

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра електромеханіки

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

В. о. завідувача кафедри

Михайло КОВАЛЕНКО

підпис

ініціали, прізвище

«19» грудня 2025 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 141, Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

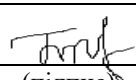
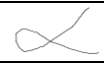
(код і назва)

освітньої програми Електричні машини і апарати

(назва)

на тему: Удосконалення конструкції демпферної обмотки потужного
синхронного генератора

Виконав: студент 2 курсу, групи ЕМ-41мп

Бондарук Максим Сергійович		
(прізвище, ім'я, по батькові)		
Керівник	доцент, к.т.н., Олександр ГЕРАСКІН	
	(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)	

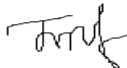
Рецензент к.т.н., ст. викл. Желінський Микола Миколайович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

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

Студент



(підпис)

Київ – 2025 рік

3. Вихідні дані до роботи синхронний генератор потужністю 500 кВт, число полюсів $2p=6$, число фаз $m=3$, частота мережі $f=50$ Гц.

4. Зміст дипломної роботи (перелік завдань, які потрібно розробити).
 5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) презентація з 20 слайдів
 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 09.09.2024

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1 Сучасний стан проблеми оптимізації конструкції демпферної обмотки ротора синхронного генератора.	10.09.2025	виконано
2	Розділ 2 Математичне моделювання варіантів конструкції демпферної обмотки потужного синхронного генератора.	13.10.2025	виконано
3	Розділ 3 Дослідження конструкцій демпферної обмотки потужного синхронного генератора.	10.11.2025	виконано
4	Оформлення роботи, узагальнення висновків.	12.12.2025	виконано

Студент



(підпис)

Максим БОНДАРУК

(ініціали, прізвище)

Керівник роботи



(підпис)

Олександр ГЕРАСКІН

(ініціали, прізвище)

Реферат

Дана магістерська робота має обсяг 106 сторінки, містить 63 ілюстрацій, 6 таблиць. При виконанні дослідження було використано 19 літературних джерел, посилання на які наведені у списку використаної літератури.

Ключові слова: синхронний генератор, статичний ексцентриситет, динамічний ексцентриситет, демпферна обмотка, демпфувальний момент, оптимізація конструкції.

Метою роботи є оптимізація конструкції демпферної обмотки синхронного генератора шляхом зміни її геометричної форми та аналізу впливу цих змін на величину демпфувального моменту.

Об'єкт дослідження: синхронний генератор СГ-500.

У дисертації проведено порівняльний аналіз декількох варіантів геометричного виконання демпферної обмотки. Для кожної модифікації побудовано модель, що дозволяє визначити її вплив на демпфувальний момент. Отримані результати дали змогу оцінити ефективність кожної конструкції та визначити оптимальний варіант, який забезпечує покращені динамічні властивості генератора.

ABSTRACT

This master's thesis consists of 107 pages, contains 63 illustrations and 6 tables, 19 literary sources were used in the research, references to which are given in the list of references.

Keywords: synchronous generator, static eccentricity, dynamic eccentricity, damper winding, damping torque, design optimisation.

The aim of the work is to optimise the design of the damper winding of a synchronous generator by changing its geometric shape and analysing the effect of these changes on the damping torque.

Object of research: SG-500 synchronous generator.

The dissertation provides a comparative analysis of several options for the geometric design of the damper winding. A model was constructed for each modification to determine its effect on the damping torque. The results obtained made it possible to evaluate the effectiveness of each design and determine the optimal option that provides improved dynamic properties of the generator.

ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних позначень, термінів	8
Вступ.....	9
Розділ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ Демпферної Обмотки РОТОРА Синхронного Генератора.....	
1.1 Огляд сучасної проблематики стосовно удосконалення конструкції ДО явнополюсних синхронних машин.....	12
1.2 Аналіз конструктивних особливостей демпферних обмоток явнополюсних синхронних машин	13
1.3 Вплив демпферної обмотки на динамічні та електромагнітні характеристики явнополюсних синхронних машин	17
1.4 Аналіз причин ушкоджень демпферних обмоток роторів СГ.....	19
1.5 Особливості режимів роботи СГ	30
1.6 Оптимізація конструкції ротора та демпферної обмотки СГ	35
1.7 Висновок до Розділу 1	40
Розділ 2 Математичне моделювання варіантів конструкції демпферної обмотки потужного синхронного генератора	
2.1 Паспортні дані досліджуваного синхронного генератора.....	41
2.2 Етап створення поперечного перерізу синхронного двигуна за допомогою програми AutoCad.....	42
2.3 Розробка математичної моделі для дослідження розглянутого явнополюсного синхронного генератора	50
2.4 Математична модель електромагнітних процесів в досліджуваного синхронного генератора.....	54
2.5 Висновки до Розділу 2	56
Розділ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ДЕМПФЕРНОЇ ОБМОТКИ ПОТУЖНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА	
3.1 Дослідження базової конструкції ДО синхронного генератора	59

3.2 Дослідження конструкції з прямокутним профілем витка ДО синхронного генератора	70
3.3 Дослідження конструкції із Г-подібним профілем витка ДО синхронного генератора	77
3.4 Дослідження конструкції із пластиною у третину повітряного проміжку ДО синхронного генератора	84
3.5 Аналіз та порівняння для всіх варіантів конструкцій ДО синхронного генератора.	91
3.6 Висновки до розділу 3	94
Розділ 4 Стартап-проект	99
4.1 Опис ідеї проекту	99
4.2 Порівняння витрат	99
4.3 Оцінка економічної вигоди	100
4.4 Оцінка окупності проекту	100
4.5 Висновки до розділу 4	101
Загальні висновки.....	102
Перелік посилань.....	105

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

ДО – демпферна обмотка

СГ – синхронний генератор.

СЕ – статичний ексцентриситет.

ДЕ – динамічний ексцентриситет.

СМ - синхронна машина

ЯСГ – явнополюсний синхронний генератор.

АР - асинхронний режим.

СКК - сегмент короткозамикаючого кільця

ККД - коефіцієнт корисної дії

ДСР- Демпферна система ротора

ЯСМ - явнополюсних синхронних машин

ВСТУП

Актуальність теми. Синхронні генератори становлять ключовий елемент електроенергетичних систем, оскільки виконують функцію перетворення механічної енергії в електричну. Вони забезпечують стабільне живлення електромережі, відіграючи важливу роль у безперебійному постачанні електроенергії споживачам.

Електроустановки та комплекси проходять через усі етапи функціонування – починаючи зі створення електричної енергії й закінчуючи доставкою споживачам. У цей замкнений ланцюг входять стадії генерації, перевезення, розподілу та подальшого застосування електроенергії для забезпечення потреб різноманітних груп споживачів, а саме: промисловості, бізнесу, населення, транспорту та багатьох інших секторів економіки

Виробництво електроенергії відбувається на електростанціях, де використовуються різні види палива: класичні ресурси (вугілля, газ, нафта, ядерне паливо) та альтернативні джерела (сонце, вітер, вода). Згенерована енергія трансформується у вигляді електричного струму завдяки генераторам і передається в загальну систему електропостачання для наступного розподілу.

Надійність та продуктивність синхронного генератора значною мірою обумовлені численними факторами, серед яких ключову роль відіграє конфігурація демпферних обмоток (ДО) роторів. Саме вони допомагають мінімізувати коливання швидкості обертання ротора, спричинені впливом зовнішності сил, або ж забезпечують старт синхронної машини як двигуна. Крім того, ДО сприяють зниженню вібрацій, які можуть виникати під час експлуатації генераторів.

Ця магістерська робота має на меті представити широкий спектр різноманітних типів конструкцій демпферних обмоток, дослідити їх електромагнітний момент, вдосконалити будову демпферної обмотки синхронної машини, ретельно вивчити типові конструктивні рішення, механізми дії та їхній вплив на продуктивність і стабільну роботу синхронних

генераторів, пояснити принципи функціонування, ефективність та надійність синхронних генераторів.

Потужні синхронні генератори часто страждають від ексцентриситету ротора, що негативно впливає на їхню працездатність та призводить до пошкодження демпферної обмотки, особливо під час асинхронної роботи, скорочуючи тим самим її ресурсі.

Загальна величина повітряного зазору синхронної машини значно менша за розміри ротора; навіть незначне зміщення ротора відносно центру статора спричиняє ексцентриситет. Ігнорування проблем із демпфером може мати наслідком серйозні тривалі поломки обладнання.

Мета. Оптимізація конструкції демпферної обмотки ротора синхронного генератора, з метою підвищення його надійності, енергоефективності та довговічності в умовах експлуатації.

Об'єкт дослідження. Електромагнітний момент і густини струмів в демпферній обмотці потужного синхронного генератора.

Предмет дослідження. Конструктивне виконання різноманітних типів демпферної обмотки ротора СГ за умови збереження постійності поперечного перерізу всіх стрижнів демпферної обмотки. Для кожного варіанту побудована модель для визначення демпфувального моменту, що дозволяє порівняти ефективність різних конструкцій і обрати оптимальну.

Методи дослідження. Моделювання розроблених конструкцій демпферних обмоток проводилося за допомогою програмних пакетів AutoCad, COMSOL Multiphysics задля здобуття необхідної інформації.

Наукова новизна

1. Створено та досліджено чотири різні способи конструювання демпферної обмотки ротора синхронного генератора СГ-500.
2. Побудована модель для визначення демпфувального моменту для кожного варіанту, що дозволяє оцінити ефективність конструкцій.
3. Встановлено вплив форми та геометричних параметрів стрижнів демпферної обмотки на величину демпфувального моменту, що дозволяє

обрати оптимальну конструкцію для підвищення динамічної стійкості генератора

Практична цінність отриманих результатів.

Результати, представлені в цій магістерській роботі, мають значну теоретичною цінність, адже вони надають можливість удосконалити конструкцію демпферних обмоток синхронних генераторів. З практичного погляду, дані цього дослідження можуть бути корисними для інженерів та виробників синхронних генераторів, допомагаючи їм піднести якість, тривалість служби й передовсім – надійність цих машин. Це, своєю чергою, сприятиме скороченню витрат на експлуатацію та відновлення обладнання, а також підвищенню його продуктивності.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем створено креслення та виконано математичні розрахунки густин струмів та електромагнітного моменту в ДО для різних варіантів конструкцій, також проаналізовано результати всіх досліджень.

Основні результати дослідження.

Розроблено й змодельовано чотири різні конфігурації демпферної обмотки ротора СГ-500; виконано аналіз демпфувального моменту для кожної з них, що дає змогу оцінити їхню продуктивність. Порівнявши отримані дані, було встановлено найкращий варіант форми демпферної обмотки, який гарантує найбільший демпфувальний ефект і посилює динамічну стабільність генератора. Ця модифікація сприятиме поліпшенню показників експлуатації генератора, зменшить ризик простоїв та необхідності ремонту, а отже – збільшить термін його безперебійної роботи.

Публікації. За темою роботи опубліковано 3 статті [17, 18, 19].

РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ ДЕМПФЕРНОЇ ОБМОТКИ РОТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

1.1 Огляд сучасної проблематики стосовно удосконалення конструкції ДО явнополюсних синхронних машин.

У зв'язку зі змінами в сучасній енергетиці, зростають потреби у високій надійності, здатності до швидкої реакції та продуктивності синхронних генераторів, особливо явнополюсного типу. Важливим структурним компонентом, який гарантує стабільність обладнання під час нестабільної роботи, є демпферна обмотка. Ця обмотка приглушує вібрації ротора, зменшує пульсації електромагнітного моменту та забезпечує синхронізацію під час пуску й аварійних режимів. З огляду на це, пошук шляхів покращення її будови зберігає свою важливість протягом багатьох років.

Проблематика модернізації демпферної системи викликана кількома групами чинників. У багатьох типах синхронних машин спостерігається нерівномірність розподілу струмів у стрижнях демпферної клітки, що призводить до підвищених втрат, їх локального перегрівання та зниження ресурсу експлуатації. Крім того, класичні матеріали для стрижнів демпферної обмотки (мідь або бронза), хоч і мають високу електропровідність, можуть бути недостатньо міцними, особливо у великогабаритних машинах, де присутні суттєві електромагнітні навантаження [14].

Іншою групою проблем є оптимізація форми демпферної обмотки. Конструкція пазів, форма стрижнів, метод кріплення та глибина залягання – все це визначає ефективність гасіння коливань, якість перехідних процесів та величину електромагнітних втрат. Метою поточних наукових розробок є визначення оптимальних конфігурацій, які б гарантували мінімальні пульсації моменту та рівномірний розподіл струму по демпферних елементах під різними умовами експлуатації генератора [2].

Важливо окремо підкреслити потребу в покращенні енергоефективності. Значні втрати в демпферній клітці та полюсних наконечниках можуть негативно впливати на загальну ефективність синхронної машини, особливо в умовах нестабільності. Відповідно, сучасні дослідження зосереджені на використанні інноваційних матеріалів з поліпшеними електромеханічними властивостями, мінімізації вихрових струмів та оптимізації відведення тепла.

Додатково, використання цифрового моделювання— істотно розширило потенціал вивчення демпферних обмоток. Це дозволяє оцінювати їхню роботу в різних сценаріях, оптимізувати структуру без необхідності проведення витратних фізичних тестів і прискорювати пошук ефективних інженерних рішень [15].

Таким чином, сучасна проблематика вдосконалення демпферної обмотки для синхронних машин з явними полюсами включає в себе підвищення надійності, зменшення втрат енергії, оптимізацію розподілу струму та тепла, застосування новітніх матеріалів та використання передових методів комп'ютерного моделювання. Вирішення цих завдань має вирішальне значення для покращення ефективності та продовження терміну служби сучасних синхронних генераторів.

1.2 Аналіз конструктивних особливостей демпферних обмоток явнополюсних синхронних машин

Демпферна система ротора (ДСР) для явнополюсних синхронних машин (ЯСМ) відіграє ключову роль у забезпеченні стабільної працездатності обладнання, фіксуючи його в синхронному ритмі навіть при несподіваних впливах – коливаннях напруги електроживлення чи навантаження на валу ротора, тимчасовій перерві в подачі струму до обмотки збудження та інше. При цьому, ДСР поглинає коливання швидкості обертання ротора, спричинені цими факторами, і здатна підтримувати функціонування ЯСМ у режимі асинхронної роботи протягом короткого періоду часу, якщо машина ненадовго втратить синхронізацію [9].

Будова демпферної обмотки є надзвичайно важливим компонентом ротора синхронної машини з явними полюсами, оскільки від її параметрів залежить працездатність генератора під час перехідних процесів, його стійкість до раптових змін навантаження та здатність пригнічувати електро-механічні коливання. Демпферна система виконана у вигляді сукупності стрижнів, розташованих у пазах полюсних наконечників та з'єднаних між собою короткими замикаючими кільцями, що створює певне відображення білячої клітки, подібно до ротора асинхронної машини. Такий принцип дії дозволяє генерувати демпфувальні струми, які виникають у випадку відхилення ротора від синхронної швидкості. Розташування ДО у роторі показано на (Рисунок 1.1 та на Рисунок 1.2)

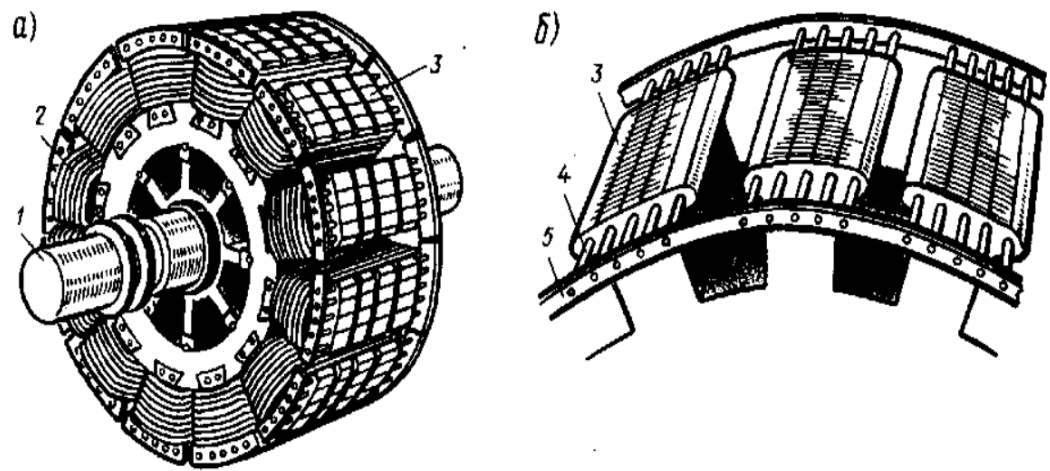


Рисунок 1.1 – ротор СГ [1]

1 — вал; 2 — обмотка збудження; 3 — полюс ротора; 4 — стрижні білячої клітки; 5 — короткозамикаючі кільця

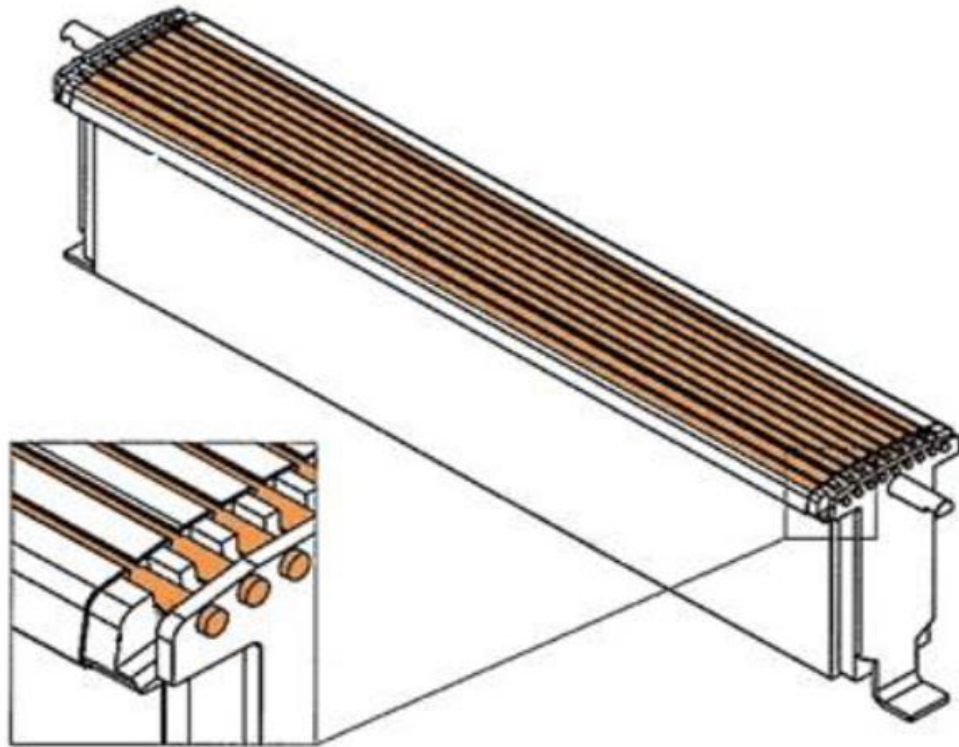


Рисунок 1.2-Демпферні стрижні у полі ротора [1]

У синхронних машинах з явнополюсним ротором в полюсних наконечниках (Рисунок 1.1.1) розміщуються стрижні білячої клітки, виконаної з міді або латуні. З торцевих сторін ротора стрижні з'єднуються з короткозамикаючими кільцями. У генераторах цю клітку називають демпferною обмоткою; вона забезпечує швидке загасання коливань ротора, що виникають при різких змінах режиму роботи машини. У синхронних двигунах біляча клітка служить в якості пускової обмотки .

Однією з основних конструктивних особливостей є форма та розташування пазів у полюсних наконечниках. Глибокі пази допомагають зменшити вихрові струми в сталі полюса, однак вони можуть ускладнювати рівномірний розподіл струму в стрижнях. І навпаки, неглибокі пази полегшують виробництво та покращують тепловіддачу, але зменшують ефективність демпфування під час значних збурень. Тому сучасні конструкції обирають збалансовані варіанти, беручи до уваги розрахункові умови експлуатації генератора [16].

Значну роль відіграють матеріали демпферних стрижнів. Традиційно використовуються мідь або латунь, які характеризуються високою провідністю та достатньою механічною міцністю. У генераторах великої потужності найчастіше застосовують мідь з модифікованим профілем або композитні сплави, що дозволяють зменшити нагрівання та механічні навантаження. Дослідження показують, що оптимальне поєднання електричних та механічних властивостей може значно підвищити стійкість машини під час короткочасних перевантажень.

Важливим структурним аспектом також є форма стрижня. Хоча круглі стрижні й легкі у виробництві, вони спричиняють неоднорідне розповсюдження електричного струму. Натомість прямокутна форма забезпечує значну контактну площу та більш рівномірний потік струмів, проте потребує ретельнішого фрезерування пазів. Для покращення демпфувальних характеристик без зміни розмірів ротора в окремих новітніх моделях використовують стрижні нестандартної форми.

Система кріплення та терморегуляція демпферної обмотки заслуговують на особливе розглядання. Враховуючи великі струми, які виникають під час демпфування, нагрівання стрижнів та кілець стає відчутним. Застосування спеціальних клинів, покращених контактних поверхонь чи додаткових ребер для охолодження допомагає істотно зменшити локальний перегрів. При проектуванні високошвидкісних машин необхідно брати до уваги відцентрове навантаження на компоненти демпфера.

Інший аспект полягає у впливі демпферної обмотки на магнітне поле основної обмотки збудження. Форма полюсних наконечників має гарантувати мінімальне блокування магнітного потоку та одночасно ефективне демпфування. З огляду на це, для скорочення небажаних втрат можна використовувати оптимізацію форми полюсів, їх перфорацію або сегментацію сталі.

Використання сучасних обчислювальних технік дає змогу моделювати роботу демпферної системи у трьох вимірах, оцінюючи вплив кожного

конструктивного фактору на величину струмів, втрати енергії та ефективність демпфування. Це стимулює створення інноваційних демпферних систем, де геометрія та матеріали підібрані відповідно до специфічних робочих умов.

Отже, конструктивні особливості демпферної обмотки у синхронних машинах з явними полюсами впливають на їхню надійність, продуктивність і стабільність. Обґрунтований вибір матеріалів, оптимізація форми стрижнів та пазів, а також поліпшення системи закріплення та охолодження – це ключові вектори для покращення показників цих машин.

1.3 Вплив демпферної обмотки на динамічні та електромагнітні характеристики явнополюсних синхронних машин

Демпферна обмотка відіграє ключову роль для створення динамічних і електромагнітних характеристик явнополюсних синхронних машин. Завдяки її присутності, генератор демонструє стабільну роботу під час перехідних процесів, водночас суттєво впливаючи на стійкість синхронізації, величину енергетичних витрат та якість електричних показників. Знати принцип функціонування демпферної системи необхідно для правильного вибору конструкції ротора й ефективного налаштування машини в будь-яких умовах експлуатації.

По-перше, демпферна обмотка гарантовано гасить коливання ротора, які проявляються через відхилення від заданої синхронної швидкості. Коли система зазнає короткочасних порушень – нехай це буде зміна навантаження чи коротке замикання – ротор схильний до коливань навколо точки рівноваги. В стрижнях демпферної обмотки індукуються струми, які породжують протидіючий електромагнітний момент, тим самим знижуючи амплітуду коливань та сприяючи швидкому відновленню стабільної роботи. Це явище помітно посилює динамічну стійкість синхронного генератора.

Крім того, демпферна обмотка бере участь у процесі синхронізації машини під час запуску. Без цієї системи ротору було б важко досягти синхронізму із напругою, яка вже існує на статорі, адже початковий момент

був би недостатнім. Демпферна клітка діє подібно до ротора асинхронної машини, виробляючи початковий імпульс, який допомагає ротору розігнатися до необхідної синхронної швидкості. Від цього процесу залежить безперебійність пуску, величина спожитих струмів та навантаження на вал.

Важливим аспектом є вплив демпферної системи на пульсації електромагнітного моменту та нерівномірність розподілу магнітного поля. Завдяки струмам, що індукуються в стрижнях, згладжуються гармонічні компоненти поля, які виникають через особливості конструкції або спотворення струмів у мережі. Як наслідок, зменшується вібрація, шум та механічне навантаження на підшипникові опори.

Демпферна обмотка також має вплив на електромагнітні втрати, зумовлені струмами, які протікають у її стрижнях та замкнутих кільцях. Попри те, що ці втрати є неминучими, їх величина залежить від якості матеріалу, форми та розміщення демпферних компонентів. Погано сконструйована обмотка може викликати локальне перегрівання, що негативно впливає на ефективність та термін служби генератора.

Наявність демпферної системи також позитивно впливає на реакцію машини в аварійних ситуаціях. Під час короткого замикання або раптового падіння навантаження демпферна обмотка мінімізує амплітуду перехідних струмів, пом'якшує коливання магнітного потоку та сприяє більш швидкій стабілізації параметрів генератора. Це набуває особливої актуальності в енергосистемах з великим відсотком нестабільних або нерівномірно навантажених джерел живлення.

З появою сучасних обчислювальних методів стало можливо точніше моделювати вплив демпферної обмотки на роботу машини у тривимірному просторі. Це дозволяє визначити оптимальну конфігурацію пазів, стрижнів, електричну провідність матеріалів та геометричні параметри, які забезпечують найкраще співвідношення між рівнем демпфування, втратами та надійністю.

Таким чином, демпферна обмотка відіграє ключову роль у формуванні динамічних та електромагнітних властивостей явнополюсних синхронних машин. А її ретельне конструювання гарантує більшу надійність, зниження енергетичних витрат, оптимізацію поведінки під час переходів та подовжений термін служби обладнання.

1.4 Аналіз причин ушкоджень демпферних обмоток роторів СГ

Синхронні генератори – це незамінна частина електростанцій, яка відповідає за отримання стабільного електропостачання. Різноманітні дефекти в (СГ) потенційно можуть призвести до серйозних наслідків, зокрема до переривань електропостачання або повного знеструмлення. Ротори цих машин є критично важливим компонентом, а їх належне функціонування має вирішальне значення для підтримки надійності й ефективності електростанцій.

Важливою характеристикою використання СГ великої потужності є забезпечення високоякісного сервісу. Загалом, частота поломок, спричинених недоліками в експлуатації, порівнянна з кількістю несправностей, викликаних браком при виробництві. Відповідно до цього, протягом періоду роботи проводять оновлення та модифікацію генераторів разом із супутнім обладнанням для зміцнення надійності синхронних машин.

Ще однією важливою рисою експлуатації СМ є проведення регулярних капітальних та планово-профілактичних ремонтів та тестувань з метою виявлення потенційних проблем та мінімізації ризику раптового виходу з ладу. Згідно зі статистичними даними, основним фактором відмов у роботі СМ залишаються заводські дефекти. На етапі початкового періоду експлуатації, який триває близько 5-10 тисяч годин, фіксуються пошкодження, зумовлені виробничими вадами. Подальший період характеризується стабільною роботою СМ, яка за звичайних умов може тривати 15-20 років. Після цього моменту спостерігається тенденція до зростання кількості відмов, спричинених зносом ізоляції та інших структурних компонентів.

Будова синхронної машини з явнополюсним ротором показана на (Рисунок 1.3), а конструкція цього ротора і його деталей — на (Рисунок 1.4 **Ошибка! Источник ссылки не найден.**).

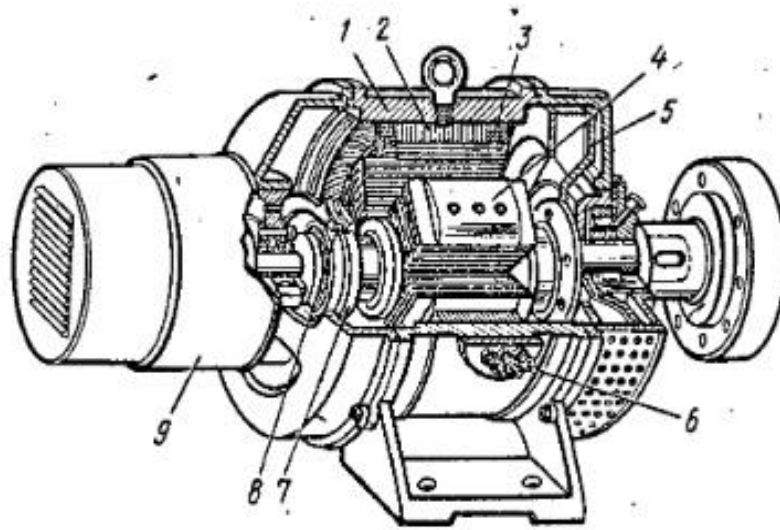


Рисунок 1.3- Будова електричної машини з явнополюсним ротором:

1 — корпус, 2 і 3 — сердечник і обмотка статора, 4 — ротор,
5— вентилятор, 6 — виводи обмотки статора, 7 — контактні кільця,
8— щітки, 9 — збудник [1]

Станина (корпус) синхронної машини відливається зазвичай з чавуну і служить для розміщення в ній сердечника 2, в пазах якого укладені котушки обмотки 3 статора. Сердечник являє собою щільно спресований пакет ізольованих штампованих листів електротехнічної сталі товщиною 0,35 — 0,5 мм з виштампованими в них вирізами, що утворюють в зібраному пакеті сердечника пази, в які укладена обмотка ротора.

