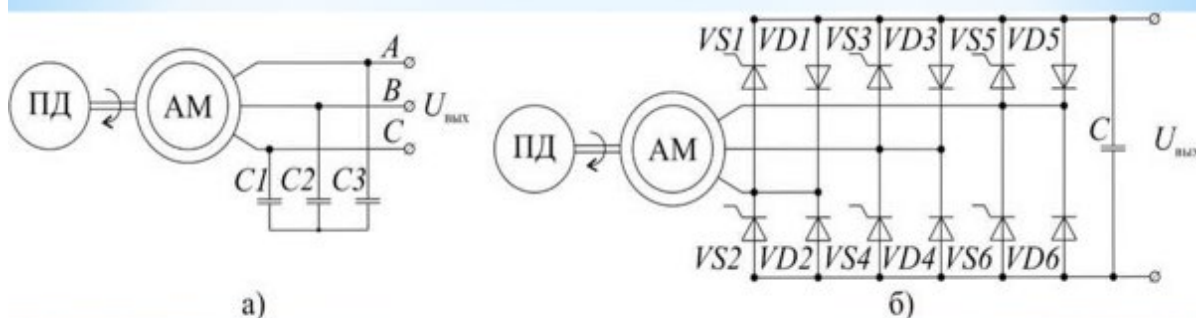


Вентильні генератори постійного струму



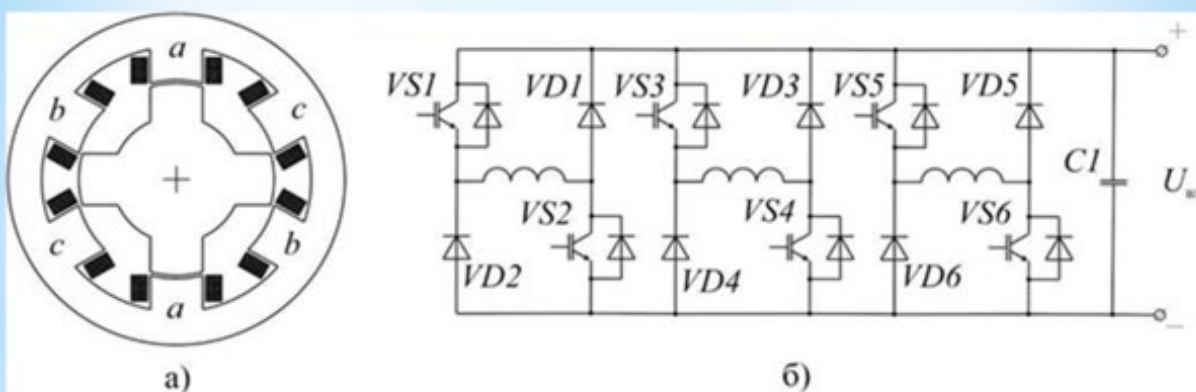
Вентильний генератор з імпульсним комутатором

Асинхронні генератори з конденсаторним збудженням



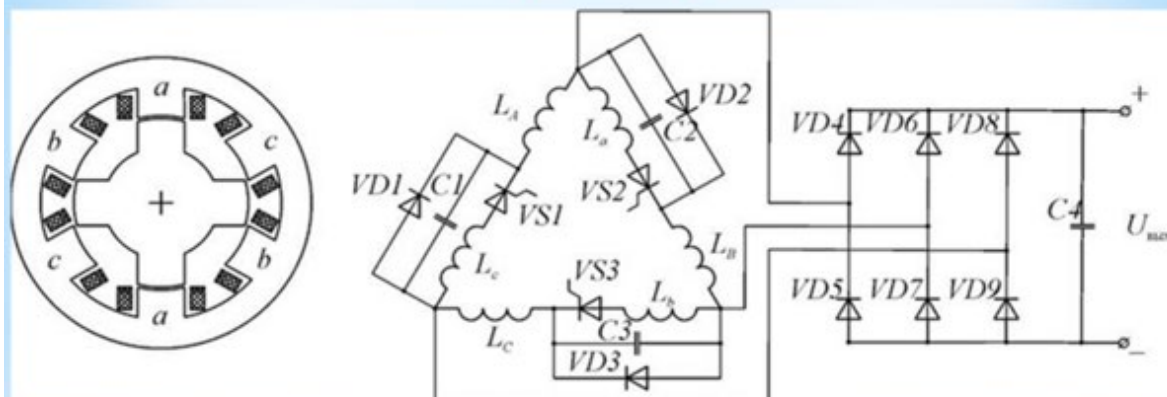
- а) асинхронний генератор з конденсаторним збудженням,
 б) асинхронний генератор з вентильним збудженням

Вентильні індукторні машини з самозбудженням



- а) переріз трифазного вентильного генератора індукторного 6/4,
 б) силова електрична схема трифазного вентильного індукторного генератора

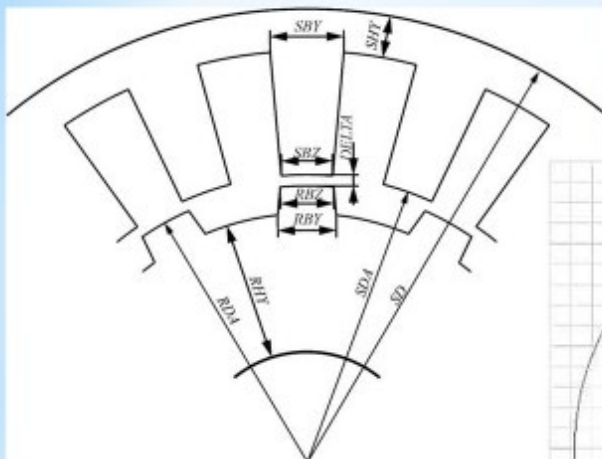
Вентильний індукторний генератор із конденсаторним збудженням