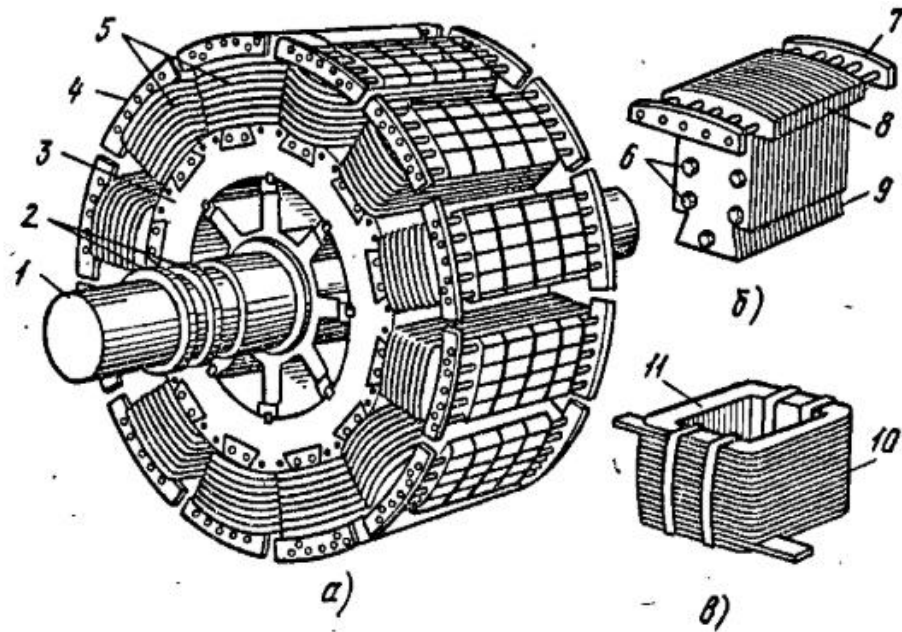


Рисунок 1.4 - Конструкція явнополюсного ротора і його деталей:

а — загальний вигляд ротора, б — сердечник полюса ротора із заспокійливою обмоткою, в — обмотка полюса; 1 — вал, 2 — контактні кільця, 3 — обід, 4 — полюс, 5 — обмотка збудження, б — заклепки, 7 — сегмент, що замикає стрижні заспокійливої обмотки, 8 і 9 — наконечник і хвостовик полюса, 10 — котушка полюса, 11 — каркас обмотки полюса [1].

Згідно зі статистичними показниками, існує прямий зв'язок між потужністю СГ та вірогідністю виникнення пошкоджень. Найбільш чутливим компонентом у СМ є статор. Зокрема, ймовірність пошкодження ізоляції обмотки статора становить 2,27% для турбогенераторів (ТГ) та 3,66% для гідрогенераторів (ГГ), для дефектів у місцях пайки — 0,35% і 0,91%, а для пошкоджень активної сталі статора — 0,15% і 0,64% відповідно [3]. Для наочності розподілу вірогідності пошкоджень у статорних вузлах турбогенераторів та гідрогенераторів побудовано відповідну діаграму (Рисунок 1.5), на якій можна спостерігати суттєво вищі значення ймовірності дефектів у гідрогенераторів порівняно з турбогенераторами.

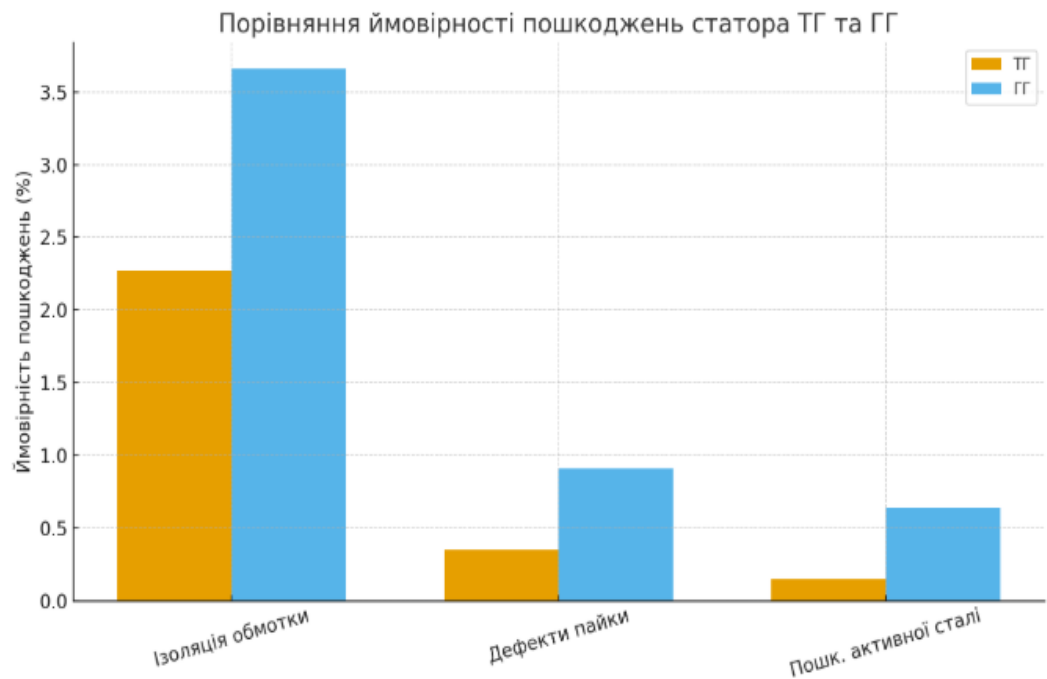


Рисунок 1.5- Порівняння ймовірності пошкоджень статора турбогенератора та гідроенератора

Несправності в електричних машинах можна класифікувати на дві категорії: електричні (що стосуються обмоток машини) та механічні (пов'язані з конструкцією машини).

Варто зазначити, що значна кількість часткових несправностей може спричинити накопичення негативного впливу через недостатнє технічне обслуговування. До них належать електричні та механічні несправності, зокрема динамічний та симетричний ексцентриситет. Оскільки процес електромеханічного перетворення енергії тісно пов'язаний із магнітною реактивністю машини, будь-яка зміна параметрів збудження чи геометрії може призвести до відчутних коливань величин статора, таких як напруга без навантаження.

Демпферні обмотки розміщені на зовнішньому краю ротора. Тому, у випадку руйнування демпферного стрижня, це може завдати значної шкоди цілісності всієї конструкції ротора та статора, адже незакріплені фрагменти потенційно можуть потрапити в область повітряного зазору.

Електричні несправності

Міжвиткове замикання (Рисунок 1.6) виникає внаслідок пробоя ізоляції провідників всередині обмотки. Цей пробій ізоляції відбувається через знос матеріалу, дефекти виробництва або надмірний перегрів. Симптомом несправності є підвищена температура обмотки. Найпростішим та найефективнішим методом діагностики є порівняння опору фаз обмоток та аналіз струмів у робочому режимі [4].

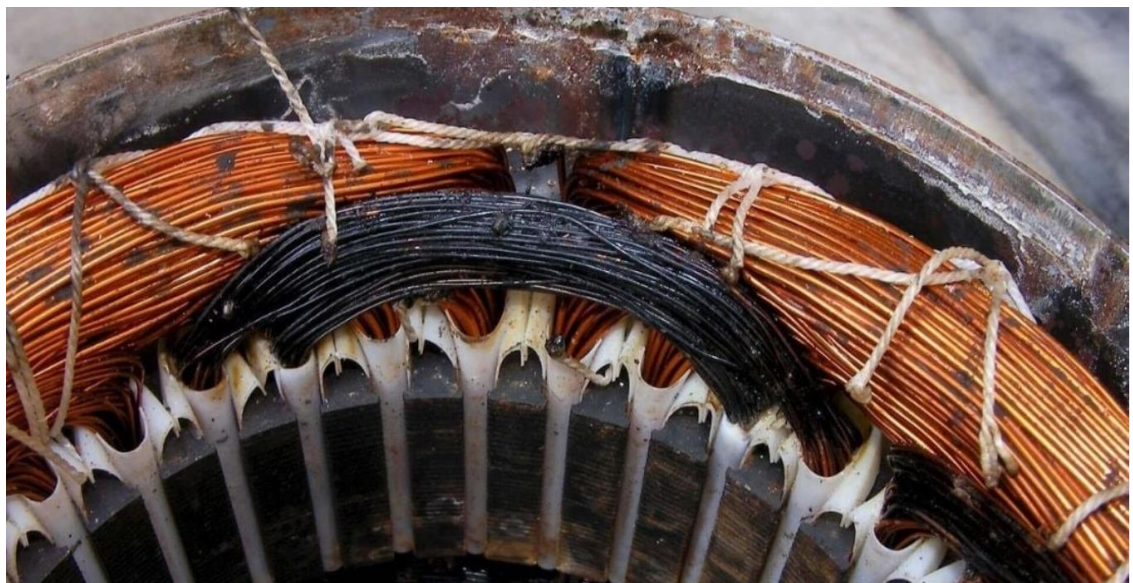


Рисунок 1.6 – Результат міжвиткового замикання обмотки статора [5].

Міжфазне коротке замкнення (Рисунок 1.7) може статися внаслідок руйнування ізоляції між проводами обмоток двох різних фаз, часто спричиненого механічними вібраціями. Симптоми цієї проблеми подібні до тих, що спостерігаються при короткому замиканні між витками. Без належного захисту це може призвести до займання електродвигуна [5].

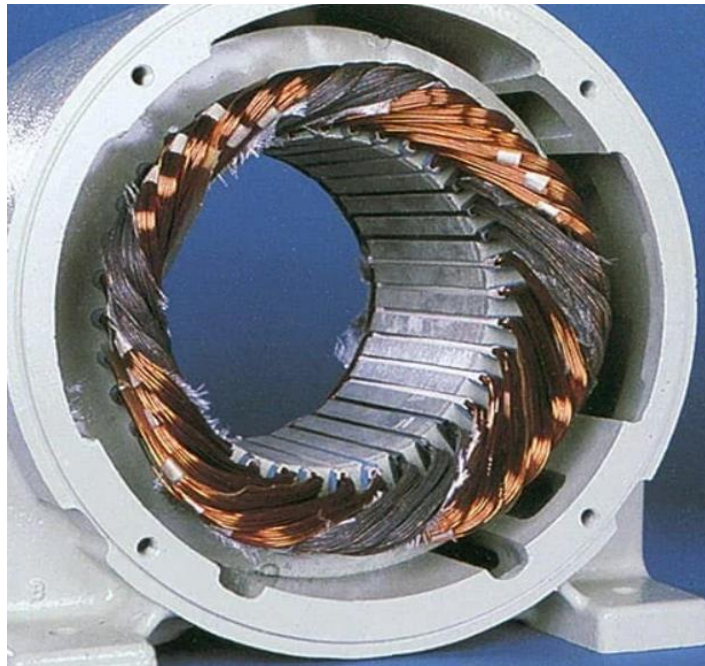


Рисунок 1.7 – результат міжфазного замикання [6]

Поява іскор від щіток та пошкодження контактних кілець зумовлена нерівномірним розповсюдженням струму між щітками, недостатнім якістю їх шліфування, обмеженою мобільністю щіток у тримачах, забрудненням кілець та щіток, нерівномірним контактом чи надмірним люфтом, а також використанням щіток неправильної специфікації. Цю проблему можна діагностувати шляхом спостереження за іскрінням колектора під час роботи електроприводу, виявлення слідів обгорання на щітках та колекторі, а також фіксації перегріву в процесі експлуатації [7].

Підвищена температура контактних кілець та щіток може виникнути через надмірне притискання щіток до кілець або недостатнє охолодження під час роботи. Діагностувати цю проблему дозволяє лише моніторинг нагрівання електроприводу в робочих умовах. Нехтування цією проблемою може створити передумови для іскріння в колекторі та пошкодження електроприводу [7].

Надмірне нагрівання активної сталі статора (Рисунок 1.8) може бути викликане роботою з надмірною напругою, обертанням синхронного генератора з меншою частотою ніж номінальна або зниженням частоти

мережі, коротким замиканням між шарами сталі, замиканням між стяжними болтами та шарами сталі, а також вигорянням та плавленням зубців, що призводить до короткого замикання. Проблему можна ідентифікувати за зменшенням потужності, що генерується, та збільшенням рівня шуму. Після цього потрібно здійснити візуальний огляд та виміряти опір обмоток синхронного генератора за допомогою омметра для підтвердження дефекту [7].



Рисунок 1.8 – перегрів статора СГ [8]

Перегрів ротора. Надмірне нагрівання ротора синхронної машини являє собою важливу проблему, здатну призвести до його пошкодження. Досягнення критичних температурних показників, зумовлених обмеженням об'ємом циркуляції повітря або неефективним охолодженням, може спровокувати деформацію ротора та модифікувати його структурні характеристики. Як наслідок, зменшується стійкість конструкції ротора та формуються численні розколи (Рисунок 1.9), негативно впливаючи на загальну безпечність та ресурс обладнання.

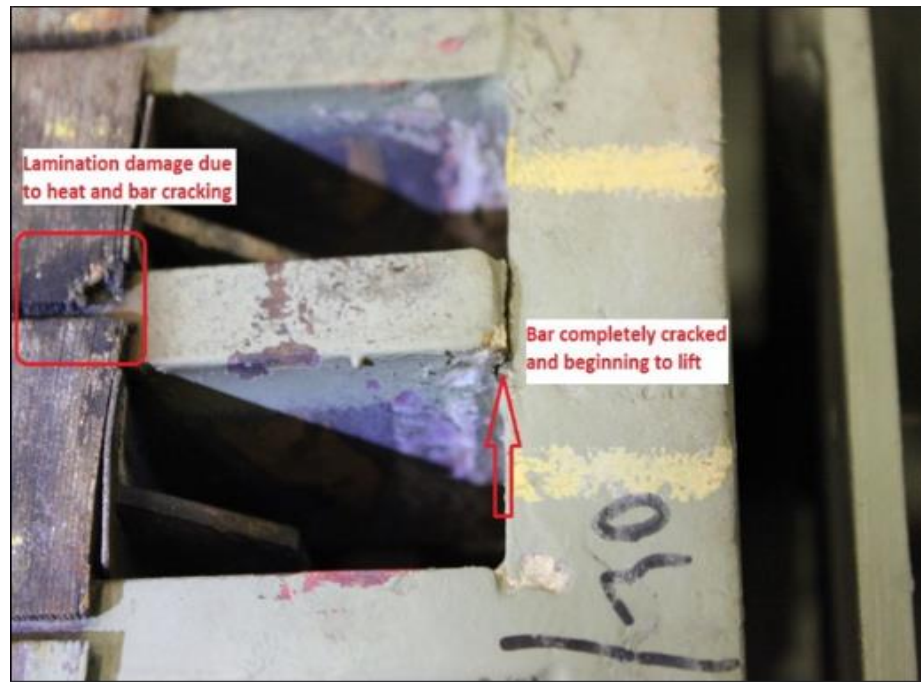


Рисунок 1.9 - розтріскування стрижнів [8].

Перегрів електричної машини виникає через надмірні навантаження під час роботи, застосування обладнання, призначеного для циклу S1, у режимах S2–S10 та зворотно, а також проблеми з охолоджувальною системою чи некоректне розташування лопастей вентилятора. Визначити поломку можна лише за допомогою вимірювання температури під час роботи [7].

Надмірний нагрів обмотки збудження може статися при роботі з низьким коефіцієнтом потужності, що спричиняє зростання реактивної потужності й посилення струму збудження, використанні підвищеної напруги та зменшеній швидкості обертання порівняно з номінальними параметрами, короткому замиканні між витками обмотки збудження або її замкненні на корпус [7].

Нестабільність напруги генератора може бути викликана поганим контактом у колі збудження, зокрема в магнітному регуляторі, міжполюсних з'єднаннях ротора, вихідних клемах полюсних котушок, провідниках струму між обмоткою та контактними кільцями, а також з'єднувальних проводах між збудником та контактними кільцями. Для діагностики потрібно перевірити напругу на виході [7].

Відсутність напруги на ХХ. За відсутності напруги на холостом ходу причинами можуть бути втрата генератором залишкового магнетизму, неправильно обраний напрямок обертання синхронного генератора, паралельне заземлення обмотки збудження у двох точках, міжвиткове замикання, некоректне підключення регулятора збудження, обрив кола збудження або поганий контакт у ньому. Для діагностики необхідна перевірка напруги на виході генератора [7].

Отже, до електричних несправностей належать дефекти ізоляції проводів, пошкодження обмотки ротора або її ізоляції, перевантаження, короткі замикання, проблеми з ізоляцією та перенапруги. Ці електричні проблеми можуть виникати через недоліки в проектуванні, недостатнє обслуговування або несправності в системі електропостачання станції.

Регулярна перевірка та технічне обслуговування обладнання є важливими для запобігання цим проблемам і забезпечення стабільної роботи синхронного генератора.

Механічні несправності

Механічні несправності можуть виникати через удари, вібрації та неправильну експлуатацію генератора. Навіть незначні пошкодження можуть спричинити його вихід із ладу. Це може бути обрив обмотки ротора, вихід із строю підшипників, деформація ротора, тріщини на корпусі та порушення механічної цілісності ротора. Також до механічних проблем може призвести неправильне обслуговування обладнання.

До механічних пошкоджень слід віднести також динамічний та симетричний ексцентриситет. Ексцентриситет ротора є одним з типових дефектів потужних синхронних генераторів (СГ). Його наявність знижує ефективність СГ та скорочує термін його служби через пошкодження обладнання, найбільше під час роботи в асинхронному режимі.

Через те, що повітряний проміжок між статором та ротором мізерно малий у порівнянні з розміром ротора, навіть незначна деформація його положення щодо геометричного центру статора може спричинити ексцентриситет і, якщо пошкодиться датчик положення, призвести до зупинки обладнання під час довготривалого використання.

Динамічний ексцентриситет. Під час обертання ротора проявляється як зміщення осі ротора від точки його обертання. Цьому сприяють варіації магнітного поля та нерівномірний розподіл маси всередині ротора. В результаті цього зростає рівень вібрацій та відбувається прискорене руйнування підшипників.

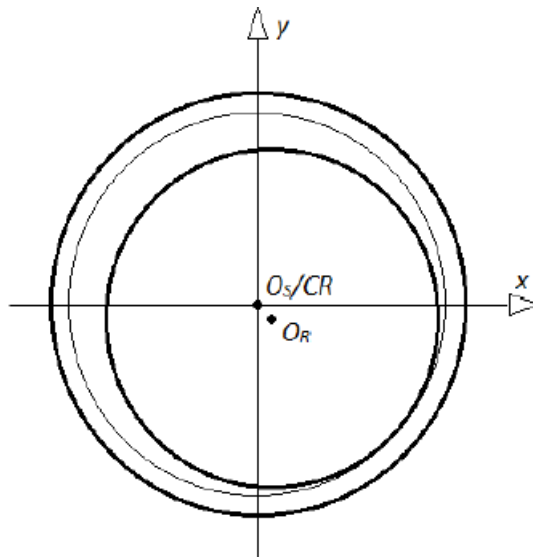


Рисунок 1.10- Динамічний ексцентриситет. Центр статора O_S вирівняний з центром обертання CR . Під час обертання ротора найменша відстань між ротором і статором (кола, обведені товстою лінією) буде обертатися навколо центру обертання, зображеного колом, обведеним тонкою лінією [10].

Статичний ексцентриситет визначається як постійна відмінність осі ротора від його центру обертання, яка зберігається протягом усього процесу обертання. Причини цього явища криються в неточностях при складанні або виробництві деталей. Наявність симетричного ексцентриситету може

спровокувати різні види вібрацій, пришвидшити знос підшипників та підвищити енергетичні втрати.

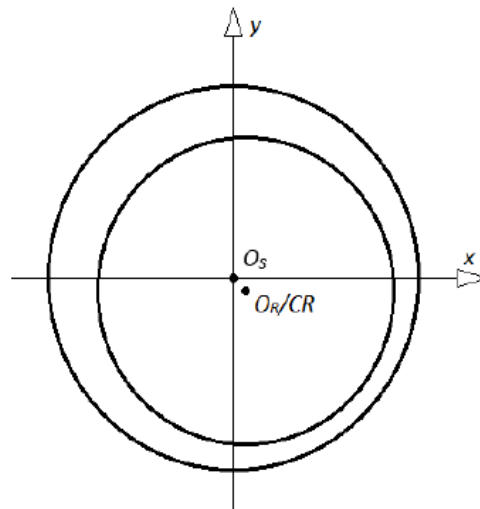


Рисунок 1.11 - Статичний ексцентриситет. Центр ротора O_R вирівняний з центром обертання CR . Найменша відстань між ротором і статором буде постійно знаходитися в одному і тому ж місці [10].

Деградація та пошкодження підшипників (Рисунок 1.12) настає внаслідок тривалої експлуатації без належного контролю, обслуговування та недостатнього змащування. Наявність надмірного шуму та вібрації під час роботи свідчить про їхню непридатність, тому потребує негайної заміни підшипника [7].

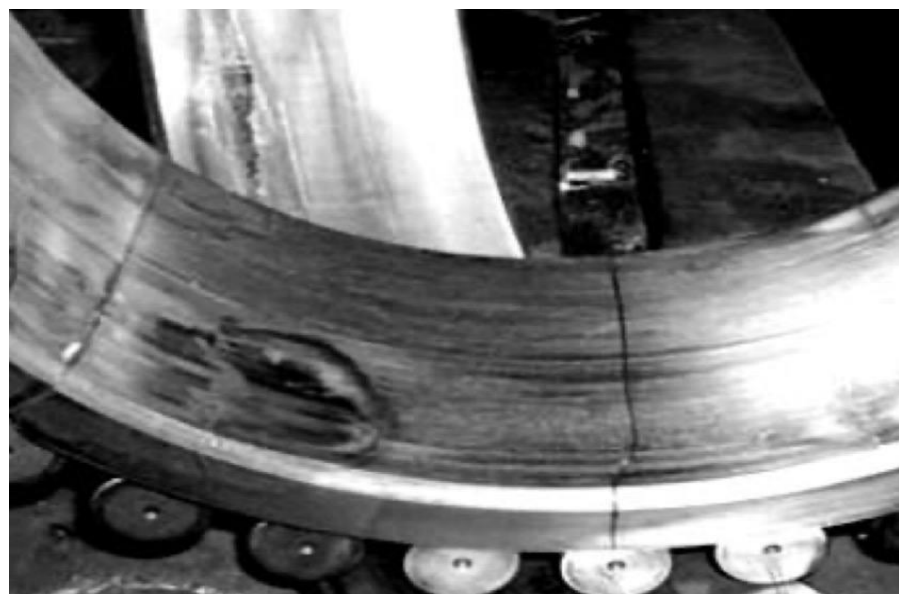


Рисунок 1.12 - Тріщини кільця підшипника

Пошкодження стрижнів демпфівної обмотки (Рисунок 1.13) важко діагностувати, адже струм в них виникає виключно під час запуску та в періоди змінного навантаження.



Рисунок 1.13 - Місце розриву стержня ДО [11].

1.5 Особливості режимів роботи СГ

Режим холостого ходу

Під час експлуатації синхронного генератора розрізняють декілька характерних режимів функціонування, котрі володіють власною значущістю з інженерної та практичної точки зору. Коли генератор перебуває у режимі холостого ходу, він обертається із номінальною швидкістю, проте не має жодного навантаження. Тоді формується характеристика холостого ходу – це графік взаємозв'язку між напругою на затискачах і струму збудження. Він необхідний для оцінки магнітних якостей обладнання та встановлення параметрів його схеми збудження. Після переходу до роботи з навантаженням генератор розпочинає передавати електроенергію користувачам чи до

загальнозаводської мережі. Тут головними показниками стають напруга, сила струму, активна та реактивна потужність, а також коефіцієнт використання потужності. Для аналізу використовують зовнішню характеристику, яка відображає зміни напруги при збільшенні навантажувального струму, і регульовальну характеристику, яка показує зв'язок сили збудження із навантаженням при фіксованій напрузі.

Режим короткого замикання

Окремо розглядається режим короткого замикання, коли затискачі генератора замикаються накоротко. Під час цього вимірюють струм короткого замикання, змінюючи величину струму збудження, щоб встановити синхронний реактивний опір обладнання та оцінити його захист від нештатних ситуацій. Значну роль мають також перехідні процеси, що проявляються при різких змінах навантаження, параметрів збудження чи пошкодженнях у системі живлення. Ці зміни викликають коливання напруги, сили струму та частоти, здатні порушити стабільність генератора. Зменшити ці коливання та покращити його динамічну стійкість допомагає демпферна обмотка, яка забезпечує електромагнітне гасіння та фіксує стан ротора.

Асинхронний режим при живленні із мережею

У процесі експлуатації синхронного генератора може статися вихід генератора із синхронізації, коли його ротор асинхронно обертається порівняно з магнітним полем статора. Такий стан характеризується як асинхронний режим функціонування (АР).

Виникнення АР СГ виникає, коли швидкість обертання ротора не співпадає із частотою струму, яку живить генератор. Цьому сприяють нерівномірність навантаження та інші фактори, що впливають на його працездатність. Про це можуть свідчити моменти запуску, зупинки або раптові перехідні процеси. Ключову роль у регулюванні асинхронного режиму відіграють демпферні стрижні, розміщені в спеціальних прорізах кінця полюса ротора – вони гасять перехідні коливання, гарантуючи м'який запуск та запобігаючи асинхронному потоку енергії. Порушення у функціонуванні

демпферних стрижнів може спричинити зниження продуктивності, перегрів та збільшення механічного навантаження на генератор, негативно впливаючи на його роботу.

Основні характеристики асинхронного режиму включають наступне:

- В роторі генеруються індукційні струми ковзання, що призводить до збільшення втрат потужності та тепловиділення.
- Ефективність роботи генератора погіршується, адже він не здатен стабільно тримати необхідну частоту та фазу напруги.
- Перехід у цей режим можливий через значні коливання навантаження, несправності в електричній мережі або недостатню силу збудження.

З метою мінімізації негативного впливу використовується демпферна обмотка, яка формує гальмівний момент та допомагає повернути ротор у синхронний стан.

У технічних характеристиках синхронних генераторів обов'язково визначають обмеження щодо використання обладнання в асинхронному режимі. Причина криється в тому, що тривале функціонування поза синхронізмом провокує надмірні електромагнітні та термічні навантаження на ротор та обмотку.

Асинхронний режим супроводжується виникненням струмів ковзання в роторі, які спричиняють інтенсивне нагрівання демпферної обмотки та сталевих елементів. Зважаючи на це, виробники встановлюють максимальний тривалість перебування в асинхронному режимі, яка зазвичай вираховується секундами або хвилинами. Цей показник залежить від номінальної потужності генератора, конструкції ротора та ефективності системи охолодження.

Наприклад, для великих турбогенераторів тривала робота в асинхронному режимі при номінальному навантаженні є недопустимою, оскільки теплові навантаження в роторі та демпферній обмотці за короткий час досягають критичних значень, що обмежує допустимий час такого режиму до 15 секунд. Водночас за умови зниження активної потужності приблизно на

40 % можливе більш тривале перебування турбогенератора в асинхронному режимі без перевищення гранично допустимих температур.

Ці дані фіксуються в паспорті генератора як "допустимий час роботи в асинхронному режимі при номінальному навантаженні", а його перевищення може спровокувати пошкодження демпферної обмотки та втрату працездатності генератора.

Отже, паспортні обмеження щодо асинхронного режиму є важливою складовою експлуатаційних документів, які гарантують безпечне функціонування генератора та захищають його компоненти від перегріву.

Несиметричний режим

Несиметричність виникає в ситуаціях, коли навантаження або мережа, до якої підключено синхронний генератор, демонструють дисбаланс фазних струмів чи напруг. Така ситуація може виникнути через однофазне навантаження, пошкодження однієї з фаз, перекося напруги в системі або екстремальні обставини.

Такі режими можуть бути спричинені обривами і відключеннями однієї фази лінії, відключенням однієї з фаз трансформаторної групи, однофазним навантаженням у вигляді електротяги. Струми зворотної послідовності, що виникають за несиметричного режиму, створюють додаткове нагрівання обмотки статора. Магнітне поле зворотної послідовності, обертаючись відносно ротора з подвійною синхронною частотою обертання, наводить в обмотці збудження, у демпферних контурах, а також у тілі ротора і його торцевій контактній зоні (клин, зуб, бандаж) струми частотою 100 Гц. Ці струми створюють додатковий нагрів відповідних частин ротора. Крім того, магнітне поле зворотної послідовності створює знакозмінний момент, який спричиняє механічні напруження і вібрації машини.

Ключові особливості несиметричного режиму:

- У статорі з'являються несиметричні струми, які можна розкласти на складові прямої, зворотної та нульової послідовності.
- Магнітні поля негативного типу породжують у роторі додаткові індукційні опори, що спричиняє значне збільшення температури та механічні коливання.
- Формуються електромагнітні сили з подвійною частотою, котрі потенційно можуть спровокувати вібрацію ротора та ослаблення його міцності.
- Не симетрія фазових струмів веде до падіння продуктивності генератора, появи надмірних енергетичних витрат та ризику пошкодження ізоляції обмоток.

Призначення демпферної обмотки під час несиметричного режиму:

- Демпферна обмотка мінімізує вплив магнітних полів зворотного типу, генеруючи зустрічні струми, які частково нівелюють їх ефект.
- Вона гарантує електромагнітне гасіння, яке зменшує величину коливань ротора та сприяє стабільній роботі генераторної установки.
- Оптимізація конструкції демпферної обмотки сприяє збільшенню надійності обладнання під час експлуатації в ситуаціях дисбалансу та мінімізує термічні навантаження.

У технічних характеристиках генераторів зазвичай фіксуються гранично допустимі параметри працездатності при нерівномірному розподілі навантаження (наприклад, встановлені обмеження щодо розходження струмів або вольтажів). Порушення зазначених лімітів потенційно спричиняє позаштатний вихід обладнання з експлуатації. З огляду на це, дослідження несиметричних сценаріїв критичне для визначення ресурсозабезпеченості генератора, а модифікація демпферної обмотки безпосередньо визначає його спроможність протистояти подібним факторам.

1.6 Оптимізація конструкції ротора та демпферної обмотки СГ

Через чудові експлуатаційні показники, широко використовуваний у виробництві електроенергії – явнополюсний синхронний генератор (ЯСГ) – має багатий досвід застосування. Не дивлячись на те, що ці “класичні” електричні машини глибоко вивчені та успішно впроваджені, нині відчувається потреба в оновленні конструкції та покращенні їхніх характеристик. Це пов’язано зі збільшенням жорсткості критеріїв щодо якості електроенергії, ефективності та адаптованості до потреб енергомережі, а також завдяки проривам у сферах матеріалознавства та технологій виробництва.

З метою компенсації обмежень щодо ефективності та якості електроенергії, останнім часом значна увага приділялася функціональним можливостям та структурним аспектам демпферної обмотки. Вона складається з розташованих у спеціальних пазах на поверхнях полюсів стрижнів, з’єднаних між собою на обох кінцях. Елементи в демпферній обмотці утворюють замкнені кільця (або іноді – кінцеві пластини), що з’єднують усі стрижні полюсів; у випадку неповних обмоток ці елементи електрично відокремлені між полюсами. Повні демпферні обмотки мають схожість із концепцією «білячої клітини» в асинхронних машинах.

Основні причини застосування демпферної обмотки на явнополюсних синхронних генераторах включають:

- створення початкового моменту для синхронних двигунів;
- приглушення вібрацій, викликаних неперіодичними імпульсами, зокрема короткими замиканнями;
- балансування напруги на клеммах у випадках несиметричного навантаження;
- запобігання перегріву полюсів при однофазному навантаженні;
- забезпечення гальмуючого моменту на генераторі при асиметрії;

- зменшення зубчастої пульсації, зумовленої конструктивом відкритих пазів, характерних для високовольних машин;
- зниження навантаження на ізоляцію обмотки збудження під час стрибків струму в обмотках ротора;
- запобігання спотворенню форми напруги (іншими словами, придушенню гармонік);
- надання додаткового крутного моменту для синхронізованого запуску генераторів.

Покращення конструкції ротора синхронних генераторів є ключовим етапом у розвитку електромеханічних комплексів з метою підвищення їхньої ефективності та довговічності. Щоб цього досягти, застосовують різноманітні стратегії та методи, зокрема ретельний вибір матеріалів, оптимізація геометрії, удосконалення системи охолодження, забезпечення оптимального балансу та використання преміальних магнітних матеріалів. Ефективна оптимізація ротора здатна значно поліпшити продуктивність генератора, скоротити витрату енергії та подовжити термін його експлуатації [12].

Оптимізаційний процес пов'язаний із специфікою конфігурації синхронної машини та її форм-фактором. Якщо машина має явнополюсна, важливо враховувати нерівномірність повітряного зазору.

Потреба в оптимізаційних рішеннях зумовлена дефектами в ЯСГ, оскільки фіксується зростання кількості пошкоджень і руйнувань конструкцій ДО, що призводить до суттєвих економічних та технічних збитків.

Оптимізація конструкції ротора та демпферної обмотки є одним із найважливіших векторів удосконалення великих синхронних генераторів, оскільки саме ці компоненти визначають їх динамічну стійкість, надійність та ресурс.

Ключові задачі оптимізації ротора:

- Зменшення втрат і нагрівання: застосування матеріалів із високою магнітною проникністю та мінімальними втратами на гістерезис і вихрові струми.

- Підвищення механічної міцності: конструкція ротора має забезпечувати стійкість до значних відцентрових сил при високих швидкостях обертання.
- Поліпшення процесу охолодження: використання внутрішніх каналів для циркуляції охолоджувального середовища (повітря або рідини), що дозволяє знизити температуру обмоток.
- Зменшення пульсацій моменту: оптимізація форми полюсів та розташування обмоток для рівномірного розподілу магнітного поля.

Проведення оптимізаційних робіт над конструкцією роторів синхронних генераторів передбачає виконання певних дій. Зокрема, заміна традиційної сталі на легші матеріали, такі як алюмінієві сплави чи титан, дозволить зменшити масу ротора, знизити енергетичні втрати та покращити загальну ефективність генератора. Також оптимізація форми ротора, наприклад, застосування аеродинамічно оптимізованих лопатей, може позитивно вплинути на ефективність роботи ротора [12].

Подальше вдосконалення системи охолодження ротора є дієвим методом запобігання перегріву та підтримки стабільності роботи генератора. Застосування високоякісних матеріалів у магнітах ротора може збільшити магнітну проникність і покращити ефективність генератора. Зменшення аеродинамічного опору, наприклад, використанням спеціально розроблених аеродинамічних форм та поверхонь, може знизити втрати енергії під час обертання ротора.

Як альтернативний підхід до оптимізації можна реалізувати зміну відстані між стрижнями на полюсі, яка може бути нерівномірною вздовж країв полюса. Це забезпечить більш щільне розміщення груп стрижнів біля краю полюса та сприятиме вирівнюванню величини струмів у всіх стрижнях при появі короткого замикання.

Оптимізація демпферної обмотки:

- Підвищення ефективності демпфування: правильне проектування кількості стрижнів, їхнього перетину та розташування для максимізації гальмівного ефекту під час перехідних процесів.

- Зниження теплових навантажень: застосування матеріалів з високою електропровідністю (мідь, алюміній) та забезпечення ефективного тепловідведення.
- Стійкість до несиметричних режимів: конструкція демпферної обмотки повинна компенсувати струми зворотної послідовності, які виникають при перекосі фаз.
- Адаптація до асинхронного режиму: удосконалена демпферна обмотка дозволяє збільшити допустимий час роботи генератора в асинхронному режимі без ризику перегріву [12].

Щоб отримати достовірні результати, необхідно обчислювати зв'язок між площею поперечного перерізу стержня та кількістю цих же стержнів. Розробка математичного моделювання є ключовим кроком, що дозволяє оптимізувати модель та заощадити ресурси часу та матеріалів.

Головне завдання демпферної обмотки – зберегти деталі обладнання під час екстремальних сценаріїв, зокрема при незбалансованому навантаженні чи короткому замиканні. Коли ця обмотка застосовується виключно для цього призначення, крок її паза зазвичай узгоджують із кроком паза статора. Це необхідно для запобігання потраплянню гармонік магнітного потоку щілин у демпферну обмотку.

У межах попередньої дипломної роботи було проведено термомеханічне моделювання різноманітних варіантів конструкцій демпферної обмотки (ДО) потужного синхронного генератора. Важливо зазначити, що при зміні геометричних параметрів стрижнів загальна площа їх поперечного перерізу залишалася незмінною, що забезпечувало коректність порівняння теплових і механічних характеристик.

Були розглянуті наступні конфігурації із ковзанням $s=-0,1$ без СЕ:

- ДО із 8 стрижнями діаметром 10,4 мм (Рисунок 1.14 А);
- ДО із 6 стрижнями діаметром 12 мм (Рисунок 1.14 Б);
- ДО із 6 стрижнями різних діаметрів 8,5 мм і 4,35 мм, де два крайні стрижні заглиблені на 1,41 рази (Рисунок 1.14 В).

- ДО із 10 стрижнями діаметром 9,3 мм (Рисунок 1.14 Г);

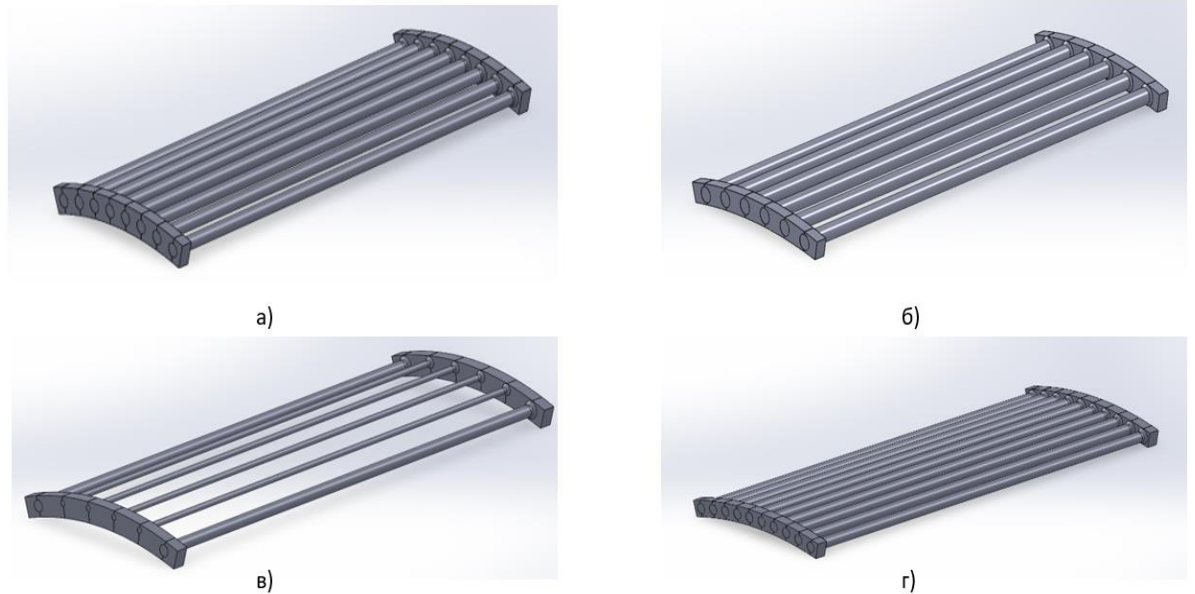


Рисунок 1.14- Різні модифікації ДО синхронного генератора

У ході дослідження було встановлено, що найбільш несприятливі показники (максимальна температура 257 °С, деформація 3,71 мм, механічні напруження 680 МПа) спостерігалися у конфігурації з 6 стрижнями діаметром 8,5 мм та 4,35 мм із заглибленням $\times 1,41$. Така конструкція виявилася термічно нестабільною та механічно вразливою, що унеможливило її використання в умовах тривалої експлуатації.

Натомість найкращі результати продемонструвала демпферна обмотка з 10 стрижнями діаметром 9,3 мм, яка забезпечила найнижчі значення температури (106 °С), мінімальні деформації (0,651 мм) та допустимі механічні напруження. Ця конфігурація була визнана оптимальною з точки зору термостійкості, механічної стабільності та довговічності.

Таким чином, оптимізація конструкції ротора та демпферної обмотки є стратегічним напрямом розвитку синхронних генераторів, що дозволяє забезпечити їхню надійну роботу в сучасних енергосистемах, де часто виникають перехідні та несиметричні режими.

1.7 Висновок до Розділу 1

Ротори синхронних генераторів схильні до різних видів дефектів, які включають механічні пошкодження та електричні несправності. Щоб гарантувати безперебійну та ефективну роботу генераторів, необхідне регулярне обстеження стану роторів та своєчасне застосування коригувальних дій для попередження та усунення будь-яких виявлених дефектів. Збереження належного стану роторів критично важливе для підтримки стабільної роботи та високої продуктивності гідроелектростанцій.

До найчутливіших складових роторів синхронних генераторів належать обмотка, вал та підшипники. Причини виникнення пошкоджень можуть бути пов'язані з перегрівом, зношуванням, дисбалансом або недотриманням правил експлуатації. Регулярне технічне обслуговування, застосування високоякісних матеріалів та проведення необхідних процесів допоможуть мінімізувати ризик пошкоджень і сприятиме тривалому та надійному функціонуванню роторів гідрогенераторів [13].

Визначення дефектів ротора синхронного генератора є вирішальним фактором для забезпечення його безпечної та безперебійної роботи. Об'єднання різних діагностичних методів, кожен з яких має власні переваги та недоліки, дозволить провести більш точну та всебічну оцінку стану ротора генератора. У цьому тексті наведено приклади оптимізації конструкції ротора синхронного генератора. Окрім того, в наступній главі буде розглянуто сучасні публікації, присвячені причинам пошкодження роторів синхронних генераторів.

Оптимізація конструкції тісно пов'язана зі специфікою конфігурації синхронного генератора та його геометричною формою; зокрема, якщо генератор має явнополюсний тип конструкції, слід враховувати можливу нерівномірність розподілу повітряного зазору.

Крім цього, важливою умовою є збереження загальної площі поперечного перерізу ротора.

РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВАРІАНТІВ КОНСТРУКЦІЇ ДЕМПФЕРНОЇ ОБМОТКИ ПОТУЖНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

2.1 Паспортні дані досліджуваного синхронного генератора

Розробку запропонованої конструкції синхронного генератора було здійснено за допомогою пакета програм AutoCAD, який був обраний завдяки його простоті та зручності для двовимірного моделювання, а також сумісності з іншими програмами, зокрема COMSOL Multiphysics.

Таблиця 2.1 – Характеристики досліджуваного синхронного генератора

Номінальні дані	
Номінальна потужність, кВт	500
Коефіцієнт потужності	0,9
Частота, Гц	50
Частота обертання, об/хв	500
Кількість фаз статора	3
Номінальна напруга статора, В	6000
Номінальний фазний струм, А	57,1
Кількість пар полюсів	6
Зовнішній діаметр статора, м	1,18
Висота обертання, м	0,63
Полюсна поділка, м	0,236
Довжина статора, м	0,36
Кількість пазів статора	90
Густина струму, А/м ²	4600000
Повітряний проміжок мінімальний, мм	2,7
Повітряний проміжок максимальний, мм	4
Ширина полюсного наконечника, м	0,165
Висота полюсного наконечника, м	0,031

Продовження таблиці 2.1 – Параметри досліджуваного синхронного генератора

Основні розміри пазу статора	
Ширина паза статора, мм	12,5
Висота паза статора, мм	74
Пускова обмотка	
Кількість стержнів на полюс	6
Діаметр стержню, мм	11,95
Обмотка збудження	
Кількість витків	32
Висота провідника, мм	3,75
Ширина провідника, мм	14
Густина струму, А/мм ²	4,97
Клас нагрівостійкості ізоляції	130 °C (B)

2.2 Етап створення поперечного перерізу синхронного двигуна за допомогою програми AutoCad

У цьому розділі буде представлено метод конструювання демпферної обмотки синхронного генератора. Це ефективний інструмент технічного моделювання, що широко використовується для проєктування, моделювання та візуалізації різноманітних механічних та електричних систем.

Розробка моделі для аналізу досліджуваного синхронного генератора. З метою створення моделі синхронного генератора застосовували програмний комплекс AutoCAD для двовимірного моделювання та інтеграції з платформою COMSOL Multiphysics.

Формування поперечного розрізу активної частини дослідного синхронного генератора здійснюється через креслення його компонентів: зовнішнього й внутрішнього розмірів статора та ротора, пазів статора, полюсів

ротора та осі обертання. На етапі подальшого вивчення у програмі COMSOL Multiphysics потрібно буде сформулювати:

- а) коло, яке проходить посерединною повітряного зазору під центром полюса, задля обчислення просторового розподілу магнітної індукції;
- б) дві точки на межі зубців статора – у вертикальній та горизонтальній площинах. Вони потрібні для розрахунку нормальної компоненти тензора магнітного напруження, електромагнітного моменту у майбутньому.

Варто відзначити, що все креслення потрібно розташувати по центру так, щоб центри кругів знаходилися в координатах (0;0) (Рисунок). Крім того, усі перетини ліній на кресленні мають бути виконані із максимально можливою точністю, адже навіть незначний просвіт між ними може спричинити проблеми зі створенням сітки скінченних елементів у програмі COMSOL Multiphysics.

Під час формування файлів в AutoCad важливо слідкувати за тим, щоб всі елементи креслення за своїми параметрами мали назву шару, яка відрізняється від нуля, оскільки в іншому разі COMSOL Multiphysics не зможе їх ідентифікувати.

По завершенню роботи над моделлю файл потрібно зберегти з розширенням *.dxf. Адже саме файли такого формату використовуються для подальшої інтеграції з іншими програмними комплексами.

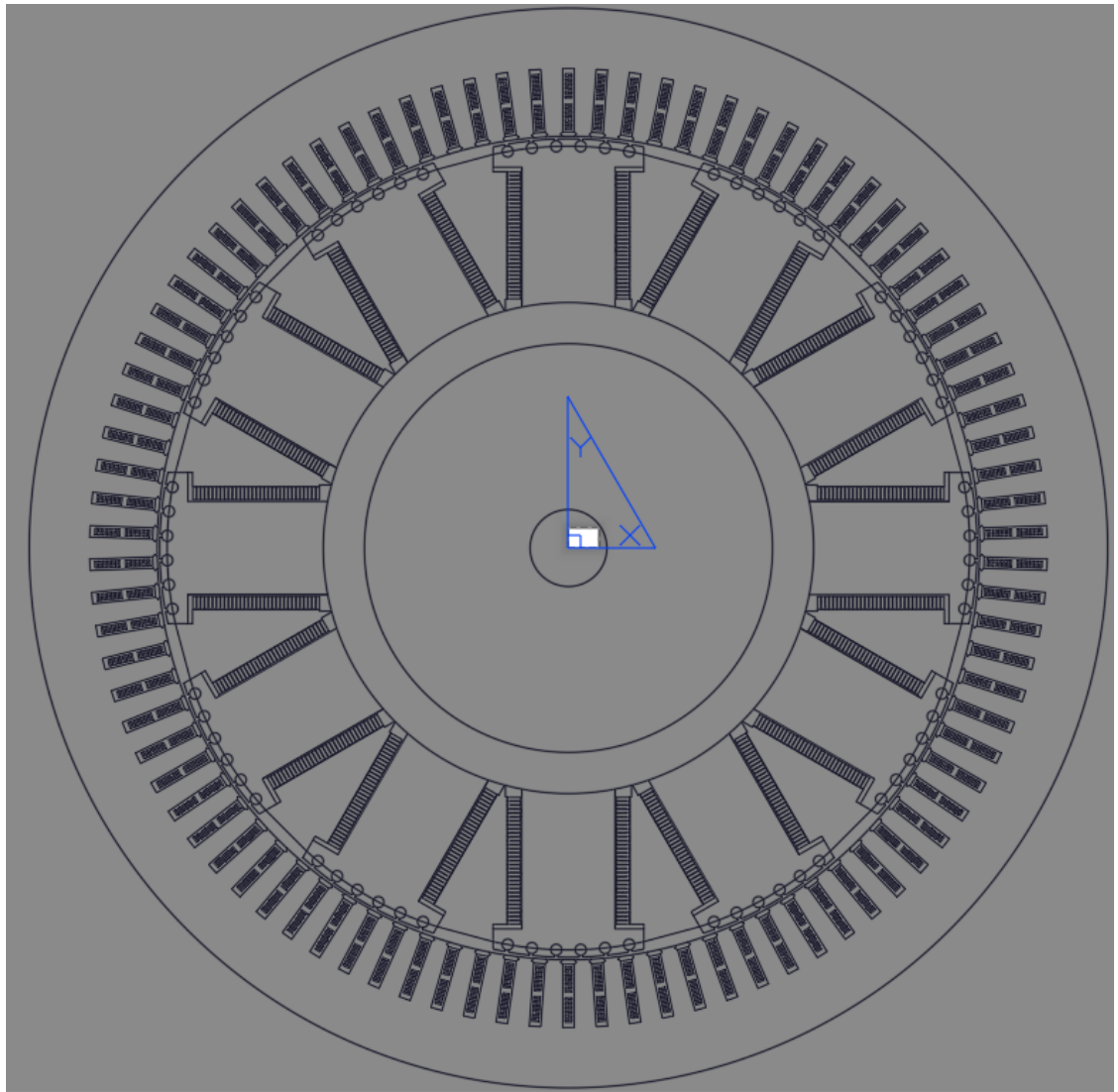


Рисунок 2.1 Поперечний переріз електромагнітної частини досліджуваного синхронного генератора

Із метою оцінки впливу геометрії демпферної обмотки на електромагнітні характеристики синхронного генератора було розроблено та проаналізовано чотири альтернативні конструкції виконань демпферної системи. Основним критерієм порівняння стала незмінність загальної площі поперечного перерізу демпферних стрижнів, що дозволяє виключити вплив маси провідника та його електричного опору на результати дослідження. Таким чином, оцінюється виключно вплив форми, кількості та просторового розташування стрижнів на розподіл магнітного поля та ефективність демпфування.

Для кожного варіанту було створено окрему геометричну модель у CAD-середовищі та проведено електромагнітне моделювання. Різниця між моделями полягала у конфігурації демпферних елементів, тоді як інші параметри машини (розміри полюсного наконечника, величина повітряного зазору, геометрію статора) залишалися без змін. Дані видозмінення ДО представлені нижче (Рисунок 2.2-2.4)

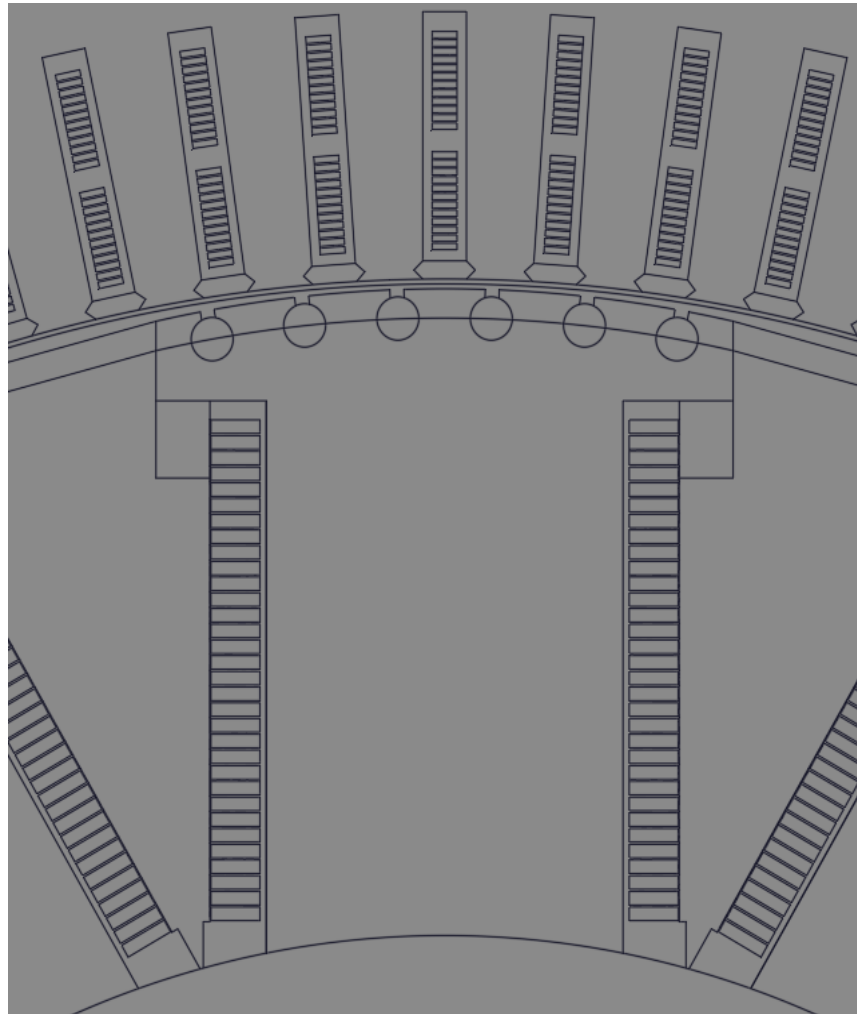


Рисунок 2.2 – ДО із прямокутним профілем витка

Головна перевага конструкції - легкість виготовлення, оскільки прямокутний профіль витка легко формується стандартними технологічними процесами без необхідності у складних операціях гнуття чи прецизійного механічного оброблення.

Використання прямокутного перерізу гарантує високу узгодженість геометрії та стабільну якість виготовлення, що зменшує ризики появи дефектів у місцях з'єднань або заокруглень.

Цей профіль забезпечує зручність встановлення в пазах полюсного наконечника та спрощує збирання демпферної обмотки.

Конструкція залишається доступною для ремонту чи заміни, оскільки окремі частини не потребують складного закріплення чи спеціального обладнання

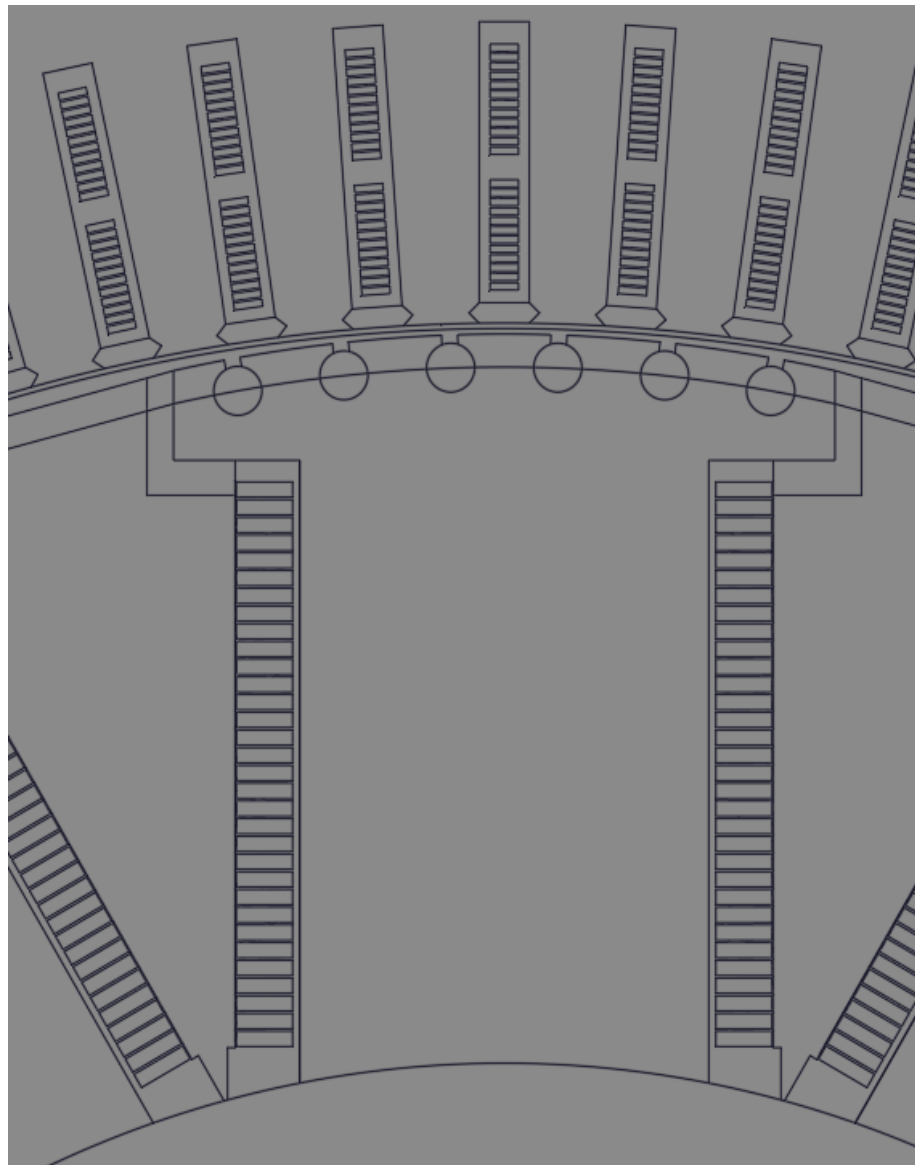


Рисунок 2.3 – ДО з Г-подібним профілем витка

Найбільш вагомою перевагою конструкції є те, що Г-подібний профіль забезпечує збільшену ефективну площу провідника, зберігаючи при цьому

сумарну площу поперечного перерізу демпферної обмотки незмінною, відповідно до вимог дослідження. Зважаючи на ширший розмір геометрії витка, прогнозується збільшення асинхронного моменту, що позитивно впливає на роботу генератора під час запуску, зупинки та в перехідних режимах.