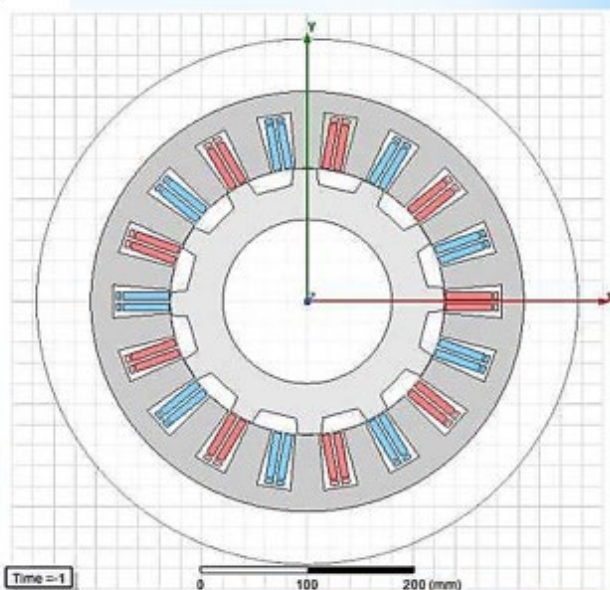
а) Магнітна система

б) Електрична схема вентильного індукторного генератора з конденсаторним збудженням

Математична модель ВІГ КЗ у ANSYS

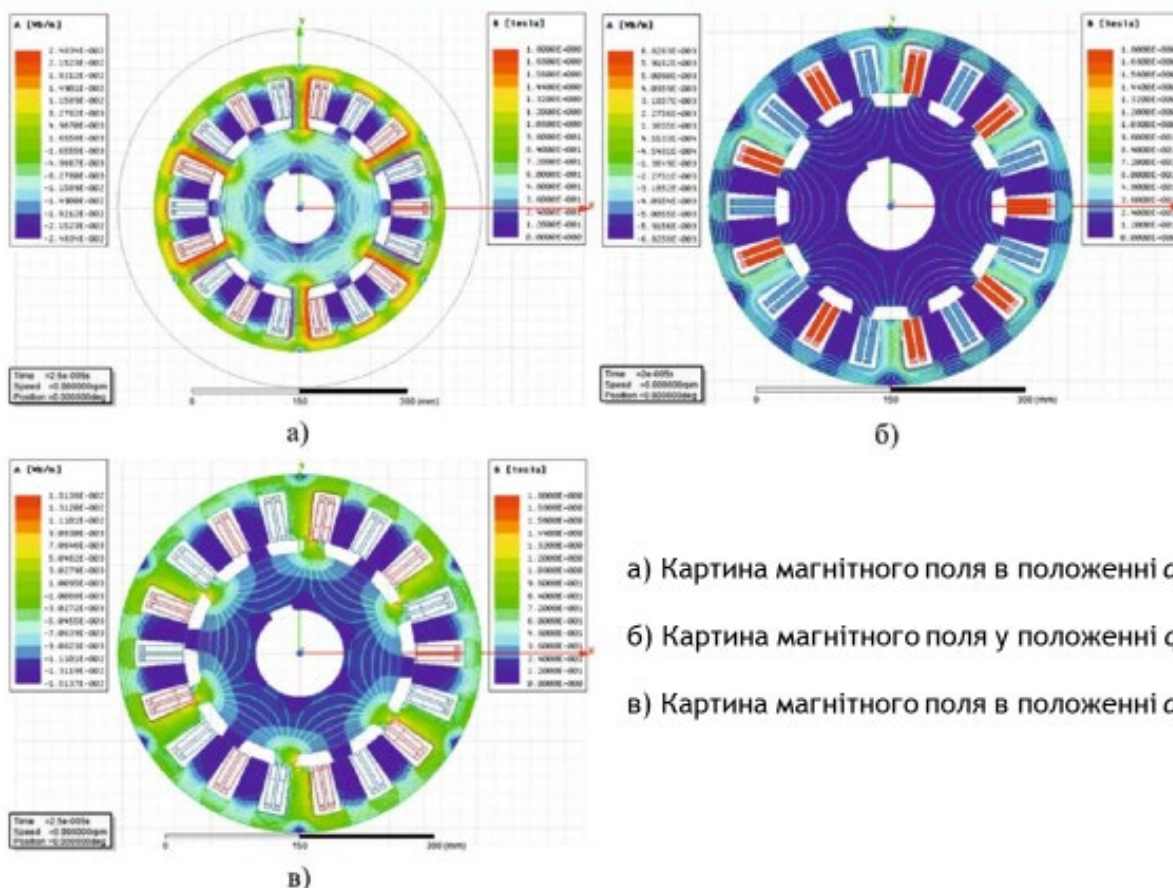


Основні геометричні параметри



Модель електричної машини в ANSYS Maxwell

Моделювання статичного магнітного поля електричної машини



Висновки по роботі

1. Для аналізу електромагнітних процесів у вентильному індукторному генераторі нової конструкції, призначеному для роботи у складі вітроенергетичних установок, були отримані аналітичні системи рівнянь, що стали основою побудови математичної моделі.
2. Розроблено методику попередньої оцінки потужності та визначення параметрів елементів ланцюга збудження.
3. З використанням програмно-обчислювального комплексу ANSYS створено динамічну математичну модель вентильного індукторного генератора з конденсаторним збудженням, засновану на кінцево-елементному підході. Застосування комп'ютерної моделі дозволило докладно дослідити електромагнітні процеси, що протікають як у самій електричній машині, так і в електричній схемі системи за різних режимів роботи.
4. Проаналізовані питання охорони праці при експлуатації вентильних генераторів.