Така форма дозволяє рівномірніше розподіляти струми в демпферній обмотці, що сприяє підвищенню стійкості ротора до коливань та зменшенню рівня імпульсів моменту.

Збільшені розміри витка у поперечній площині сприяють формуванню потужнішого демпферного контурного потоку, що покращує демпфувальні властивості та зменшує амплітуду вібраційних процесів.

Г-подібна форма також надає змогу оптимально розташувати провідник у полюсному наконечнику, забезпечуючи кращий контакт із магнітним потоком та підвищену ефективність роботи демпферної системи.

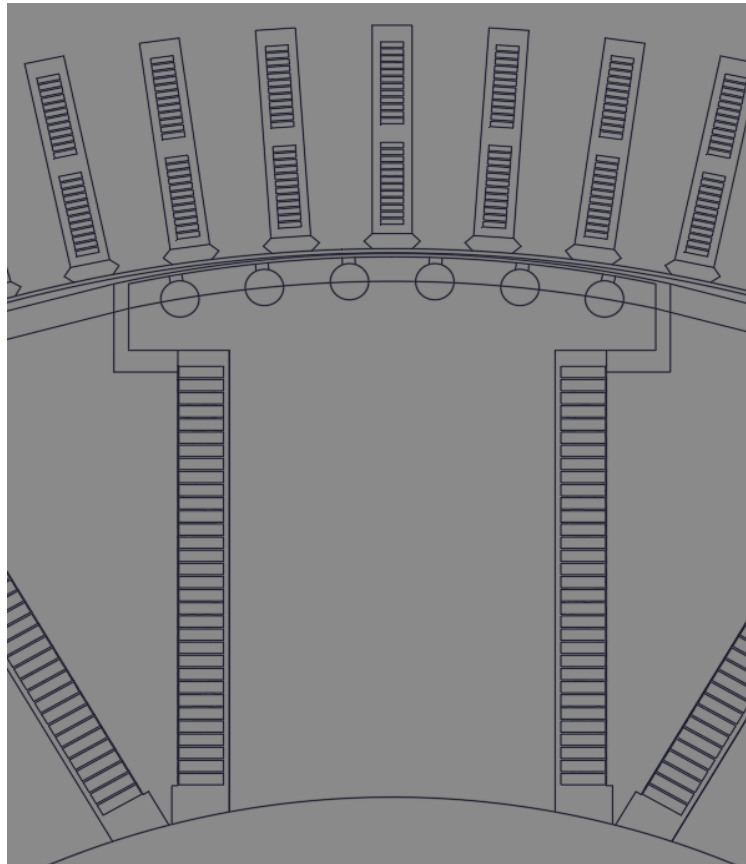


Рисунок 2.4 – ДО із шаром міді на поверхні полюса

У даній конструкції передбачено тонкий шар міді, товщина якого є недостатньою для значного впливу на розподіл магнітного поля в синхронному режимі. Враховуючи незначну товщину та відповідну високу глибину проникнення поля, ця пластина практично є магнітно прозорою, тобто не генерує відчутних вихрових струмів та не впливає на основний потік збудження.

Проте, в асинхронному режимі, коли в роторі виникають швидкозмінні компоненти магнітного поля через ковзання, тонка мідна пластина ефективно діє як демпфуючий елемент. У ній індуються вихрові струми, які забезпечують необхідне гасіння коливань та покращують пускові та перехідні характеристики машини.

Отже, тонка мідна пластина водночас мінімізує вплив у синхронному режимі та забезпечує повне демпфування в асинхронному, що є її важливою функціональною перевагою.

Переваги запропонованих конструктивних модифікацій демпферної обмотки:

Представлені варіанти покращення конструкції демпферної обмотки володіють рядом значних експлуатаційних та виробничих переваг порівняно з класичним виконанням явнополюсних синхронних машин.

1. Усунення критичного конструктивного недоліку стандартної демпферної системи.

У класичному виконанні демпферної обмотки стрижні міцно з'єднані з короткозамкненими кільцями, і в місці пайки постійно виникають руйнівні процеси – термічні тріщини, локальне перегрівання, відшарування. Запропоновані варіанти дозволяють повністю усунути проблему руйнування в зоні пайки, що особливо актуально для обмоток з малою або непарною кількістю стрижнів.

2. Уникнення відриву стрижнів від короткозамкнених сегментів.

Зміни в конструкції гарантують більшу стійкість стиків і більш збалансоване поширення електромагнітного впливу, запобігаючи відділенню чи послабленню контактів стрижнів від короткозамкнутих компонентів демпфера під час довготривалого використання.

3. Полегшення та зниження вартості ремонтних робіт.

Оновлена будова демпферної системи суттєво полегшує процес ремонтування:

- виключається необхідність перепаявати численні контакти;
- мінімізуються обсяги робіт із розбирання;
- знижуються видатки на відновлення замикаючих ланцюгів.

Відтак, нова конструкція сприяє меншій затратності обслуговування та збільшеній надійності ремонту.

Загальні переваги:

4. На синхронну функціональність немає впливу.

Дослідження спрямоване виключно на демпферну систему, яка бере участь у створенні моменту тільки в асинхронних режимах (запуск, перехідні періоди, варіації навантаження).

Оскільки демпферна обмотка не змінює сталу синхронну роботу генератора, запропоновані модифікації не порушують його базових параметрів.

5. Збереження площі поперечного перерізу демпферних елементів.

У всіх розглянутих варіантах збережена вимога щодо незмінності загальної площі перерізу демпферної обмотки.

Це гарантує:

- незмінність електричного опору замикаючого контуру;
- стабільність теплового стану;
- можливість коректного зіставлення різних моделей;
- усунення впливу кількості та форми стрижнів як фактору маси провідника.

Отже, в дослідженні акцентовано увагу на чистому геометричному впливі – важливій перевазі з огляду на достовірність отриманих даних.

Недоліки запропонованих конструкцій

1. Потреба в додатковому електричному з'єднанні замикаючих витків сусідніх полюсів.

Внаслідок зміни форми демпферної системи постає завдання забезпечення електричної провідності між полюсами. Це може ускладнити виробничий процес на етапі створення.

2. Вимога до формування окремих кріплень або контактних поверхонь.

Щоб надійно з'єднуватися з сусідніми секціями демпфера під час лиття витка, потрібно передбачити спеціальні кріплення або контактні майданчики.

Це вимагає додаткових технологічних кроків, проте гарантує стабільність електричного кола й тривалість роботи обмотки.

2.3 Розробка математичної моделі для дослідження розглянутого явнополюсного синхронного генератора

Після завершення роботи над кресленням в AutoCad необхідно зберегти файл у форматі *.dxf, після чого імпортувати його до пакету програм COMSOL Multiphysics. Математичне моделювання синхронної машини ґрунтується на диференціальних рівняннях з частковими похідними, які розв'язуються чисельним методом скінченних елементів у програмі COMSOL Multiphysics.

»	Material	Selection
	Air (mat4)	Domains 2358–2359, 2374–2375, 2444–244...
	Air ventil rotor (mat11)	Domains 1146, 2344, 2351–2352, 2354–235...
	Copper stator f1 (mat1)	Domains 6–7, 10–23, 26–53, 56–103, 106–1...
	Copper rotor fdemp (mat13)	Domains 3256–3295, 3297–3304, 3306–332...
	Copper rotor (mat8)	Domains 2364–2367, 2370–2373, 2376–237...
	Soft Iron (without losses) stator (ma...	Domain 2
	Soft Iron (without losses) rotor (mat...	Domains 2343, 2345–2350, 2353, 2356–235...
	PVDF (Kynar flex 2850) [solid] (mat3)	Domains 1, 3–5, 8–9, 24–25, 54–55, 104–10...

Рисунок 2.5 Задіяні матеріали при побудові математичної моделі

Також необхідно задати деякі постійні, що описують нашу модель, це робиться за допомогою вкладки Global Definitions  Global Definitions →Parameters  Parameters .У вікні, що з'явилося (Рисунок 2.6) ми задаємо значення нашого синхронного генератора. (Таблиця.2.1).

Parameters		
Name	Expression	Value
J2_Chared...	$7.67 \cdot 1.214 \text{ [A/mm}^2\text{]}$	$9.3114\text{E}6 \text{ A/m}^2$
Qf_Chared...	$(J2_Charednik \cdot k_If_o.e.)^2 \dots$	$1.4455\text{E}6 \text{ W/m}^3$
k_If_o.e.	1	1
Qf2	$J2^2/\sigma$	$4.1182\text{E}5 \text{ W/m}^3$
J1	$4.6\text{e}6 \text{ [A/m}^2\text{]}$	$4.6\text{E}6 \text{ A/m}^2$
J2	$4.97\text{e}6 \text{ [A/m}^2\text{]}$	$4.97\text{E}6 \text{ A/m}^2$
Q_1	$J1^2/\sigma$	$3.5278\text{E}5 \text{ W/m}^3$
Q_2	$J2^2/\sigma$	$4.1182\text{E}5 \text{ W/m}^3$
skol	$-0.02 \cdot 0$	0
p	6	6
f1	50 [Hz]	50 Hz
omega	$2 \cdot 3.14 \cdot f1$	314 Hz
rpsec	$f1 \cdot (1 - skol) / p$	8.3333 Hz
L_rot	0.35 [m]	0.35 m
phi_a	-teta_n	-0.40143 rad
teta_n	23 [deg]	0.40143 rad
n_counts	$500 \cdot 2$	1000
n_counts2	$1000 \cdot (13.33333/2) \cdot 1.25$	8333.3
time_start	$0.1 \cdot \text{time_finish} \cdot 0$	0 s
time_finish	$0.12 \text{ [s]} \cdot (33.33333 \cdot 2.5 \cdot 13 \dots$	4 s
time_finish3	$(1/rpsec)$	0.12 s
time_finish4	time_all_rotor_skol	Inf s
time_all_r...	$1/(f1 \cdot \text{abs}(skol))$	Inf s
time_step	$\text{time_finish}/n_counts$	0.004 s
Sp	$8.625\text{e-}4 \text{ [m}^2\text{]}$	$8.625\text{E-}4 \text{ m}^2$

Рисунок 2.6 – Вкладка Меню Parameters

d_st_dempf	0.0121[m]	0.0121 m
S_st_dempf	$3.1415 \cdot (d_st_dempf^2)/4$	$1.1499E-4 \text{ m}^2$
Zb	$\sqrt{2} \cdot U1 / If1$	$60.736 \text{ } \Omega$
unp	10	10
phi_xq	0 [deg]	0 rad
R_rot	0.44865 [m]	0.44865 m
J2_TG	$If \cdot unp / Spaza2$	$4.436E6 \text{ A/m}^2$
If	1880 [A]	1880 A
w2	180	180
U1	3468 [V]	3468 V
Spaza2	$30.6 \cdot 138.5 \text{ [mm}^2\text{]}$	0.0042381 m^2
Qf	$If^2 \cdot Rf \cdot w2 / (Spaza2 \cdot L_rot)$	$5.9053E5 \text{ W/m}^3$
Rf	$ro \cdot L_rot / Spaza2$	$1.3769E-6 \text{ } \Omega$
sigma	$5.998e7 \text{ [S/m]}$	$5.998E7 \text{ S/m}$
ro	$1 / sigma$	$1.6672E-8 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$
I2	260 [A]	260 A
U2	65 [V]	65 V
If1	$57.1 \cdot \sqrt{2} \text{ [A]}$	80.752 A
up	24	24
Im	$If1 \cdot up$	1938 A
L_g2d	0.36[m]	0.36 m
omega_N...	$2 \cdot 3.14 \cdot f1 \cdot 0$	0 Hz
omega_N...	$2 \cdot 3.14 \cdot f1 \cdot 2$	628 Hz
N_points	162	162

Рисунок 2.7 – Продовження меню Parameters

Через вкладку Global Definitions  Global Definitions →

→ Variables  Variables задаємо значення струмів у фазних зонах та обмотці збудження (Рисунок 2.8)

Name	Expression	Unit	Description
k>If_o.e.6	$1 \cdot t$	s	
Ja	$J1 \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi_a + \phi_{xq})$	A/m^2	
Jb	$J1 \cdot \cos(\omega \cdot t - (2 \cdot 3.14/3) + \phi_a + \phi_{xq})$	A/m^2	
Jc	$J1 \cdot \cos(\omega \cdot t - (4 \cdot 3.14/3) + \phi_a + \phi_{xq})$	A/m^2	
Jx	$-Ja$	A/m^2	
Jy	$-Jb$	A/m^2	
Jz	$-Jc$	A/m^2	

Рисунок 2.8 – Значення струмів

Для коректного моделювання електромагнітних процесів у синхронному генераторі в COMSOL Multiphysics необхідно задати фазні струми статора, які створюють основне обертове магнітне поле. У межах

симуляції ці струми виступають як входні параметри, що визначають електромагнітне навантаження машини.

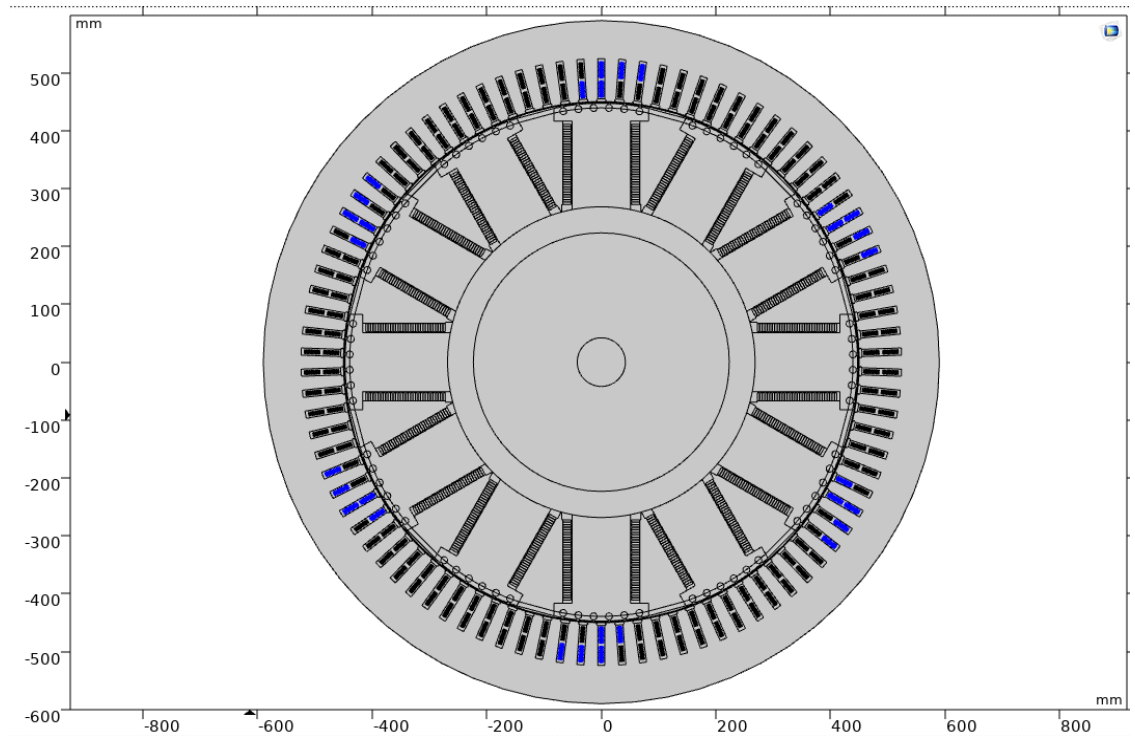


Рисунок 2.9 – Фазна зона “А”

Повторюємо подібні дії з фазовими зонами "z", "B", "x", "C", "y" зубців статора.

При моделюванні синхронної машини в COMSOL Multiphysics особлива увага приділена струмам у роторних обмотках, оскільки саме вони вирішально впливають на формування магнітного поля, перехідні процеси, стабільність синхронізації та ефективність демпферної системи (Рисунок 2.10).

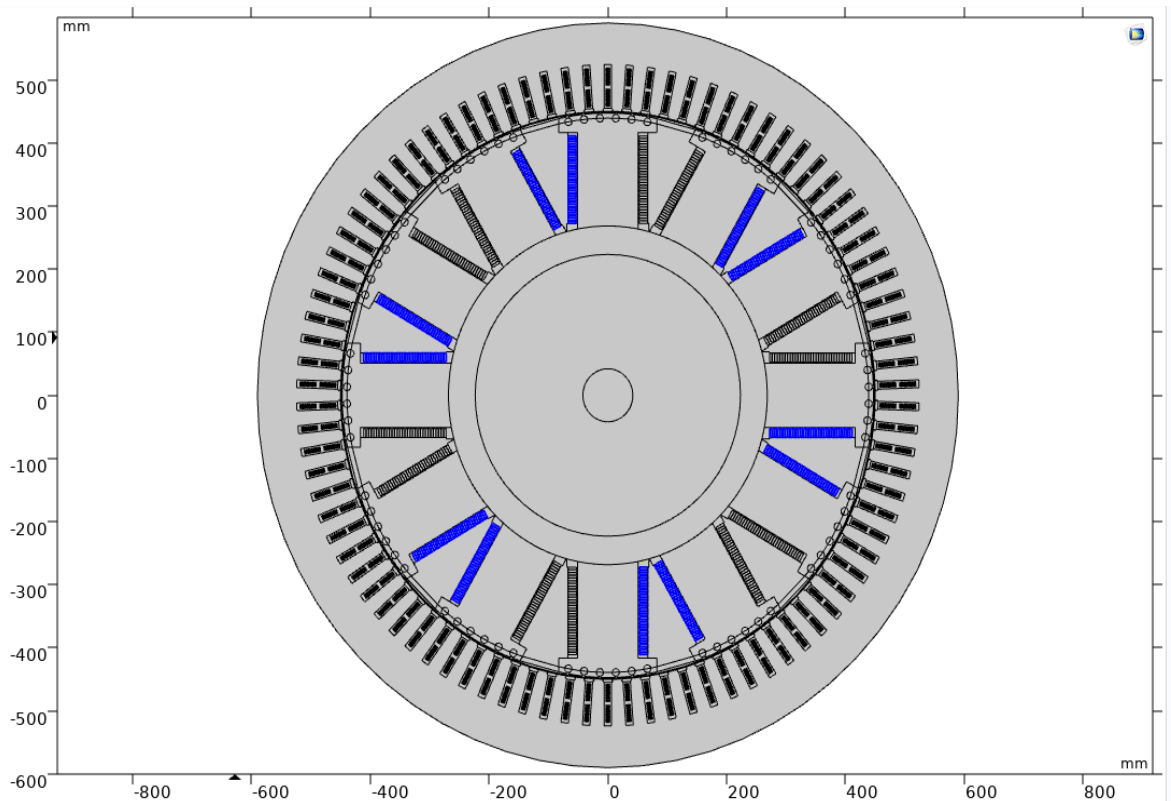


Рисунок 2.10 – Обмотка збудження у роторі

2.4 Математична модель електромагнітних процесів в досліджуваного синхронного генератора

Математична модель синхронного генератора дозволяє кількісно описати електромагнітні, електричні та механічні процеси, що відбуваються в машині під час стаціонарних та перехідних режимів функціонування. В цій роботі використано модель, що враховує фактичні геометричні розміри, властивості матеріалів та конструктивні особливості досліджуваної явнополусної машини.

Математичне моделювання електромагнітних процесів у синхронному генераторі (СГ) є цінним засобом для аналізу режимів його роботи, діагностування несправностей та оптимізації конструкції. Застосування моделей дозволяє детально описувати взаємодію електричних і магнітних полів, враховуючи конструктивні особливості генератора, параметри обмоток, магнітну проникність матеріалів та зовнішні фактори.

Модель спирається на рівняння електромагнітного поля, що включають закони Максвелла та рівняння магнітного кола для компонентів генератора:

Рівняння Максвелла:

$$\nabla H = J$$

де H – магнітне поле, J – густина струму.

Обчислення магнітної індукції через векторний потенціал:

$$B = \nabla A$$

де B – вектор магнітної індукції, A – векторний магнітний потенціал.

Опис струму у середовищі:

$$J = \sigma E + \sigma v \cdot B + J_e$$

де J – щільність загального струму, σ – електрична провідність середовища, E – вектор електричного поля, vB – індукований струм через рух провідника в магнітному полі (сила Лоренца), J_e – зовнішній струм або сторонні джерела струму.

Закон Фарадея:

$$\nabla E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

де E – електричне поле, B – магнітна індукція

Vector potential formulation (Ampère's law):

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$$

Scalar potential formulation (Magnetic flux conservation):

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

Рисунок 2.11 – Фізика моделі у програмному середовищі Comsol Multiphysics.

Процес реалізації алгоритму:

- Геометричне моделювання: побудова 2D моделі генератора за допомогою AutoCad або COMSOL Multiphysics.
- Обчислення магнітного поля: використання чисельних методів, зокрема методу скінченних елементів (MSE).
- Аналіз результатів: дослідження розподілу густини струмів, магнітної індукції, електромагнітного моменту.

Математична модель електромагнітних процесів у СГ є дієвим інструментом для дослідження роботи генератора. Вона надає можливість виявляти недоліки, оптимізувати конструкцію та оцінювати вплив зовнішніх факторів. Застосування сучасних програмних платформ, таких як COMSOL Multiphysics, гарантує високу точність та продуктивність моделювання.

2.5 Висновки до Розділу 2

У другому розділі здійснено комплексний аналіз геометрії, параметрів та принципів роботи досліджуваного синхронного генератора, а також запропоновано та обґрунтовано вдосконалені моделі конструкції демпферної обмотки. Створено геометричні моделі у середовищі COMSOL Multiphysics з урахуванням умови незмінності загальної площі поперечного перерізу демпферних елементів, що гарантує правильне зіставлення всіх варіантів між собою та з базовою моделлю.

Для кожної конструкції визначено її основні переваги з урахуванням технологічності виробництва, надійності, ремонтпридатності та впливу на електромагнітні процеси в машині. Особливо підкреслено особливості конструкцій, що дозволяють усунути основні проблеми експлуатації традиційної комірчастої демпферної системи – наявність короткозамкнутих кілець та стрижневих елементів, які найбільше схильні до руйнування під механічним та термічним навантаженням.

Крім того, у розділі детально описано методику задання граничних умов та підключення фазних і роторних струмів у моделі, що забезпечує коректність

подальших електромагнітних розрахунків. Уточнено принципи роботи окремих конструктивних елементів у синхронному та асинхронному режимах.

Отже, результати цього розділу формують необхідну теоретичну та геометричну основу для подальших розрахунків, моделювання електромагнітних полів та порівняльного аналізу ефективності запропонованих варіантів демпферної обмотки, який буде реалізовано у наступному розділі дипломної роботи.

У цьому розділі було висвітлено питання побудови двовимірної математичної моделі та термомеханічних напружень в СГ.

Побудова двовимірної математичної моделі СГ повинна в себе включати параметри досліджуваного синхронного генератора. Поєднання температурних та механічних моделей реалізовано з метою одержання термомеханічної моделі з аналізу явищ ДО ротора, яка дає можливість відображення напружень в стрижнях демпферної обмотки СГ, прогнозування конфігурацій оптимізації для подальшого вивчення ДО СГ.

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ДЕМПФЕРНОЇ ОБМОТКИ ПОТУЖНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

У цьому розділі здійснюється комплексне моделювання та оптимізація демпферної обмотки досліджуваного явнополюсного синхронного генератора з метою визначення найбільш ефективного конструктивного варіанту. Головна мета – оцінка роботи обмотки при різних значеннях ковзання ($s=0$ до $s=-0.1$) та вплив конструктивних змін на електромагнітні процеси, що дозволяє знизити пульсації моменту, рівномірно розподілити струми та зменшити локальні перегріву.

Для досягнення поставленої мети було використано сучасні методи цифрового моделювання на основі скінчено-елементного аналізу (FEM), що дозволяють точно враховувати геометрію обмотки, матеріальні властивості провідників і магнітопроводів, а також вплив повітряного зазору. Моделювання охоплює як стаціонарні, так і перехідні режими роботи генератора, що забезпечує комплексну оцінку поведінки демпферної обмотки в різних експлуатаційних умовах.

Особлива увага приділяється аналізу впливу форми та профілю витків, товщини провідників та розподілу стрижнів демпферної обмотки на електромагнітні процеси. Це дозволяє не лише визначити оптимальні геометричні параметри, а й оцінити ефективність різних конструктивних рішень з точки зору демпфування асинхронних коливань, рівномірності розподілу струмів і теплових навантажень.

Завдяки такому підходу можливо комплексно порівняти всі запропоновані варіанти конструкцій, виявити їхні сильні та слабкі сторони та обґрунтовано вибрати оптимальний варіант для подальшого виробництва та експериментальних досліджень.

Було розглянуто декілька варіантів конфігурацій ДО. Розглянуті наступні конфігурації:

- 1) Базова конструкція ДО.
- 2) Удосконалена конструкція ДО №1 з прямокутним профілем витка

- 3) Удосконалена конструкція ДО №2 з Г-подібним профілем витка
- 4) Удосконалена конструкція ДО №3 з шаром міді на поверхні полюса.

Загальна площа поперечного перерізу ДО у всіх досліджених моделях була однаковою.

Для рамок дослідження було обрано програмне забезпечення COMSOL Multiphysics.

Для оцінки ефективності кожної з чотирьох запропонованих конструкцій демпферної обмотки (ДО) було проведено серію обчислювальних експериментів у діапазоні ковзання від $s=0$ до $s=-0,1$. Дослідження виконувалося для одного й того самого моменту часу $t=4$ с, що дозволяє коректно порівняти розподіли струмів та моментні характеристики між різними геометричними виконаннями.

3.1 Дослідження базової конструкції ДО синхронного генератора

На кожному рівні ковзання (у діапазоні від 0 до -0,1 з заданим інтервалом моделювання) було визначено просторовий розподіл густини струму у стрижнях демпферної обмотки. Густина струму J відображалась за допомогою кольорового градієнту з незмінними межами відображення, що спрощує порівняння даних для різних конфігурацій.

У створеній моделі прийнято, що переріз демпферної обмотки = const.

Базова модель ДО:

$$s = 0$$

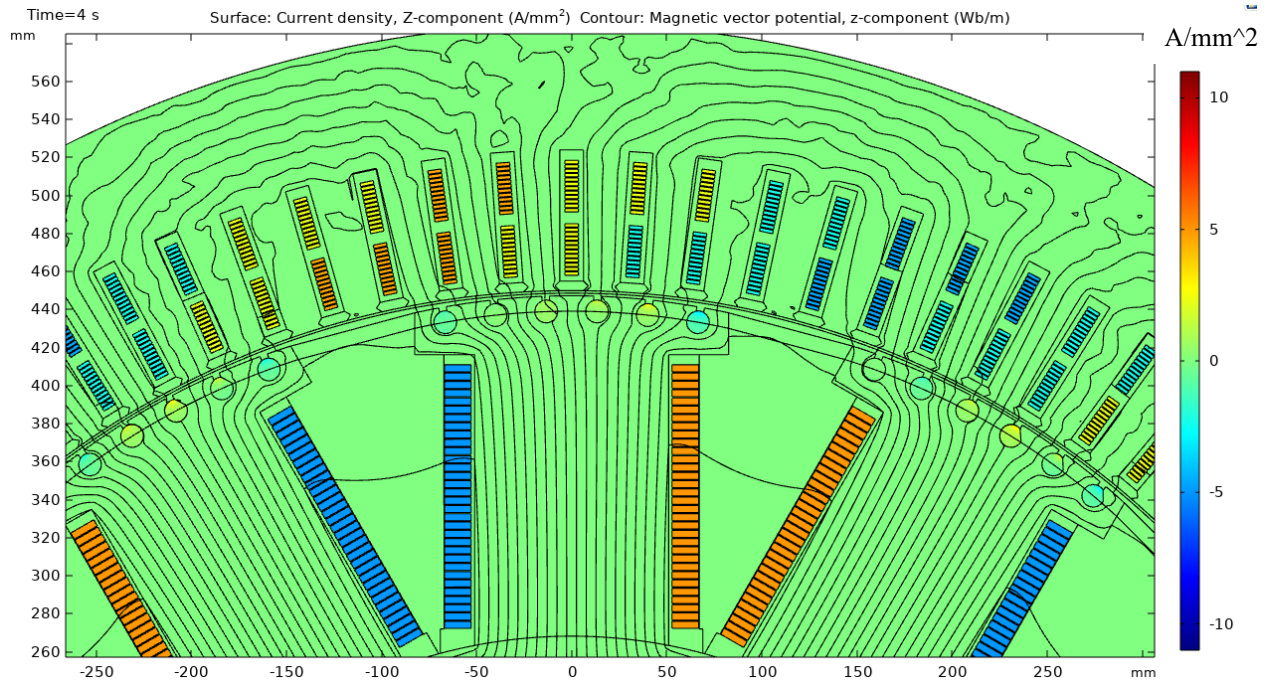


Рисунок 3.1 – Густина струму базової моделі для значення ковзання $s=0$

На Рисунку 3.1 зображений розподіл густини струму в демпферній обмотці синхронного генератора СГ-500 для режиму ($s = 0$), тобто за відсутності ковзання. Візуалізація представлена у формі карти струмової густини (колірна шкала, A/mm^2) разом із лініями рівнів магнітного потенціалу, що дає змогу комплексно оцінювати електричні та магнітні явища всередині генератора.

Картина розподілу струму підкреслює особливості синхронної роботи: найвищі струми зосереджені в певних стержнях демпферної обмотки, які знаходяться поруч з областями найбільших змін магнітного потоку – ці області позначені жовто-зеленим кольором на малюнку. Це підтверджує функцію демпферної обмотки як ефективного механізму гасіння коливань магнітного поля та компенсує асиметрії поля між полюсами.

Стержні зі зниженою величиною струму (представлені синіми та темно-зеленими кольорами) характеризуються меншим впливом магнітного поля на

даному часовому інтервалі, що відповідає стабілізованому режиму роботи машини при $s = 0$.

Лінії рівня магнітного потенціалу детально відображають структуру поля явнопольсного генератора: густе згущення ліній біля крайових зон полюсів вказує на збільшену інтенсивність магнітного потоку, тоді як гладкі лінії в просторі між полюсами засвідчують коректність розробленої моделі та рівномірність поля в синхронному режимі.

У цілому, Рисунок 3.1 демонструє, що базова структура демпферної обмотки ефективно взаємодіє з розподілом магнітного потоку, гарантуючи бажану продуктивність при $s = 0$, і служить важливим еталоном для подальшого аналізу та порівняння з більш досконалими конструкціями, описаними далі.

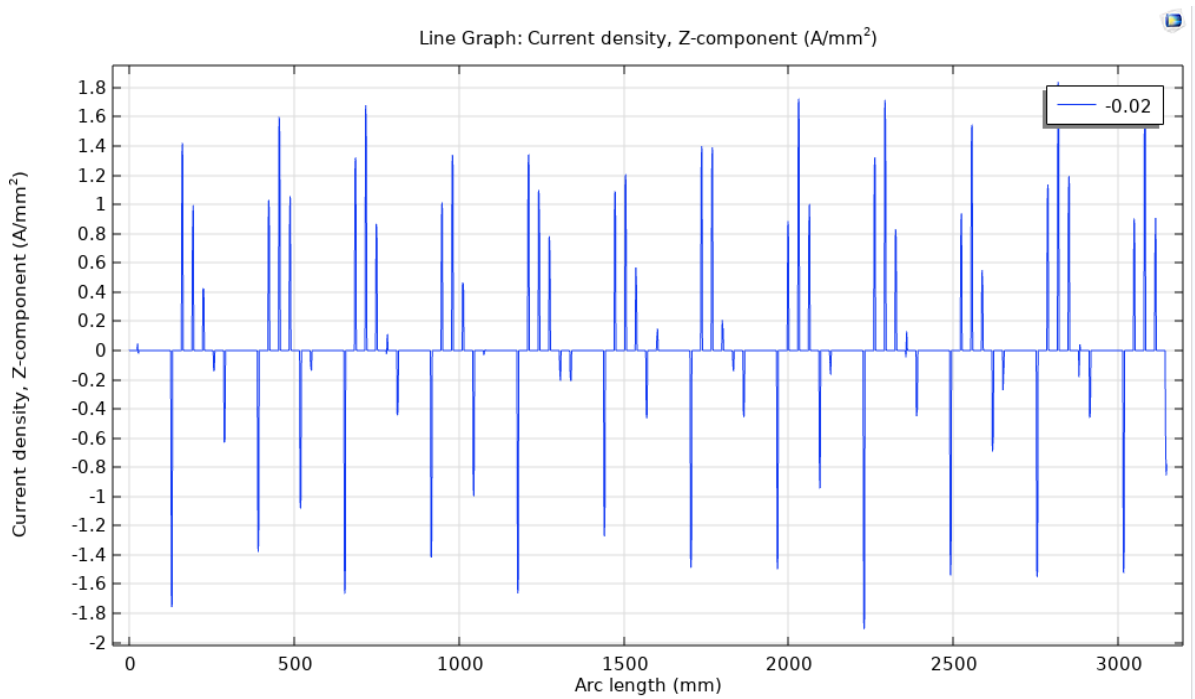


Рисунок 3.2 – Графік густин струмів на поверхні 12 полюсів при $s = 0$

$s = -0,01$

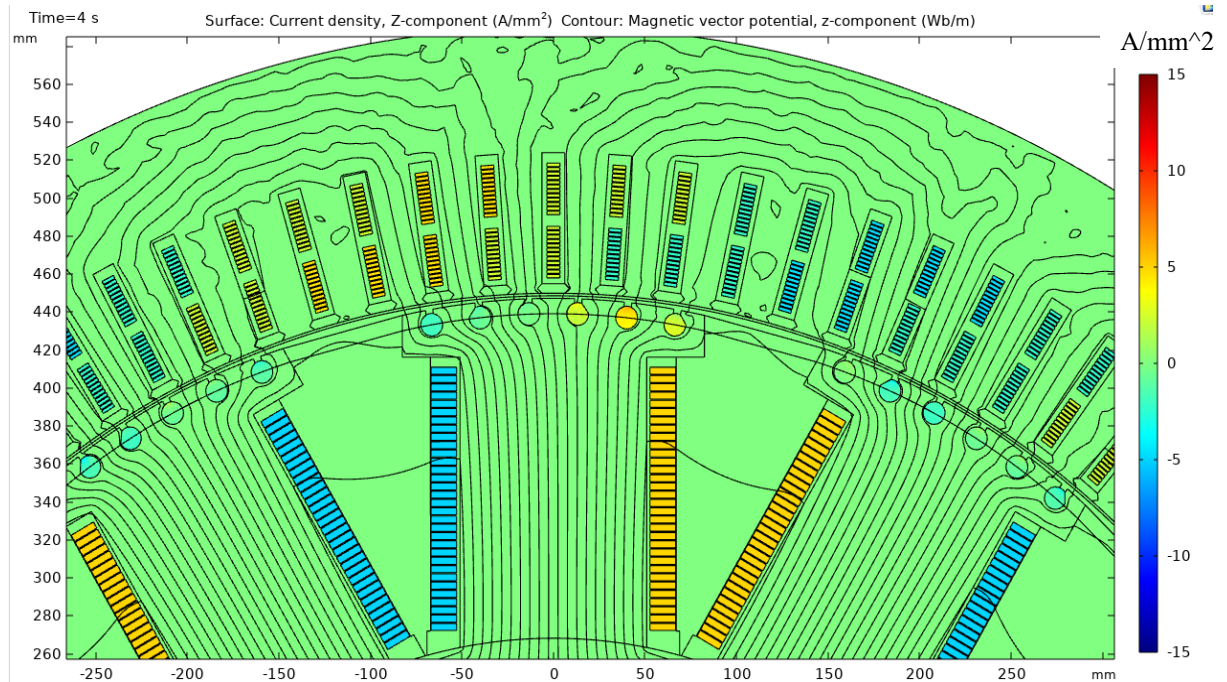


Рисунок 3.3 – Густина струму базової моделі для значення ковзання

$s = -0,01$

Рисунок 3.3 відображає розподіл густини струму в демпферній обмотці базової моделі синхронного генератора при легкому негативному ковзанні, фіксованому на рівні $s = -0,01$. Цей стан передбачає роботу генератора з незначним перевищенням синхронної швидкості, де ротор "наздоганяє" своє власне магнітне поле, викликаючи появу додаткових асинхронних компонентів у струмах демпферної обмотки.

У порівнянні із режимом $s = 0$, помітно підвищується густина електричного струму в окремих елементах демпферної конструкції – це видно за рахунок збільшення кількості ділянок, позначених жовтим, помаранчевим та червоним відтінками. Такий ефект демонструє включення демпферних обмоток під час асинхронної роботи, коли в ній наводяться струми ковзання, величина яких прямо залежить від значення s .

Трансформація малюнку поля помітна й у структурі ліній магнітного векторного потенціалу: контури стають щільнішими в областях між полюсами, що сигналізує про переорієнтування магнітного потоку через механізм ковзання. Магнітний потік намагається зміщуватися від полюсів,

формуючи особливу нерівновагу, саме вона провокує виникнення періодичних струмів у демпферних стрижнях.

Насамперед, при $s = -0,01$ спостерігається збільшення пікових значень густини струму порівняно зі стандартним станом, що відповідає суті асинхронних явищ: із ростом ковзання зростають індуковані струми в демпферній обмотці. Проте, деякі стержні показують зниження струмового навантаження, що акцентує увагу на нерівномірному розподілі струму, властивому перехідним процесам.

Таким чином, Рисунок 3.3 свідчить про те, що навіть за мінімального негативного ковзання базова структура демпферної обмотки функціонує з більшим струмовим навантаженням, формуються зони концентрації великої густини струму та поле змінюється на більш асиметричне.

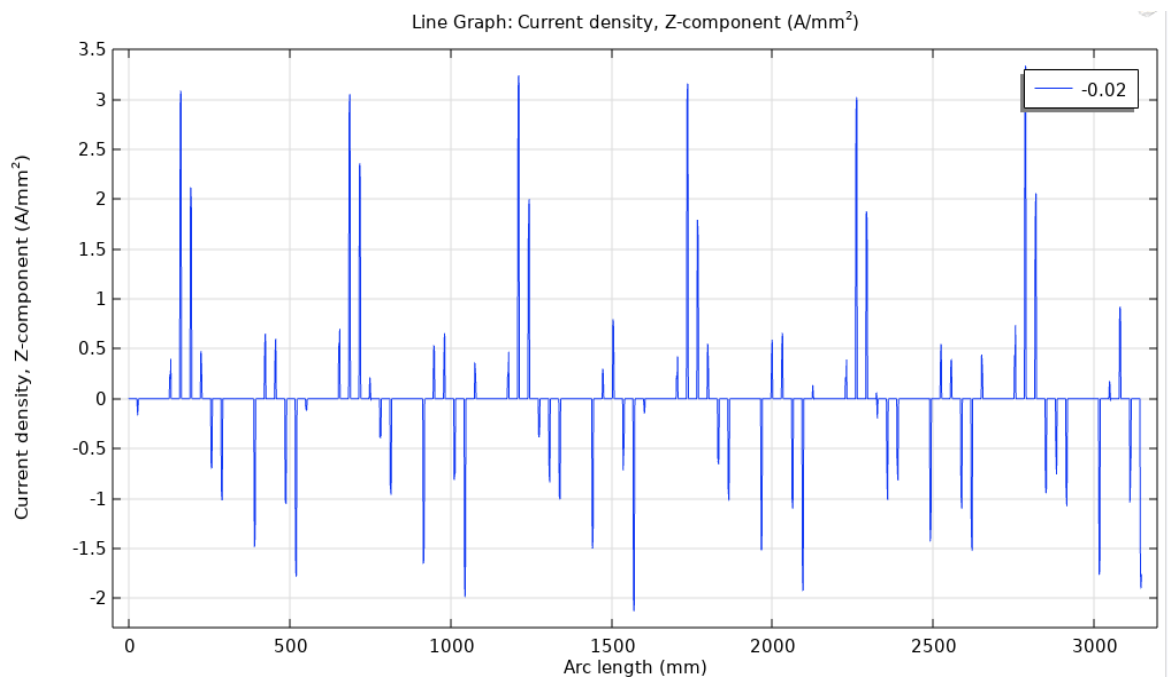


Рисунок 3.4 – Графік густин струмів на поверхні 12 полюсів при $s = -0,01$

$s = -0,02$

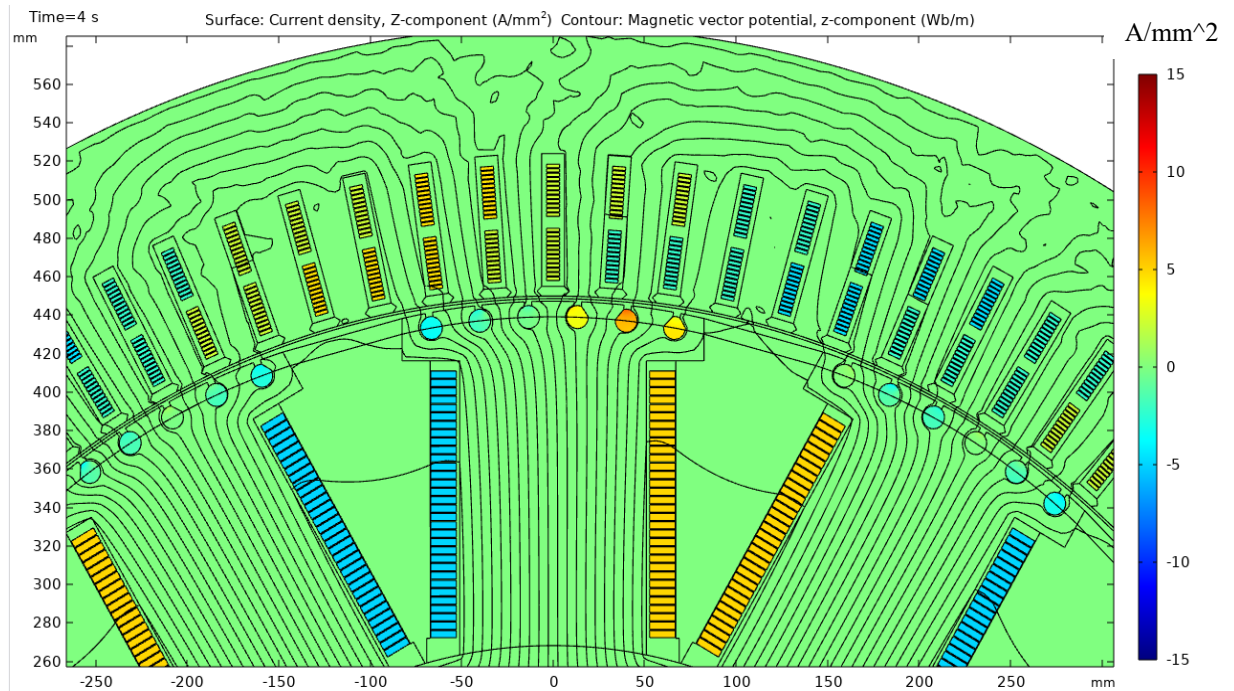


Рисунок 3.5 – Густина струму базової моделі для значення ковзання

$s = -0,02$

Зображення демонструє розподіл густини струму в демпферній обмотці базової моделі синхронного генератора при підвищеному негативному значенні ковзання. Найважливішою особливістю є помітне зростання пікових значень густини струму, які досягають $\pm 13 \text{ A/mm}^2$, що у кілька разів перевищує відповідні значення для режимів $s = 0$ та $s = -0,01$. Такий різкий приріст спричинений збільшенням швидкості відносного руху магнітного поля та ротора, що пропорційно збільшує електромагнітну ЕРС, наведену у витках демпферної системи.

До того ж, можна помітити явну несиметричність у розподілі струмів. Стрижні, розташовані перед активною областю полюса, зазнають інтенсивного теплового впливу та характеризуються високою щільністю струму (визначаються жовтим, помаранчевим та червоним кольорами). На противагу цьому, стрижні у тіньовій зоні полюса володіють значно нижчими показниками струму, переважно представленими блакитно-синім спектром.

Лінії магнітного векторного потенціалу також зазнали відчутної зміни форми. Вони значно скупчуються в проміжках між полюсами, що свідчить про концентрацію магнітного потоку в цих зонах. Це підкреслює перехід машини в режим інтенсивного асинхронного гальмування, де електромагнітні явища проявляються особливо гостро та істотно впливають на нагрівання демпферних кілець.

Отримані дані показують, що зі збільшенні значення ковзання до більш негативних значень демпферна обмотка відчуває значне електричне та термічне навантаження. Тому стає надзвичайно важливо розробляти конструкційні рішення, які дозволять зменшити максимальні значення струмів та досягти більш рівномірного розподілу навантаження між окремими елементами.

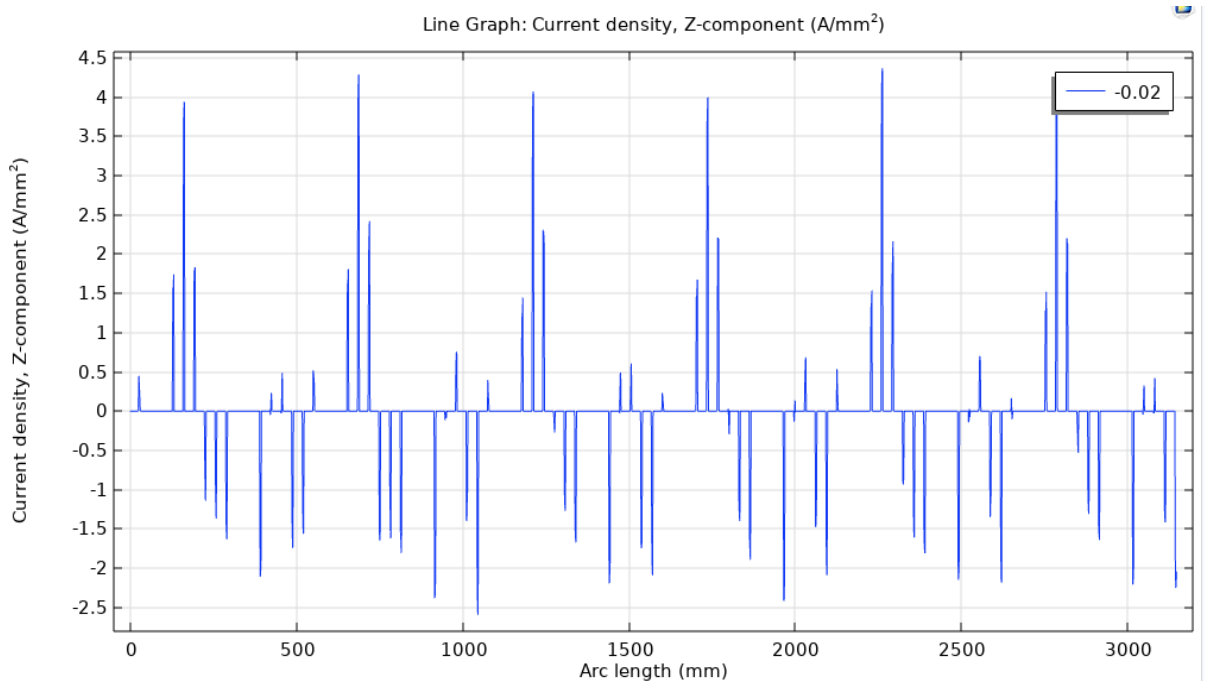


Рисунок 3.6 – Графік густин струмів на поверхні 12 полюсів при $s = - 0,02$

$s = -0,1$

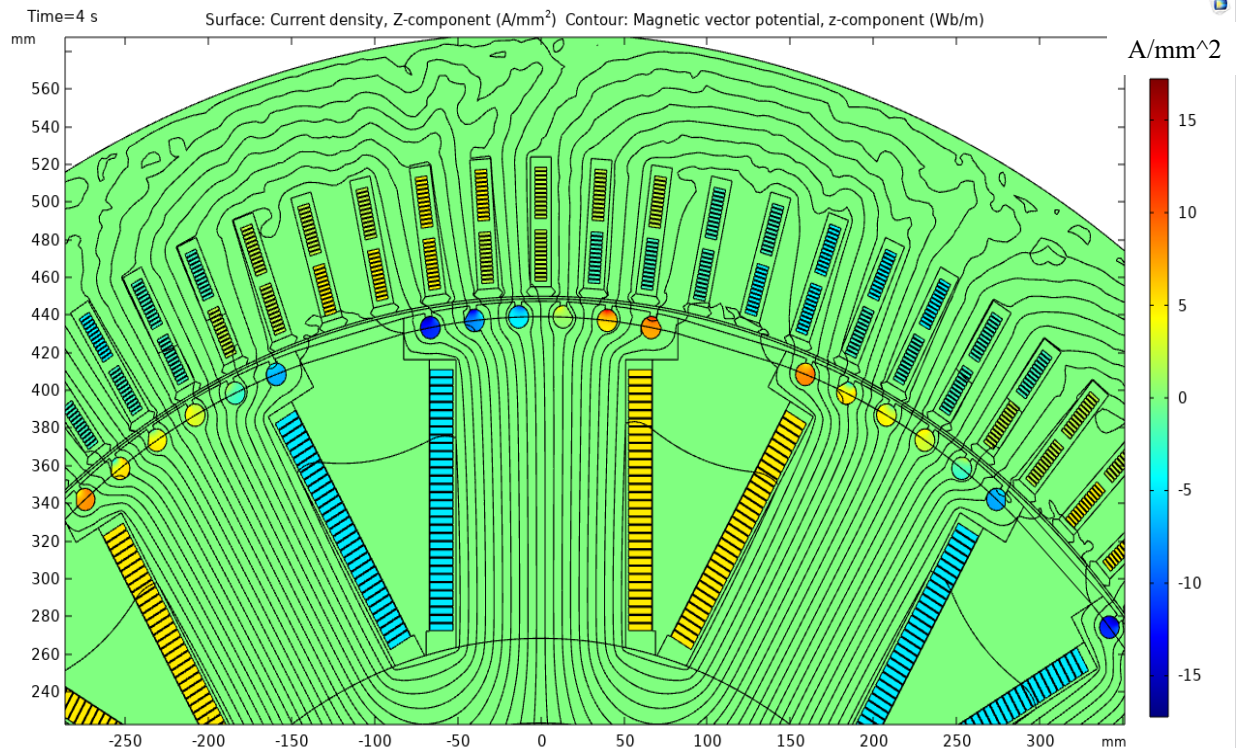


Рисунок 3.7 – Густина струму базової моделі для значення ковзання $s = -0,1$

На Рисунку 3.7 зображено розподіл густини струму в демпферній обмотці типового синхронного генератора при ковзанні $s = -0,1$, який є найекстремальнішим асинхронним режимом серед досліджених. В такому стані різниця між швидкістю обертання ротора та швидкістю обертання магнітного поля статора сягає максимуму, що призводить до появи надзвичайно потужних індукованих струмів у демпферних стержнях.

У порівнянні з попередніми режимами, при $s = -0,1$ фіксується значне збільшення екстремальних значень густини струму, які охоплюють діапазон $\pm 15 \dots 17$ А/мм². Це відображене у кольорі стержнів, де у зоні найбільшого взаємозв'язку магнітного поля та ротора можна побачити насичені червоні та темно-сині області, що сигналізують про максимальні позитивні та негативні значення струму.

Магнітні силові лінії (зелені контури, що представляють лінії рівня магнітного векторного потенціалу) значно стискаються у просторі між полюсами, що вказує на значне спотворення магнітного поля та локальну

концентрацію магнітного потоку. Цей феномен є характерною рисою глибоких асинхронних режимів, коли значна кількість енергії трансформується не в механічну форму, а в теплову через втрати в демпферному контурі.

Значною характеристикою є виявлення чіткої нерівномірності розподілу струмів вздовж дуги ротора. Стержні, що знаходяться під дією активної частини магнітного поля, демонструють значно вищі значення густини струму, на відміну від тих, що розташовані навпроти, де значення мінімальні. Це підкреслює існування значних локальних зон перегріву, які в реальних умовах експлуатації можуть спровокувати механічні навантаження, деформації та навіть руйнування демпферних з'єднань.

Отже, режим ковзання $s=-0,1$ характеризується найбільшою електромагнітною напругою на демпферну систему. Зібрані дані акцентують увагу на необхідності оптимізації конструкції демпферної обмотки з метою обмеження пікових значень струмів та гарантування більш рівномірного розподілу навантаження між усіма її стержнями.

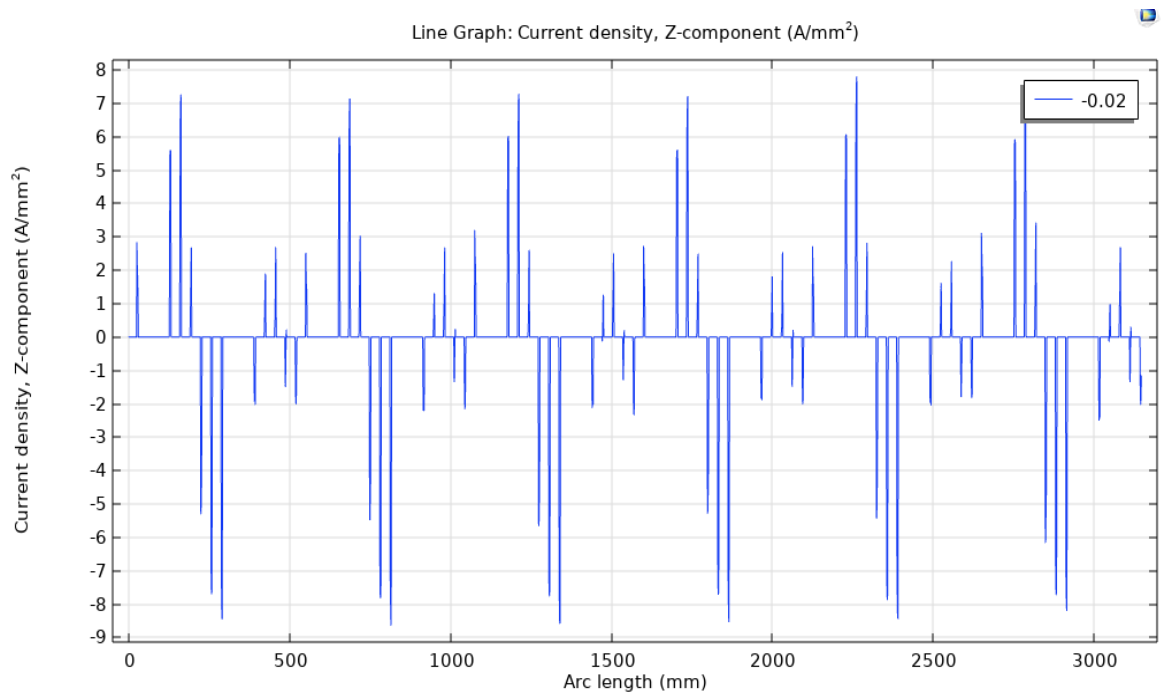


Рисунок 3.8 – Графік густин струмів на поверхні 12 полюсів при $s = -0,1$

Висновки для базової моделі

Внаслідок виконаного моделювання для чотирьох значень ковзання ($s = 0; -0,01; -0,02; -0,1$) було з'ясовано, що перехід генератора з синхронного режиму до асинхронного супроводжується значним підвищенням густини струму в демпферній обмотці та відповідним збільшенням втрат, теплових навантажень та механічних напружень у стержнях. Найвищі значення густини струму були зафіксовані при ковзанні $s = -0,1$, який є найскладнішим режимом: пікові значення перевищували рівень попередніх режимів у 3–4 рази, що підтверджує різке посилення електромагнітної взаємодії між статором та ротором.

Характерною особливістю є нерівномірність розподілу струму по стержнях демпферної обмотки, яка загострюється зі збільшенням ковзання. Це пояснюється зміщенням зони максимальної швидкості магнітного поля статора відносно полюсів ротора та виникненням локальних зон перенавантаження, які в практичних машинах можуть спричинити локальний перегрів, деформацію або навіть руйнування обмотки.

Таблиця 3.1 - порівняння параметрів демпферної обмотки для різних значень ковзання

№	Ковзання s	Максимальна густина струму, A/mm^2	Характер розподілу густина струму	Загальний електромагніт ний момент ротора, Н·м	Результат
1	0	1,5...2,0	Рівномірний, мінімальні викривлення поля	9950	Синхронний режим, струми наведення практично відсутні
2	-0,01	3...4	Незначна асиметрія, локальні підвищення	10274	Початок входження в асинхронний режим
3	-0,02	5...7	Відчутна нерівномірність, чіткі зони перенавантаження	10100	Посилення дії МРС статора, значні втрати

4	-0,1	15...17	Максимальна нерівномірність, різкі пікові зони	9731	Найважчий режим, критичний для демпферної обмотки
---	------	---------	--	------	---

Загальний електромагнітний момент ротора

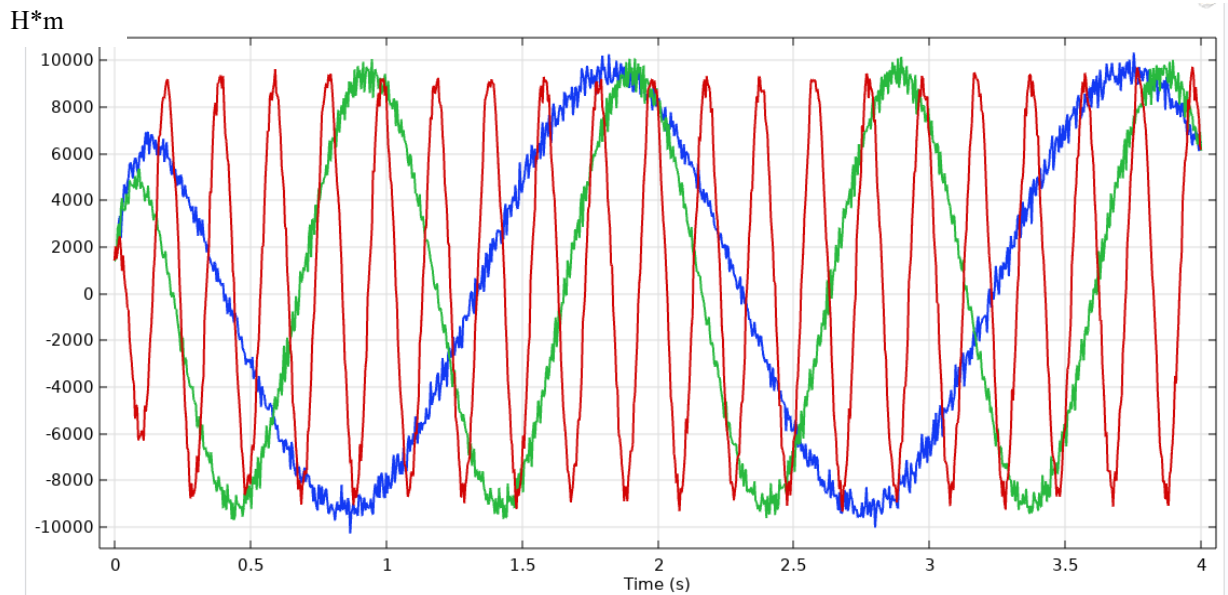


Рисунок 3.9 – розподіл загального електромагнітного моменту ротора
(Синій – $s = -0,01$, зелений – $s = -0,02$, червоний – $s = -0,1$)

При аналізі результатів моделювання досліджується сумарний електромагнітний момент всієї машини, а не лише момент, створений демпферною обмоткою. Відповідно, залежність моменту від ковзання не буде змінюватися пропорційно його величині, оскільки демпферна обмотка є лише одним із джерел моменту в перехідних та асинхронних режимах. Основний внесок у формування моменту продовжує забезпечувати магнітна система ротора та основний магнітний потік машини.

При зміні ковзання варіюється насамперед частка струмів у демпферних стрижнях, тоді як повний момент синхронної машини визначається сукупною дією всіх складових електромагнітної взаємодії. Сумарний момент не зменшується і не зростає лінійно зі зміною ковзання, на відміну від моменту, який генерується лише демпферною обмоткою.

3.2 Дослідження конструкції з прямокутним профілем витка ДО синхронного генератора

$s = 0$

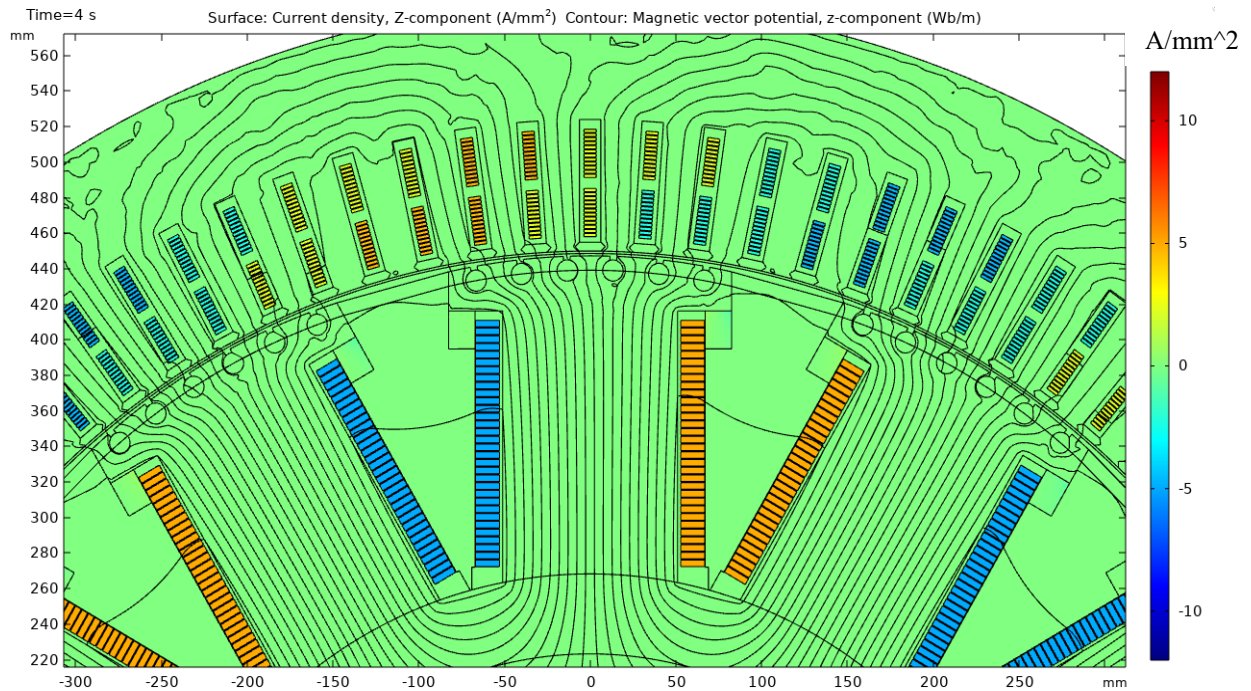


Рисунок 3.10 – Густина струму для моделі із прямокутним профілем витка значення ковзання $s = 0$

На холостому ходу ($s = 0$), модифікована конструкція демпферної обмотки з прямокутною формою витка забезпечує більш однорідний розподіл щільності струму порівняно зі стандартною схемою. Пікові значення струмової щільності значно зменшились, практично не залишаючи локальних зон перенасичення. Це свідчить про зниження інтенсивності вихрових струмів та оптимізацію електромагнітного зв'язку між ротором та статором. Зміна форми витка сприяє ефективнішому розподілу струму по перерізі провідника, тим самим мінімізуючи теплові втрати та підвищуючи надійність роботи обладнання в синхронних умовах.

З точки зору технічної реалізації, використання прямокутного профілю витка дозволяє уникнути локального перегріву та, як наслідок, знизити ризик появи термічних навантажень у стержнях та місцях їх кріплення під час

синхронного функціонування. Враховуючи, що стан $s=0$ є найбільш типовим для генератора в стаціонарному режимі, ця конструкція має потенціал збільшити ресурс обладнання та скоротити необхідність проведення ремонтних робіт.

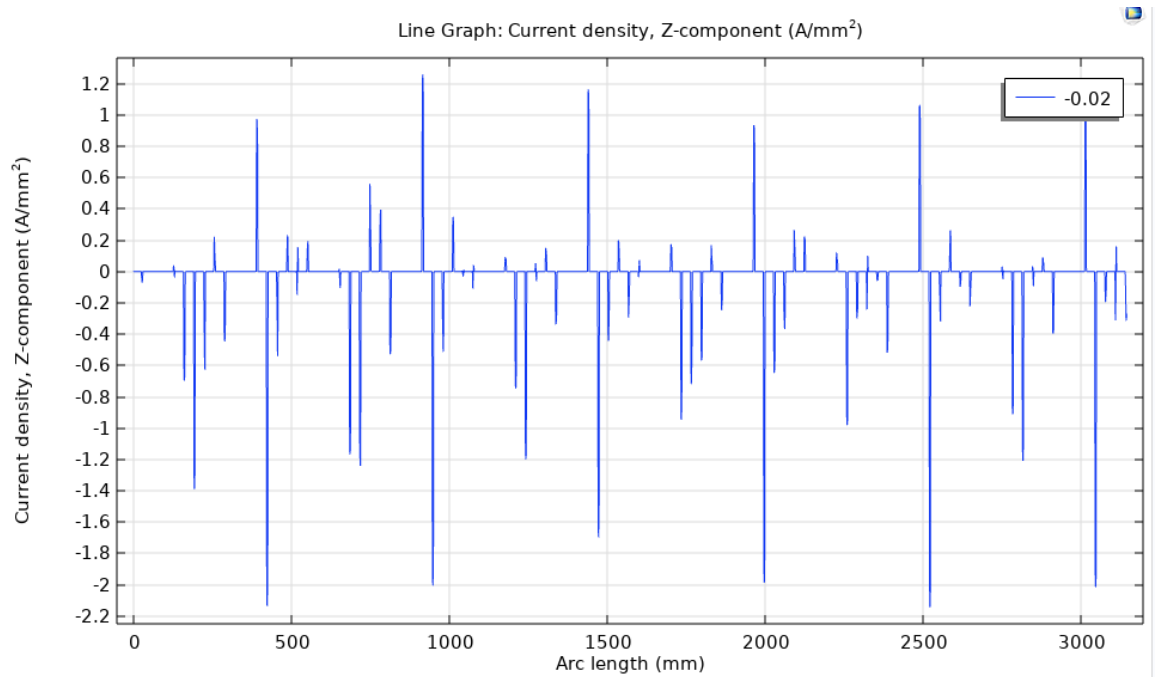


Рисунок 3.11– Графік густин струмів на поверхні 12 полюсів при $s = 0$
 $s = -0,01$

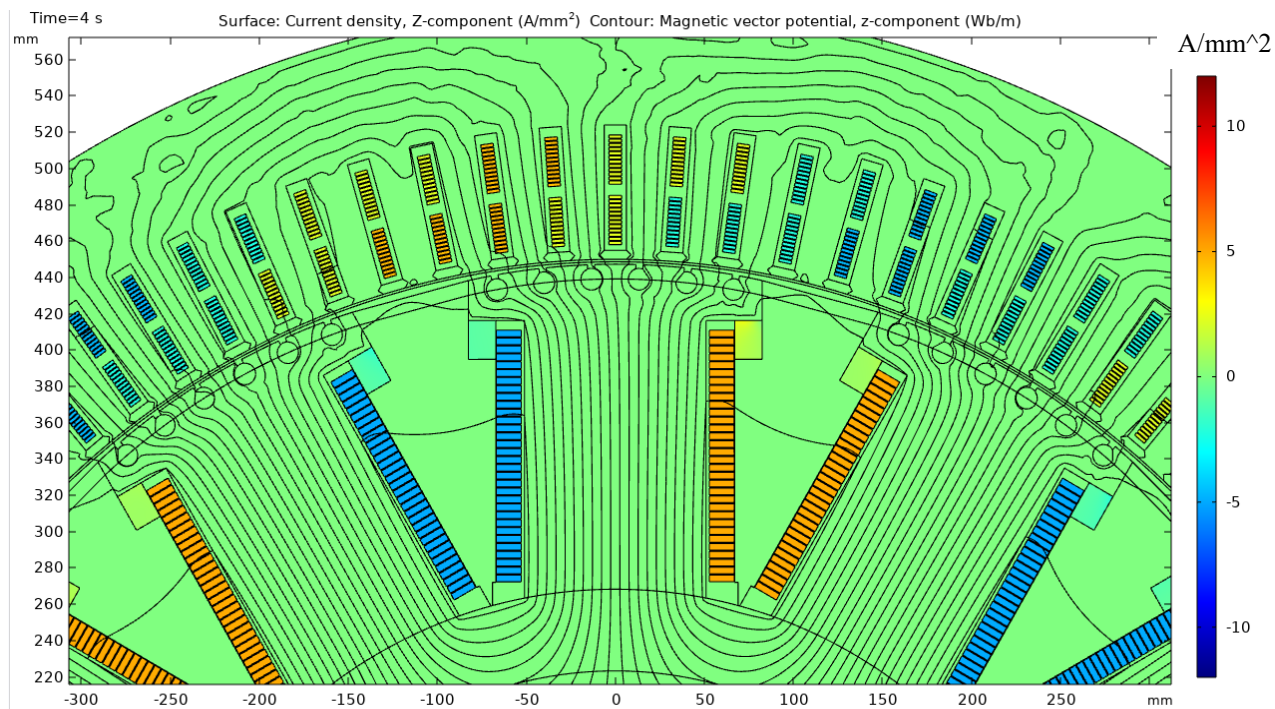


Рисунок 3.12 – Густина струму для моделі із прямокутним профілем
витка значення ковзання $s = -0,01$

На рисунку 3.12 зображено розподіл щільності струму в демпферній обмотці синхронної машини з прямокутними витками під час ковзання $s = -0,01$, яке характеризується незначним асинхронним зміщенням. У цьому режимі індуковані струми залишаються відносно невеликими, однак порівняно з базовою моделлю спостерігається суттєве зростання їхнього максимуму. За таких умов індуковані струми демонструють помірну величину, проте їхнє просторове розташування чітко показує специфіку функціонування прямокутних провідників.

Густина струму досягає $\pm 3 \text{ А/мм}^2$, що менше максимальним значенням для базової конструкції ($\pm 4 \text{ А/мм}^2$).

Магнітні силові лінії демонструють помітне скупчення в активних областях, що вказує на зосередження магнітного потоку в окремих місцях і обумовлює неоднорідність індукованих струмів. Подібний розподіл є властивим прямокутному профілю витка, оскільки форма провідника обмежує можливість рівномірного демпфування.

Помітною особливістю є суттєва розбіжність у завантаженні між розташованими поруч стрижнями: деякі з них зазнають значно більшого навантаження, а інші практично не залучені до гасіння коливань. Це може спричинити виникнення зон інтенсивного нагрівання та посилення тепловтрат.

Отже, при зміщенні $s = -0,01$ демпферна обмотка з прямокутною формою витка показує помірне, проте неоднорідне електричне навантаження.

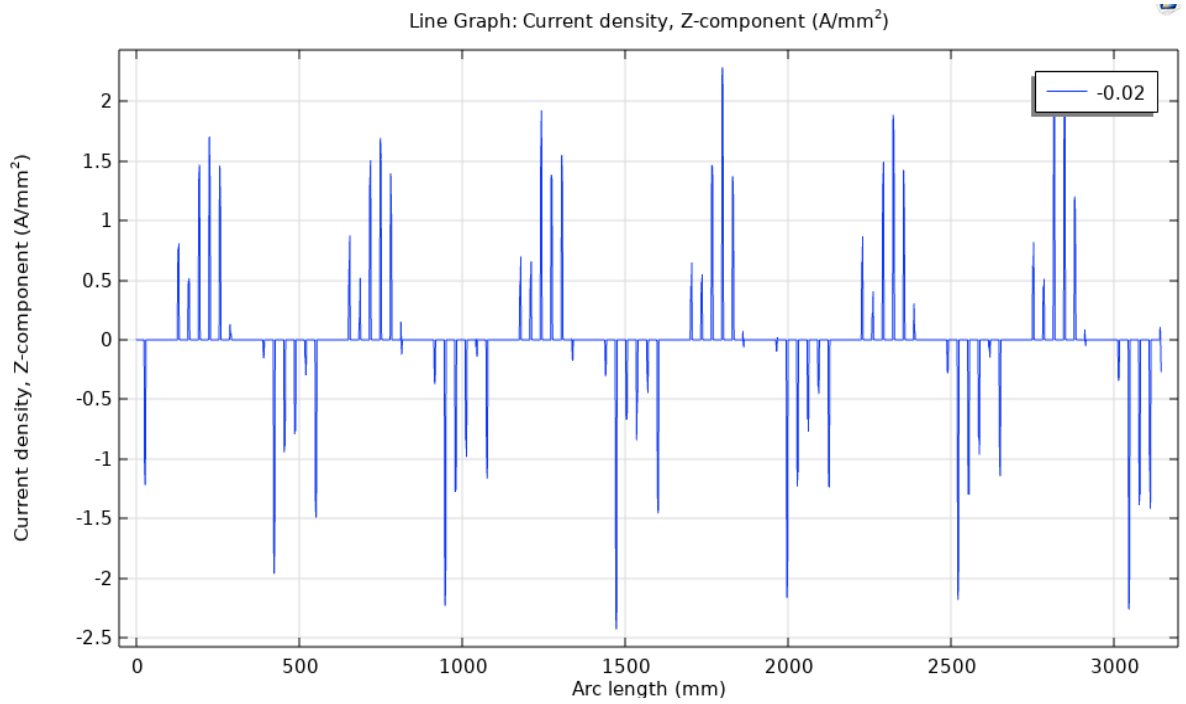


Рисунок 3.13– Графік густин струмів на поверхні 12 полюсів при $s = -0,01$

$s = -0,02$

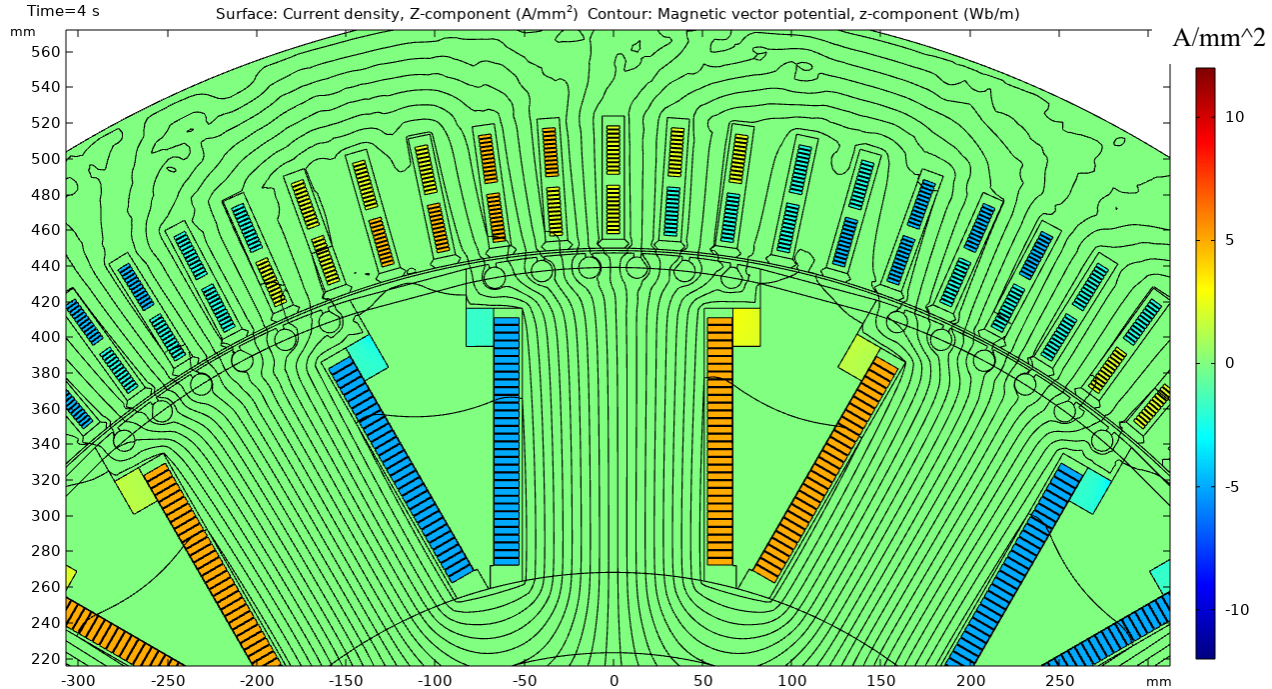


Рисунок 3.14 – Густина струму для моделі із прямокутним профілем витка значення ковзання $s = -0,02$

На рисунку 3.14 зображено розподіл густини струму в демпферній обмотці з прямокутним профілем витка при ковзанні $s = -0,02$. У рамках даної моделі максимальні показники щільності струму в самих прямокутних стержнях досягають приблизно 4 А/мм^2 , що свідчить про відносно незначні індуктовані струми в цих компонентах.

У зоні прямокутних стержнів панують помірні величини – аналогічні тим, що були зафіксовані в попередній моделі. Неоднорідність розподілу зберігається: окремі стержні в зонах високої активності фіксують завищені значення, тоді як інші демонструють значно менші, формуючи області концентрації навантаження та ризику перегріву.

В результаті, при $s = -0,02$ для даної конструкції прямокутні стержні не характеризуються екстремальними сплесками – їхні струми залишаються близько 4 А/мм^2 – однак актуальною постає проблема нерівномірного розподілу, що вимагає корекції на етапі проектування.

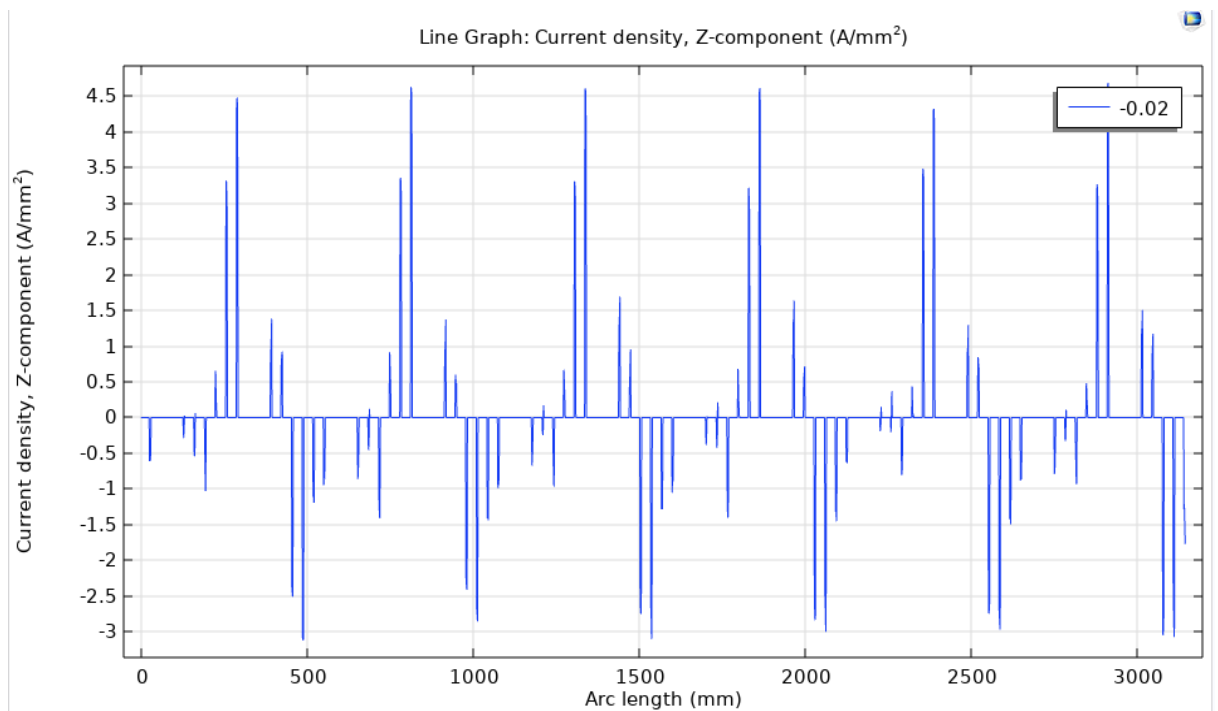


Рисунок 3.15 – Графік густин струмів на поверхні 12 полюсів при $s = -0,02$

$s = -0,1$

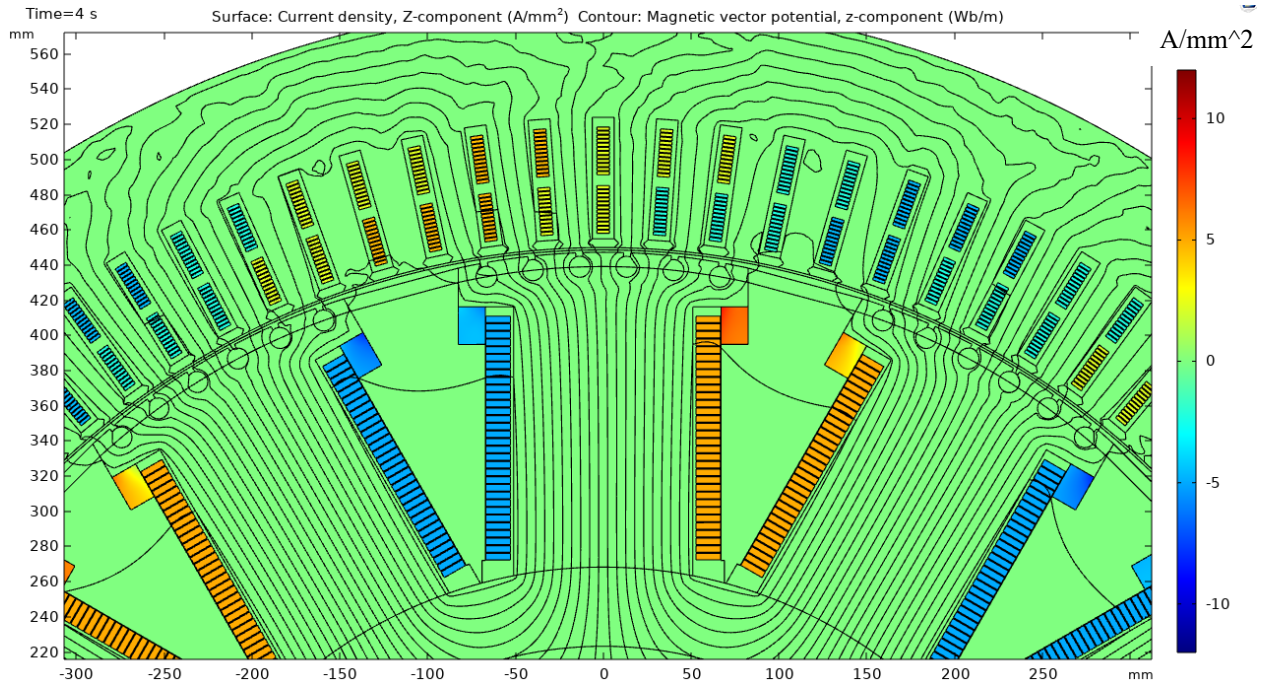


Рисунок 3.16 – Густина струму для моделі із прямокутним профілем витка значення ковзання $s = -0,1$

При аналізі кольорової гами встановлено, що при $s = -0,1$ амплітудне значення густини струму в обмотках варіюється в межах $\pm 5 \dots 10$ А/мм². Це відображається на поперечному розрізі провідників у вигляді яскравого контрасту насичених червоних та темно-синіх областей, які символізують зони найбільшого протікання струму позитивної та негативної полярності. Така висока густина струму є ознакою значного електричного навантаження на провідники прямокутного профілю.

Картина розподілу ліній магнітного векторного потенціалу (чорні контури) демонструє комплексний малюнок магнітного поля. Відзначається тенденція до стискання магнітних ліній у зубцях статора та областях магнітопроводу ротора, що прилягають до повітряного зазору. Це є свідченням насичення магнітного кола та значного впливу реакції якоря, що характерне для режимів з великим навантаженням. Деформація ліній поля сигналізує про наявність значних електромагнітних зусиль, які діють на зуби статора та полюси ротора.

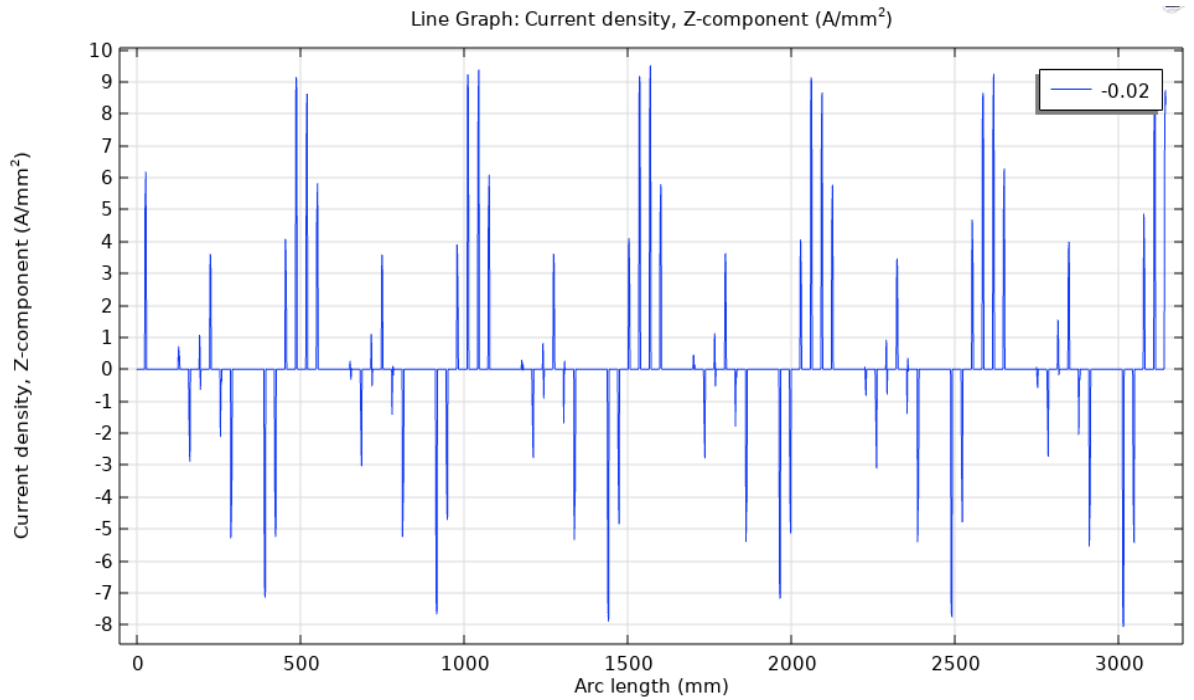


Рисунок 3.17– Графік густин струмів на поверхні 12 полюсів при $s = -0,1$

Таблиця 3.2 - порівняння параметрів демпферної обмотки із прямокутними витками для різних значень ковзання

№	Ковзання s	Максимальна густина струму, А/мм ²	Характер розподілу густини струму	Загальний електромагнітний момент ротора, Н·м
1	0	1,5...2,0	Рівномірний, мінімальні викривлення поля	9950
2	-0,01	2...3	Незначна асиметрія, локальні підвищення	10269
3	-0,02	4...5	Відчутна нерівномірність, чіткі зони перенавантаження	10171
4	-0,1	9...10	Максимальна нерівномірність, різкі пікові зони	9966

Загальний електромагнітний момент ротора

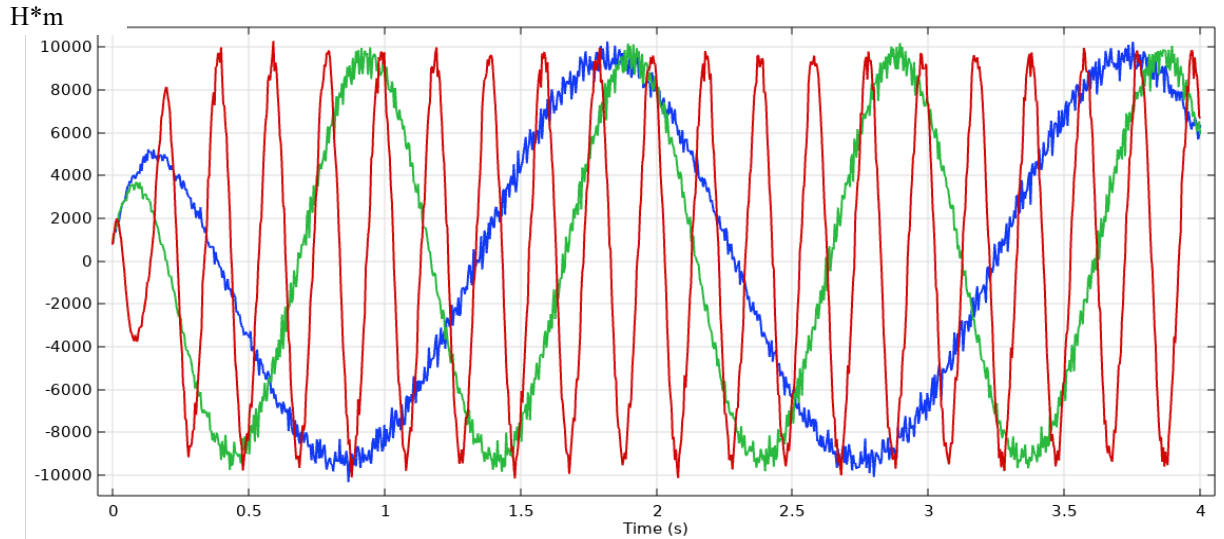


Рисунок 3.18 – розподіл загального електромагнітного моменту ротора
(Синій – $s = -0,01$, зелений – $s = -0,02$, червоний – $s = -0,1$)

3.3 Дослідження конструкції із Г-подібним профілем витка ДО синхронного генератора

$S=0$

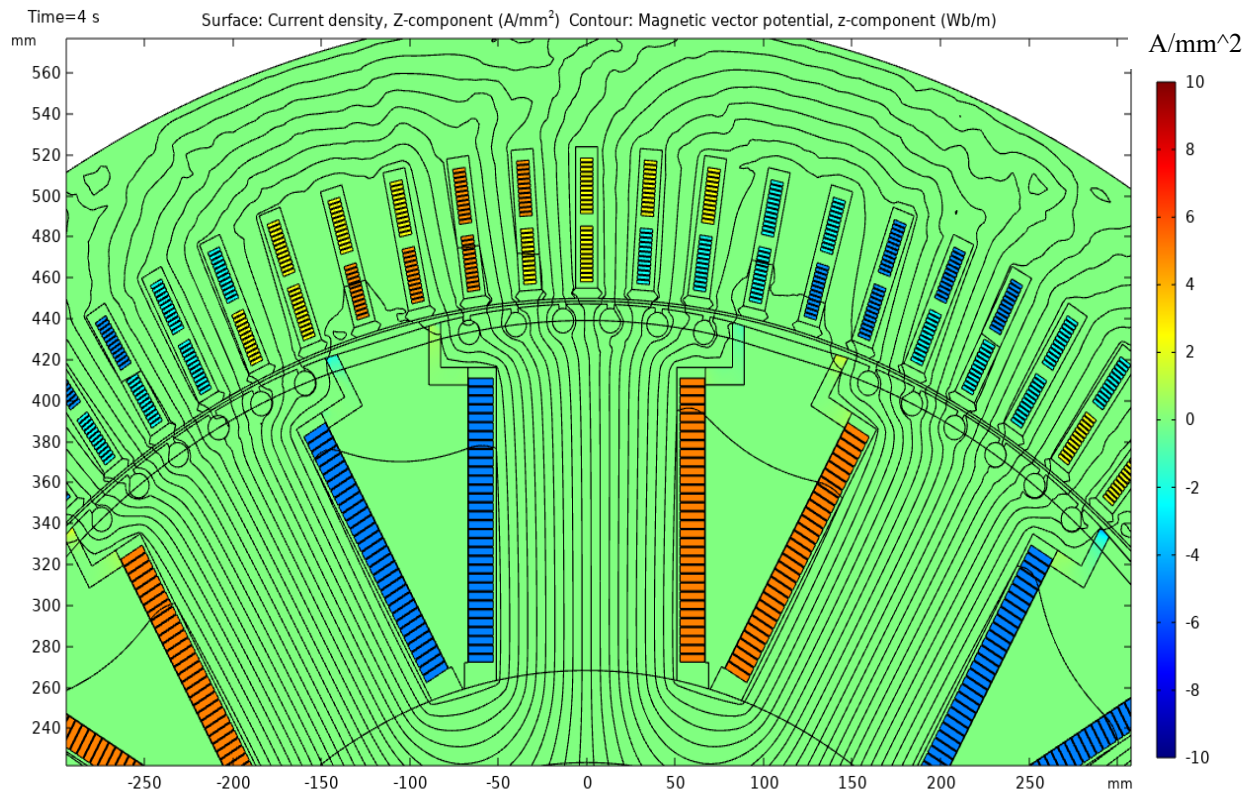


Рисунок 3.19 – Густина струму для моделі із Г-подібним профілем витка
значення ковзання $s = 0$

Рисунок 3.19 представляє собою результати моделювання густини струму та магнітного поля для електричної машини з Г-подібним профілем витка в синхронному режимі при ковзанні $s = 0$. У цьому стаціонарному стані відсутні інтенсивні перехідні явища. Візуалізація густини струму показує, що її величина в ДО є помірною, переважно в межах ± 2 А/мм². Лінії магнітного векторного потенціалу (чорні контури) мають рівномірний та симетричний вигляд, що підтверджує стабільну конфігурацію магнітного поля та мінімальне спотворення під впливом реакції якоря. Ледь помітне згущення ліній у зоні зубців статора та в кутах полюсів вказує на локальне насичення магнітопроводу. Ця візуалізація документує типовий режим експлуатації машини при номінальній швидкості.

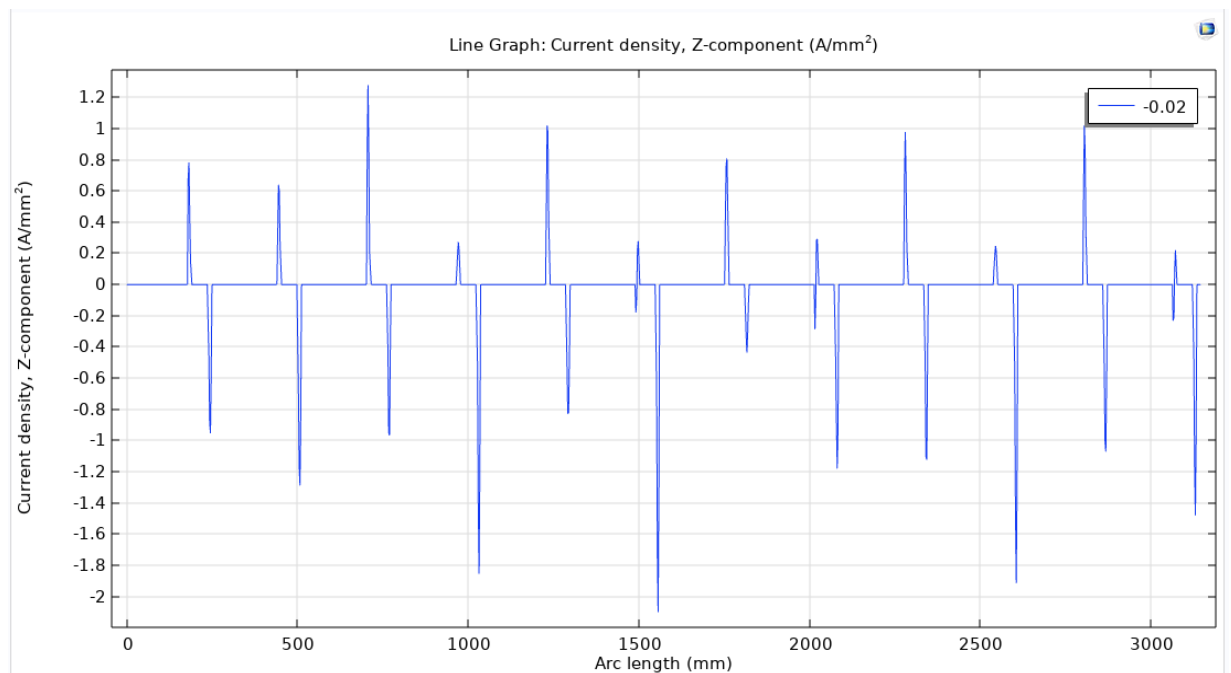


Рисунок 3.20 – Графік густин струмів на поверхні 12 полюсів для Г-подібної моделі $s = 0$

S=-0,01

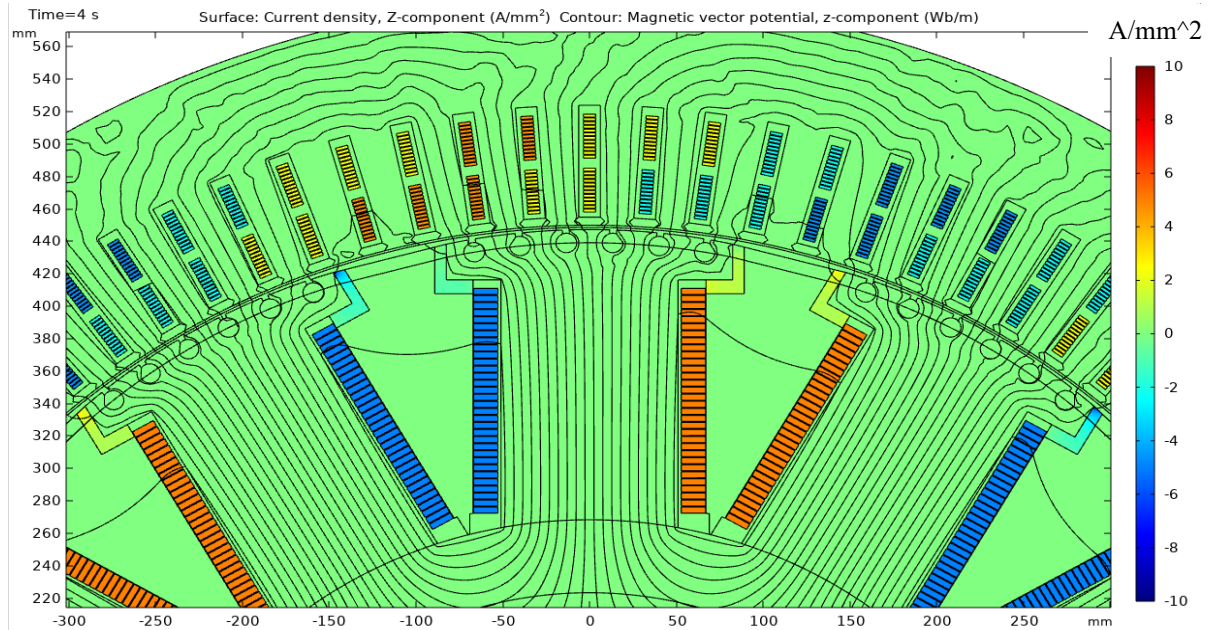


Рисунок 3.21 – Густина струму для моделі із Г-подібним профілем витка значення ковзання $s = -0,01$

У порівнянні з ідеальним синхронним режимом ($s=0$), невелике ковзання $s = -0,01$ провокує генерацію слабких, але стійких індукованих струмів в обмотці. Попри те, що цей рівень ковзання є мінімальним, він спричинює збільшення пікових значень густини струму до приблизно ± 6 А/мм². Це свідчить про адекватну електромагнітну характеристику обмотки при невеликих динамічних навантаженнях.

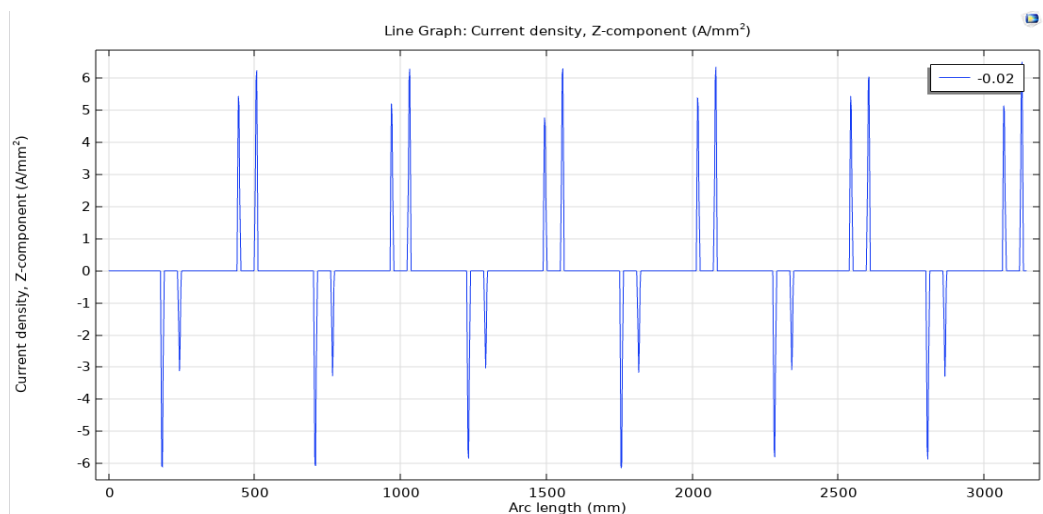


Рисунок 3.22 – Графік густин струмів на поверхні 12 полюсів для Г-подібної моделі при $s = -0,01$

$s = -0,02$

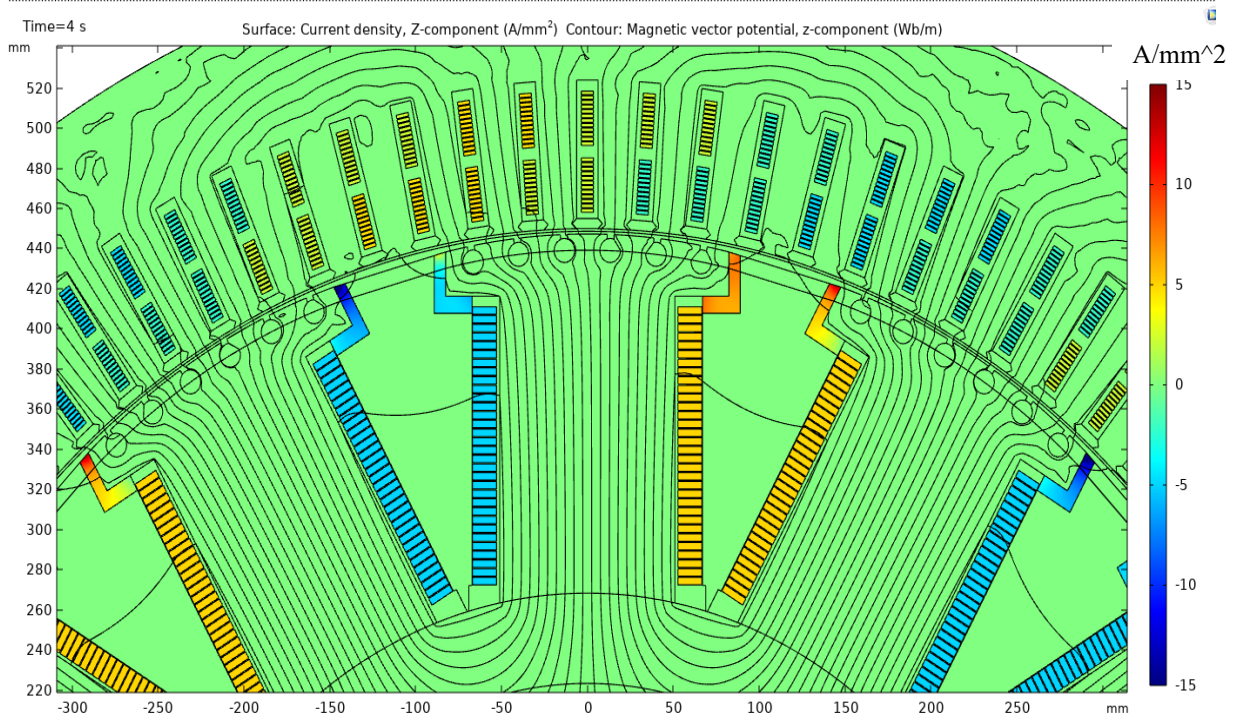


Рисунок 3.23 – Густина струму для моделі із Г-подібним профілем витка
значення ковзання $s = -0,02$

У рамках даної моделі максимальні показники щільності струму в самих прямокутних стержнях досягають приблизно 11 A/mm^2 , що свідчить про відносно великі індуктовані струми в цих компонентах. Такий рівень навантаження є характерним для режимів із підвищеним ковзанням, коли зміна магнітного потоку в зоні демпферної обмотки посилюється. Збільшення щільності струму призводить до локального нагрівання та формування чітко виражених зон перенавантаження, що добре узгоджується з візуальним розподілом поля на моделі.

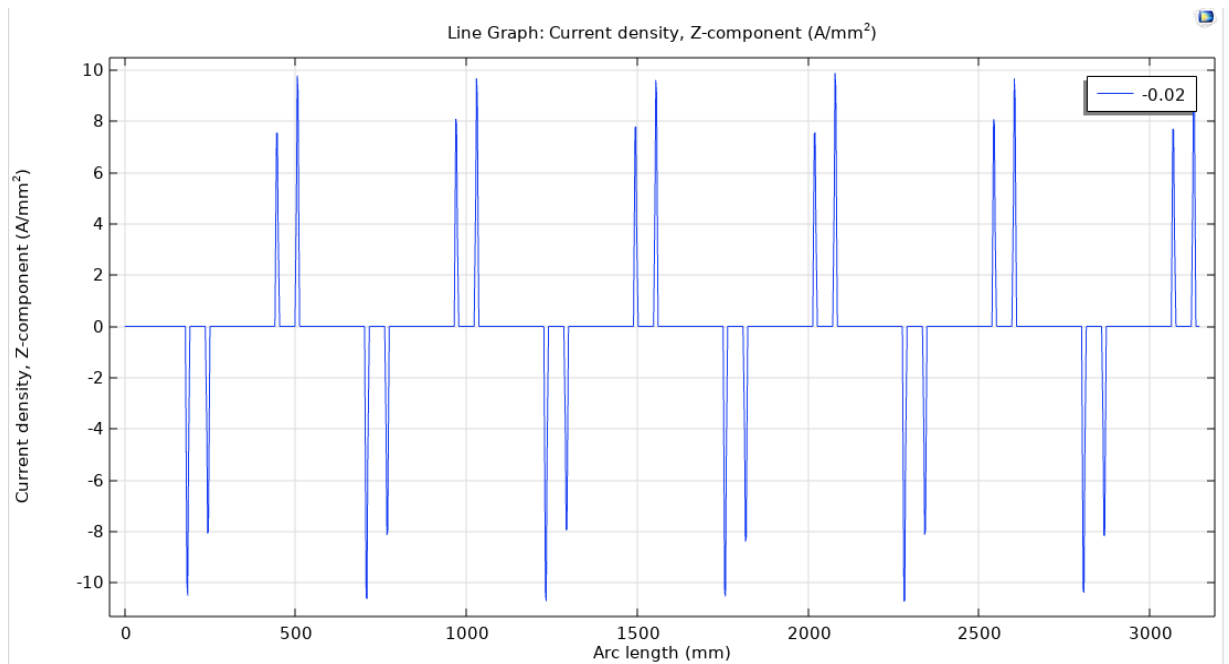


Рисунок 3.24 – Графік густин струмів на поверхні 12 полюсів для Г-подібної моделі при $s = -0,02$

$s = -0,1$

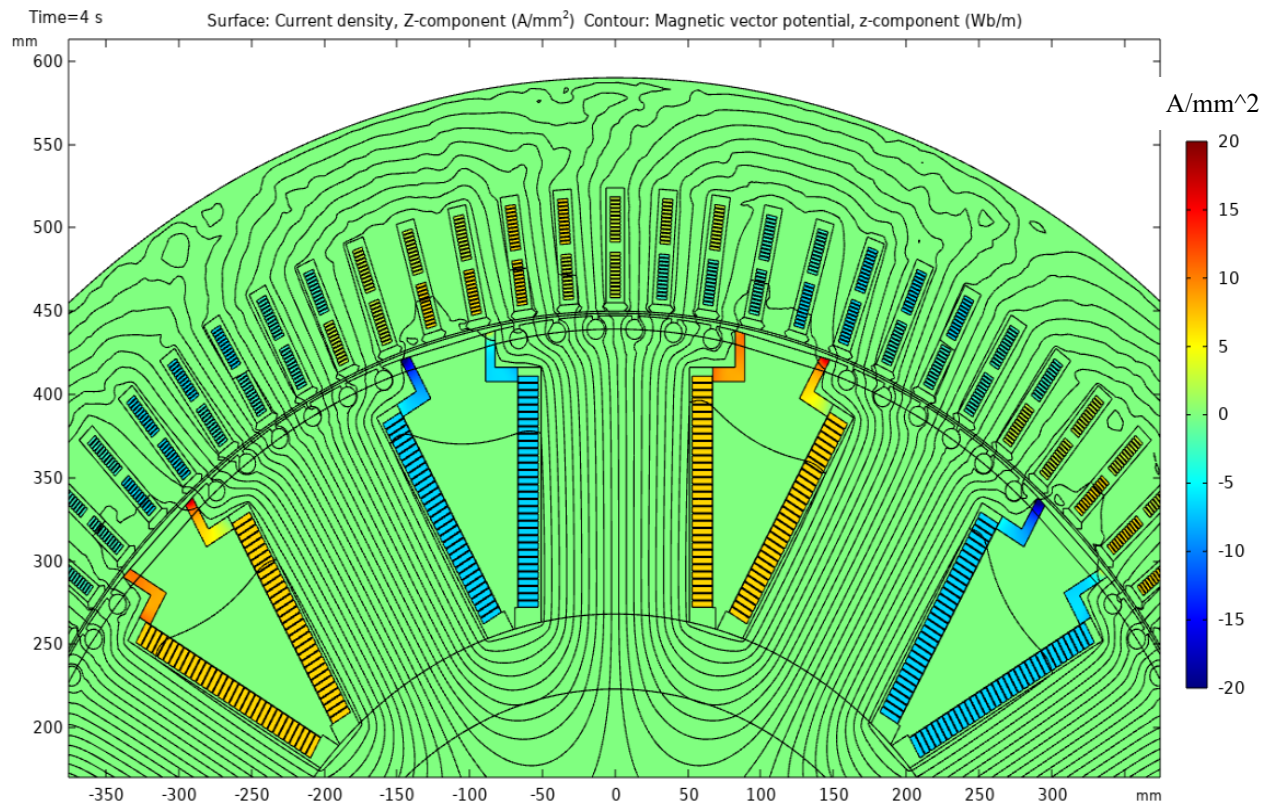


Рисунок 3.25 – Густина струму для моделі із Г-подібним профілем витка значення ковзання $s = -0,1$

На рисунку 3.25 зображено розподіл густини струму та магнітного поля для моделі з Г-подібним профілем витка в найекстремальнішому дослідженому режимі — глибокому генераторному режимі при ковзанні $s = -0,1$. Цей стан створює найбільше електромагнітне навантаження на обмотки.

Раптове збільшення ковзання викликає генерацію надзвичайно потужних індукованих струмів у всіх обмотках. Відповідно до кольорової шкали, екстремальні значення густини струму в обмотках статора та Г-подібних витках ротора сягають діапазону $\pm 19 \text{ A/mm}^2$ (інтенсивні червоні та темно-сині області). Навантаження на Г-подібний профіль: Як правило, саме в Г-подібних елементах ротора, що перебувають в активній зоні поля, фіксується найбільша концентрація струму. Це підкреслює той факт, що ці витки зазнають найбільшого теплового та механічного навантаження в асинхронних режимах.

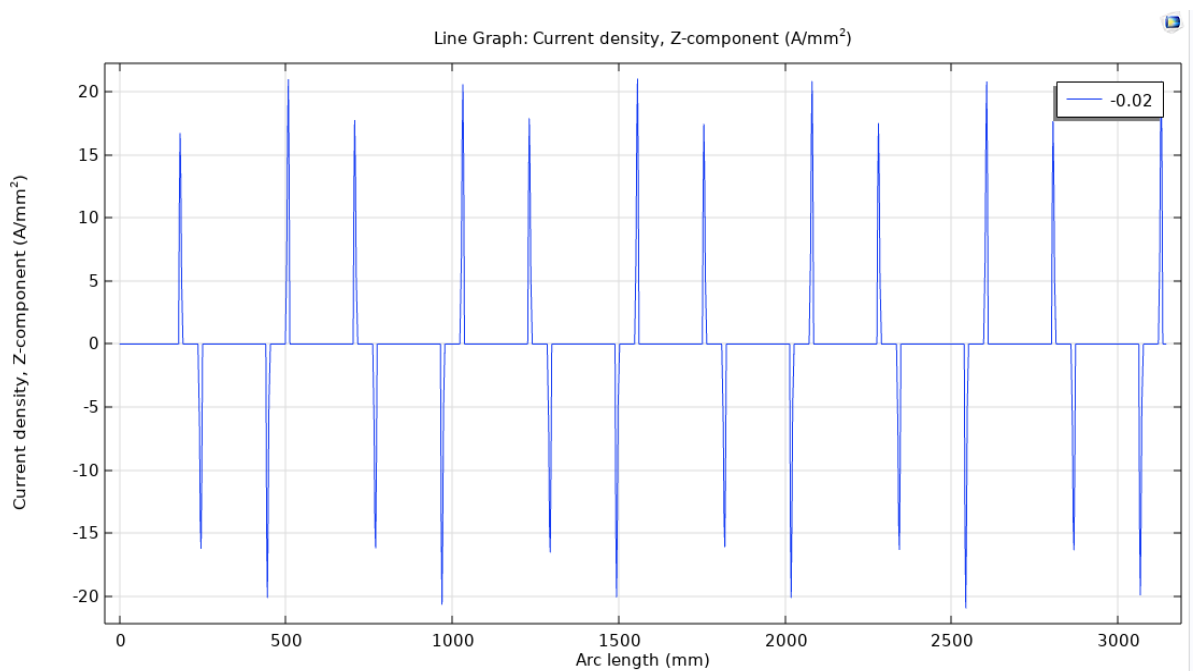


Рисунок 3.26 – Графік густин струмів на поверхні 12 полюсів для Г-подібної моделі при $s = -0,1$

Таблиця 3.3 - порівняння параметрів демпферної обмотки із Г-подібним профілем витка для різних значень ковзання

№	Ковзання s	Максимальна густина струму, A/mm^2	Характер розподілу густини струму	Загальний електромагніт ний момент ротора, Н·м
1	0	1,5...2,0	Рівномірний, мінімальні викривлення поля	9950
2	-0,01	5...6	Незначна асиметрія, локальні підвищення	10455
3	-0,02	9...11	Відчутна нерівномірність, чіткі зони перенавантаження	10400
4	-0,1	17...19	Максимальна нерівномірність, різкі пікові зони	10162

Загальний електромагнітний момент ротора
Н*м

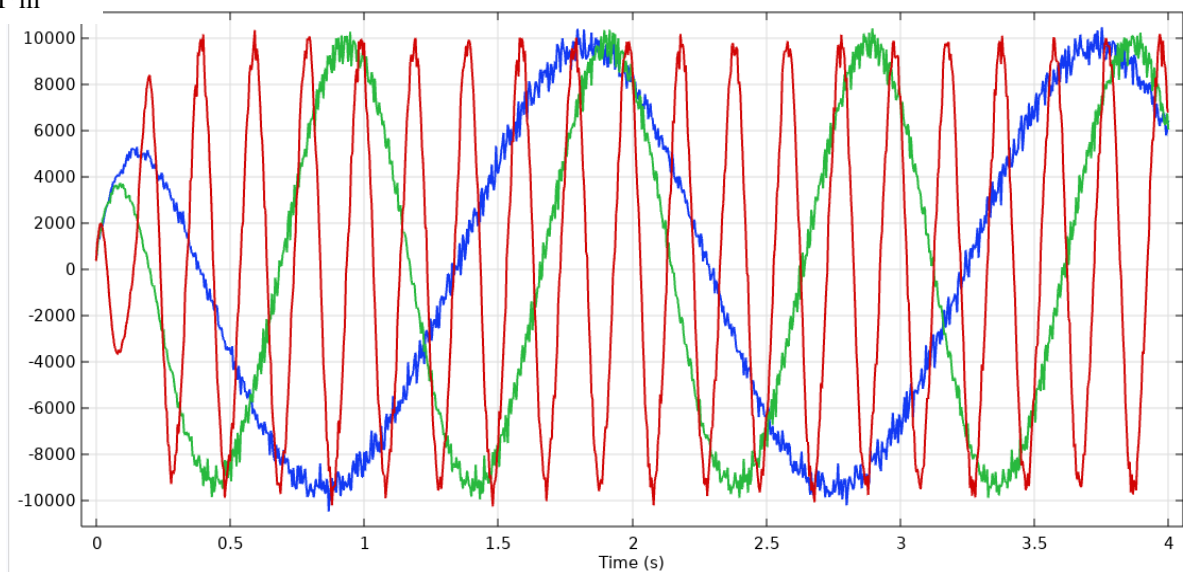


Рисунок 3.27 – розподіл загального електромагнітного моменту ротора
(Синій – $s = -0,01$, зелений – $s = -0,02$, червоний – $s = -0,1$)

3.4 Дослідження конструкції із пластиною у третину повітряного проміжку ДО синхронного генератора

$$s=0$$

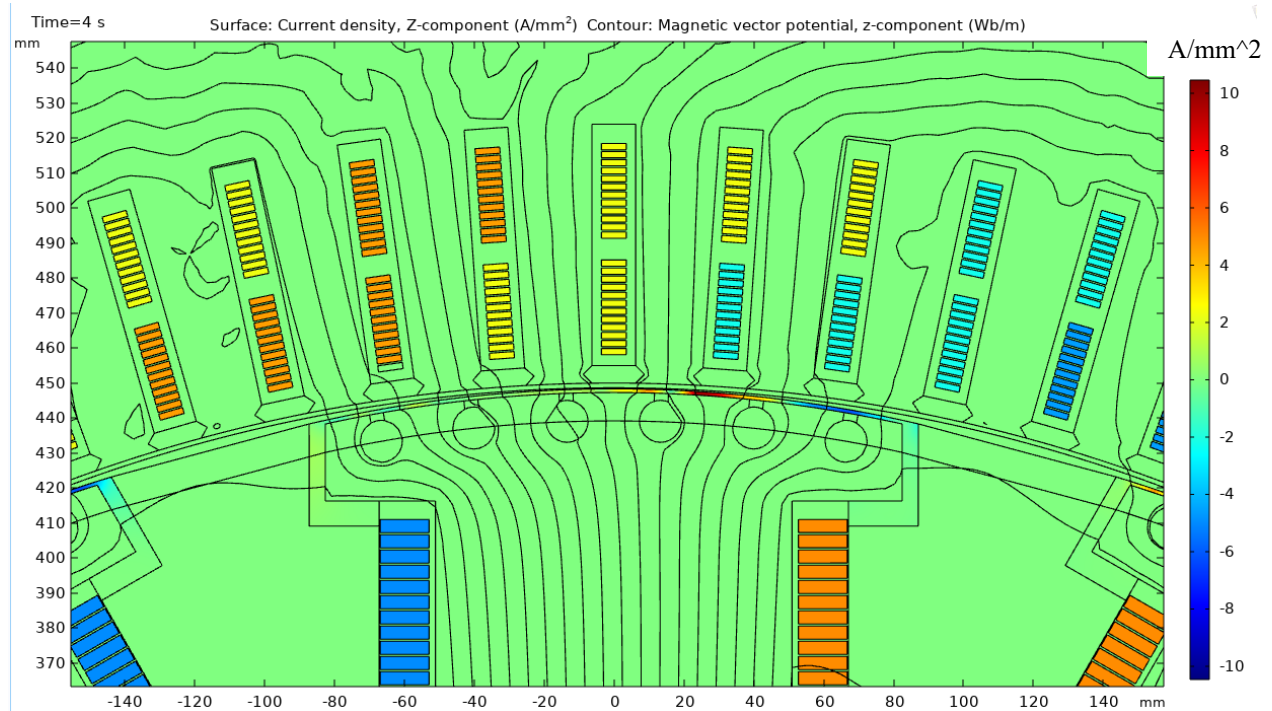


Рисунок 3.28 – Густина струму для моделі із пластиною у третину повітряного проміжку на поверхні полюсу із значенням ковзання $s=0$

На Рисунку 3.28 зображено розподіл густини струму всередині демпферної системи, де на поверхні полюса розміщено додаткову пластину товщиною приблизно в одну третину відстані між полюсами. Аналізується робота в синхронному режимі ($s=0$), що спостерігалася на четвертій секунді.

Зображення розподілу густини струму демонструє значний вплив доданої пластини на структуру магнітного поля поблизу полюса. Порівняно з попередніми варіантами конструкції, відбувається більш виражене перенаправлення струмів між різними секціями демпферної обмотки: ті стрижні, що знаходяться найближче до пластини, характеризуються збільшенням густини струму (представленим жовтогарячими кольорами), а ті,

що далі – функціонують із меншою активністю (зазначені синьо-зеленими кольорами).

Таке перерозподілення підтверджує те, що пластина виконує роль додаткового шунту магнітного потоку, частково змінюючи його напрям і примушуючи окремі стрижні активніше взаємодіяти зі статором. У порівнянні з базовою моделлю ($s=0$), зони зі значним градієнтом магнітного векторного потенціалу спостерігаються ближче до поверхні полюсу — це явище є результатом локальної концентрації потоку, спричиненої присутністю цієї пластини.

Незважаючи на це, загальна будова ліній векторного потенціалу зберігає свою симетрію, що говорить про відсутність негативних деформацій у магнітному полі. Однак, локальне нарощування густини струму, зумовлене цією самою концентрацією потоку, може провокувати збільшення локалізованих теплових навантажень на тих же стрижнях, які знаходяться в безпосередній близькості до пластини.

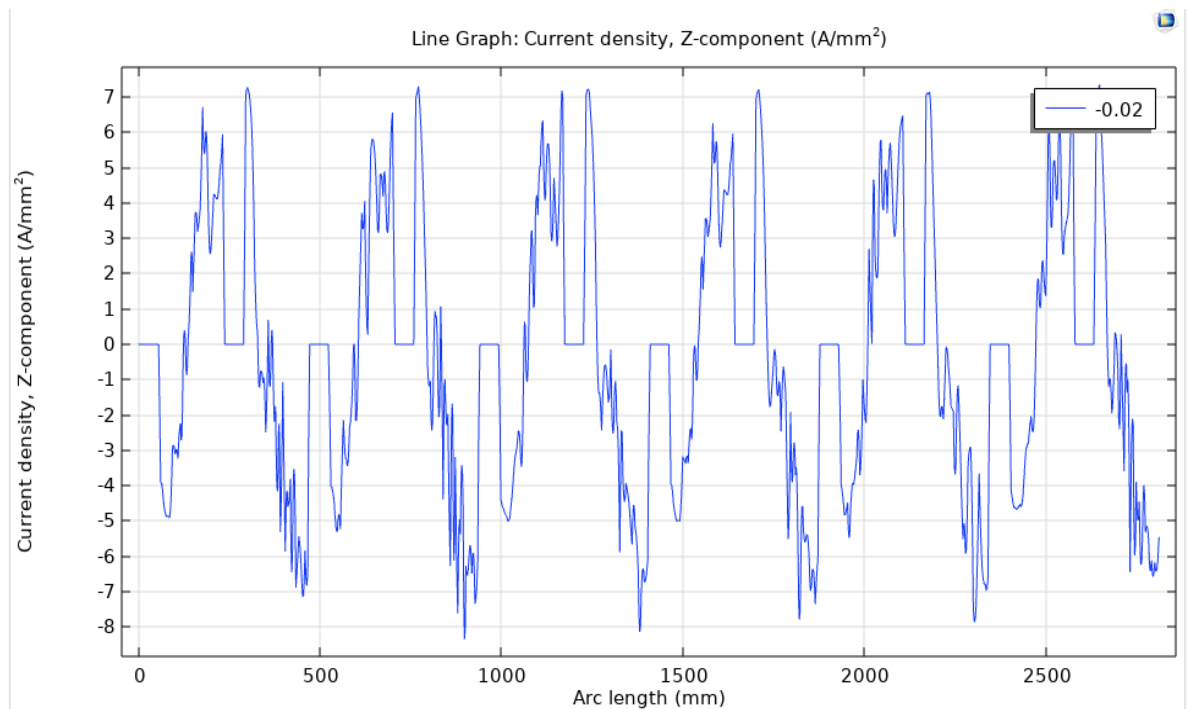


Рисунок 3.29 – Графік густин струмів на поверхні 12 полюсів моделі із пластиною у повітряному проміжку при $s = 0$

$$s = -0,01$$

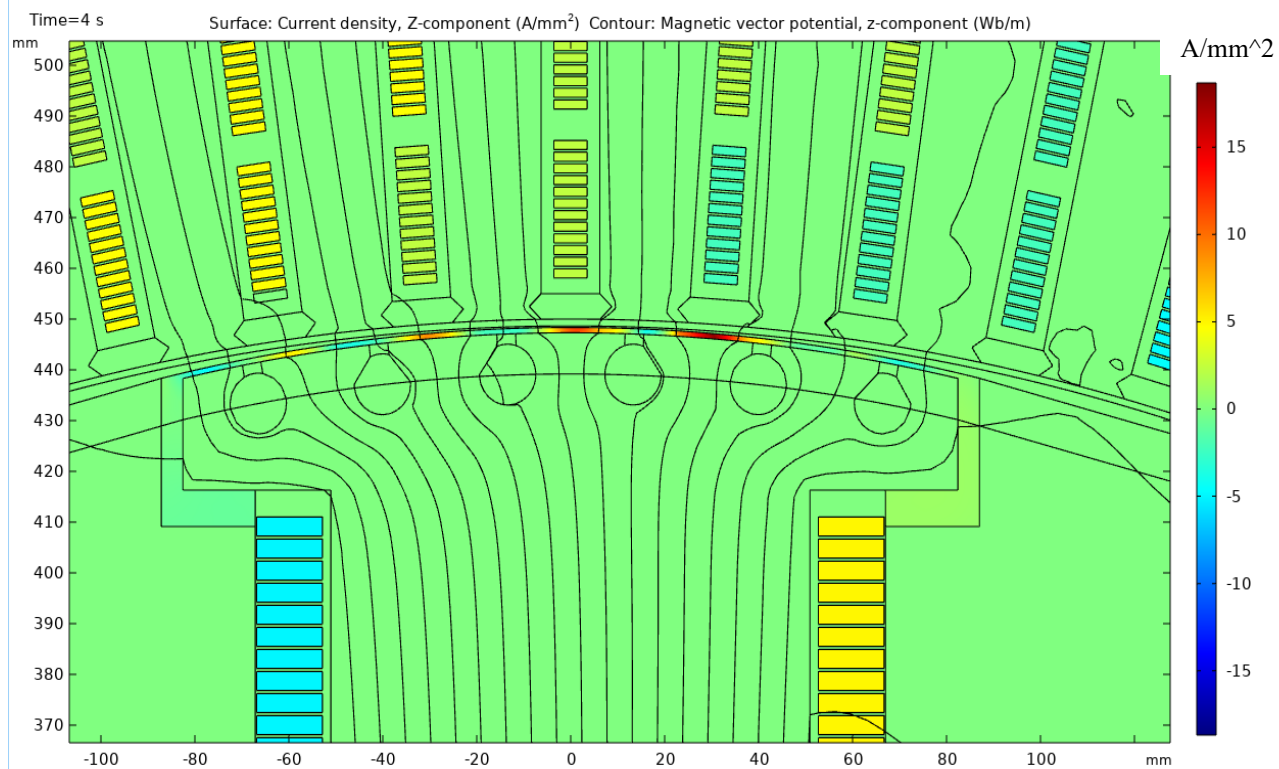


Рисунок 3.30 – Густина струму для моделі із пластиною у третину повітряного проміжку на поверхні полюсу із значенням ковзання $s = -0,01$

На відміну від базового варіанту, де при невеликому ковзанні розподіл має більш плавний характер, у цій модифікації навіть при $s = -0,01$ вже фіксується локальна перенасиченість у крайових стрижнях, що потенційно може сприяти збільшенню теплових витрат.

Лінії магнітного векторного потенціалу демонструють сильніше викривлення в зоні контакту поля з пластиною, що підтверджує додаткову концентрацію потоку.

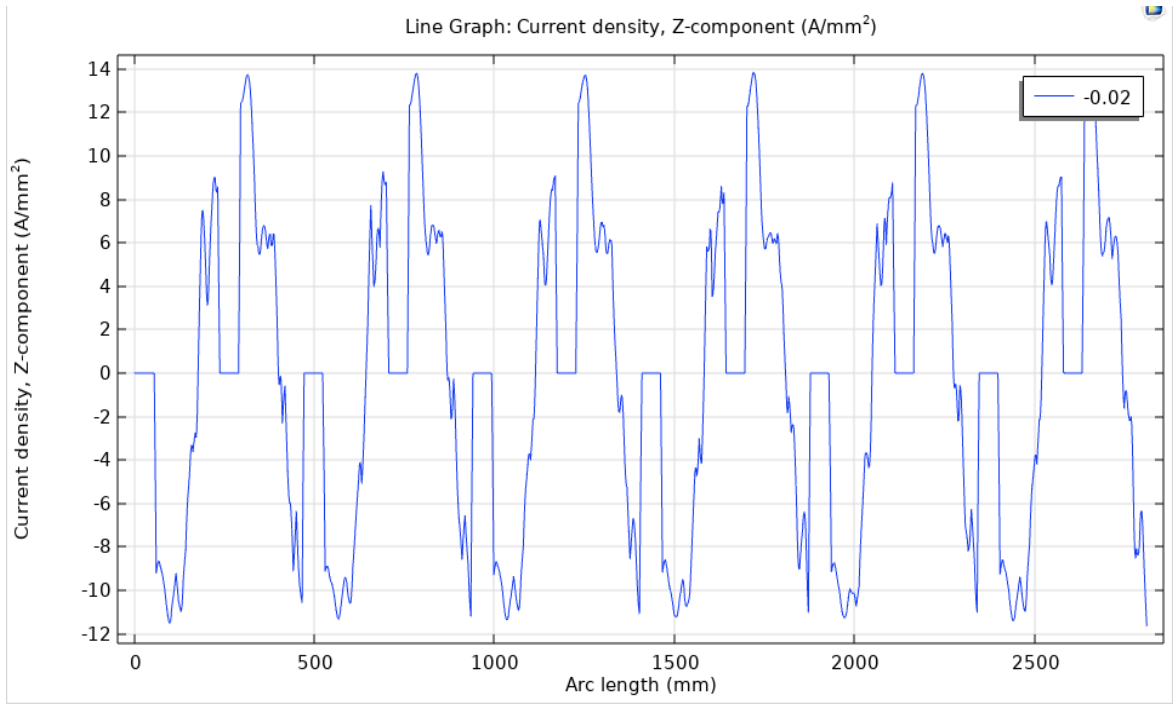


Рисунок 3.31 – Графік густин струмів на поверхні 12 полюсів моделі із пластиною у повітряному проміжку при $s = -0,01$

$s = -0,02$

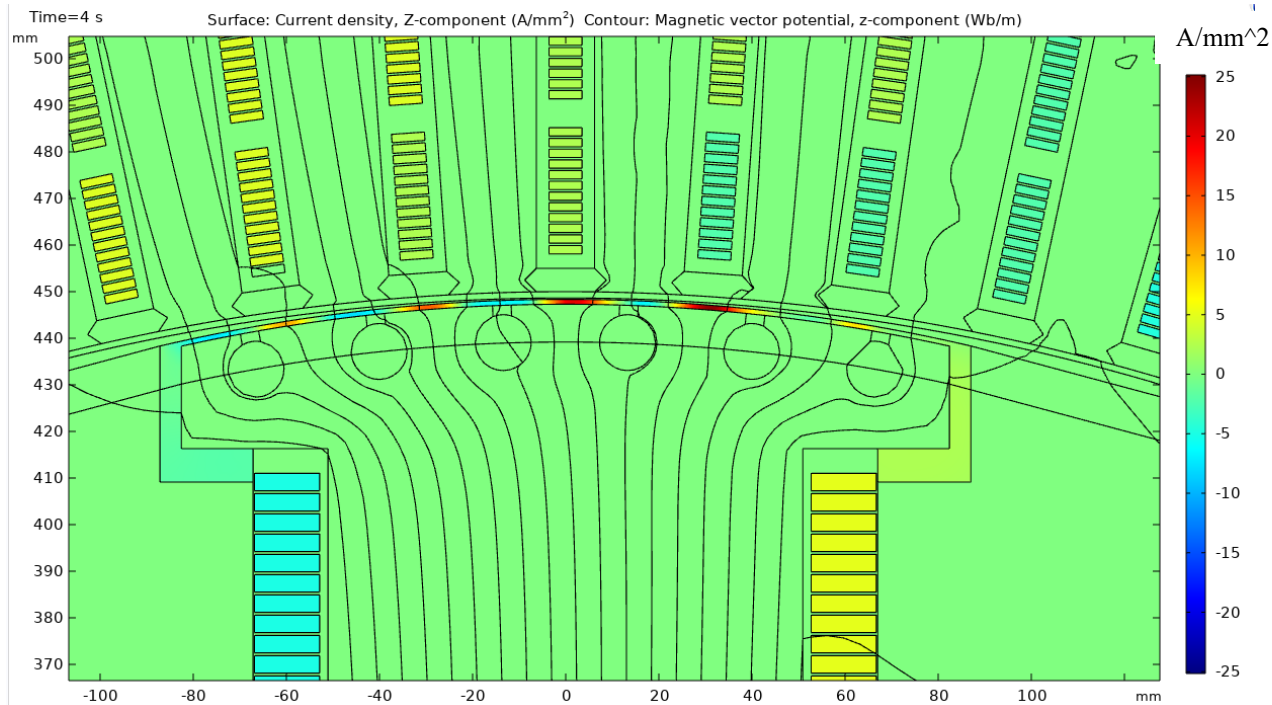


Рисунок 3.32 – Густина струму для моделі із пластиною у третину повітряного проміжку на поверхні полюсу із значенням ковзання $s = -0,02$

При збільшенні від'ємного ковзання з $-0,01$ до $-0,02$ у моделі спостерігаються такі характерні зміни. У крайових областях полюса можна помітити асиметричність розподілу, з підвищеною концентрацією струмів на тому боці, де магнітне поле замикається через пластину. Це підсилює нерівномірність магнітного навантаження між стрижнями демпферної обмотки.

У стрижнях, які розташовані далі від пластини, густина струму зростає незначно, а місцями навіть зменшується. Це підтверджує нерівномірне перерозподілення струмів та посилення локального ефекту пластиною.

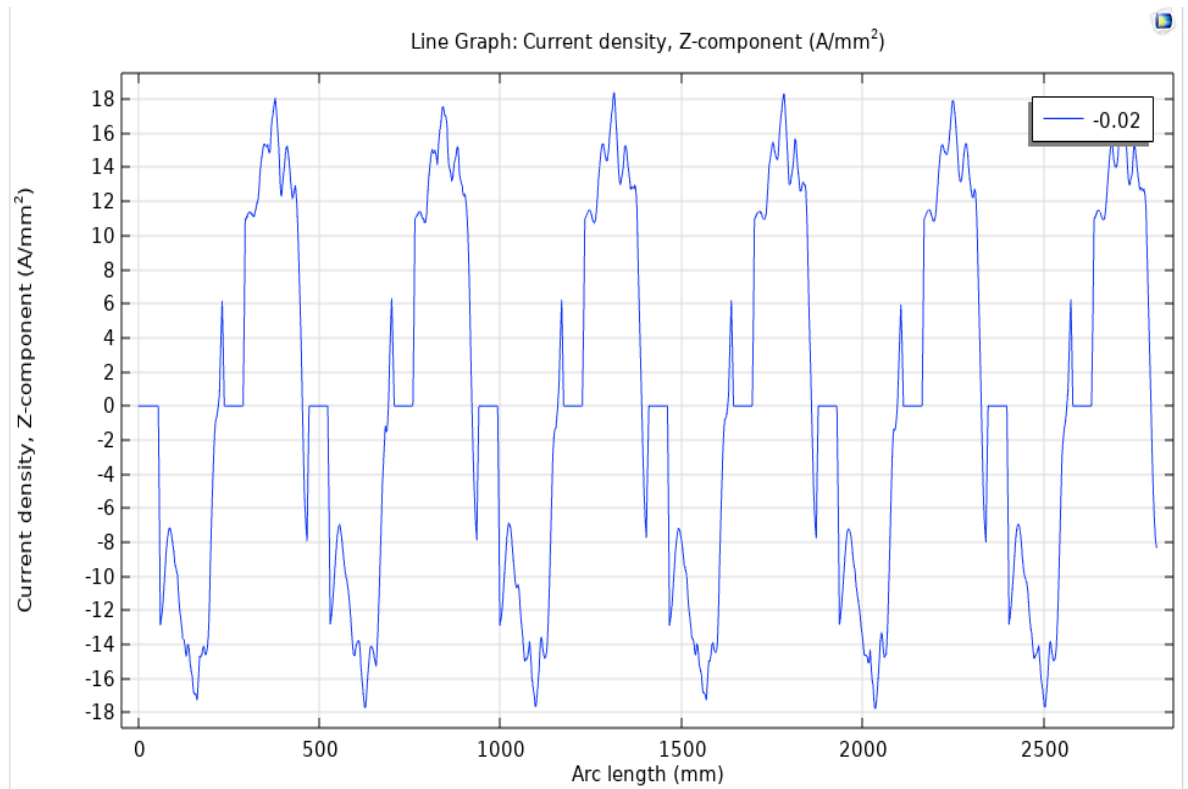


Рисунок 3.33– Графік густин струмів на поверхні 12 полюсів моделі із пластиною у повітряному проміжку при $s = -0,02$

$$s = -0,1$$

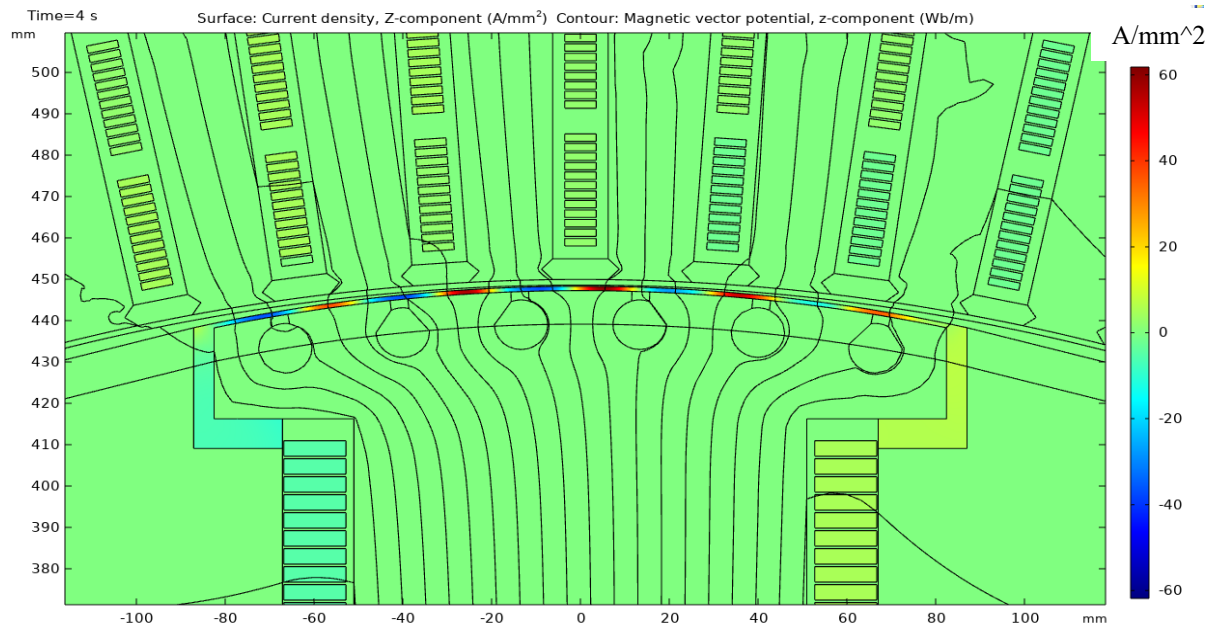


Рисунок 3.34 – Густина струму для моделі із пластиною у третину повітряного проміжку на поверхні полюсу із значенням ковзання $s = -0,1$

Зі збільшенням величини ковзання до $s = -0,1$ спостерігається стрімке зростання максимальних значень густини струму, які сягають рівня близько 60 A/mm^2 , що майже у 2,5 рази перевищує показники при $s = -0,02$. Ця тенденція вказує на значне посилення інтенсивності вихрових процесів у провідних компонентах та відчутне збільшення електродинамічних втрат при подальшому збільшенні ковзання.

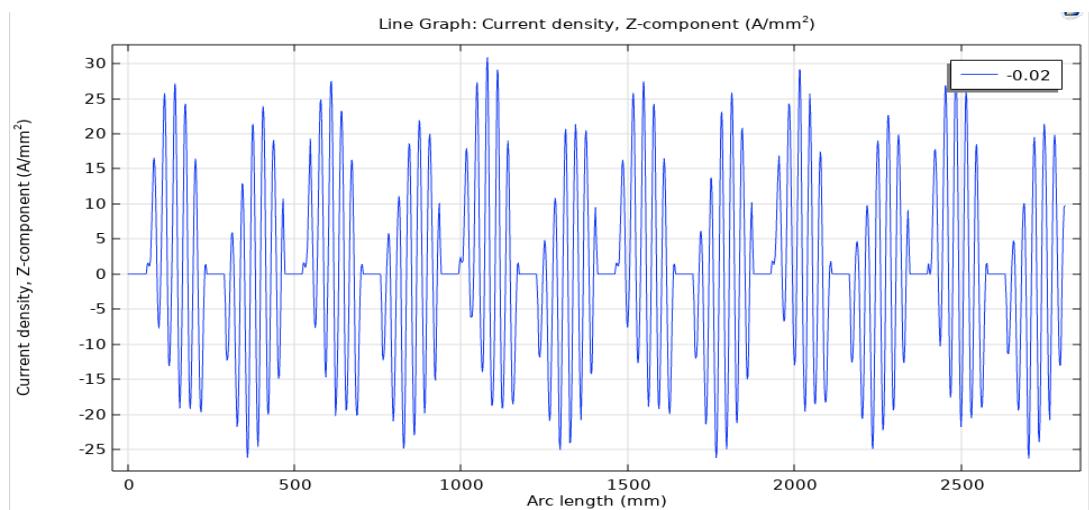


Рисунок 3.35– Графік густин струмів на поверхні 12 полюсів моделі із пластиною у повітряному проміжку при $s = -0,1$

Таблиця 3.4 - порівняння параметрів демпферної обмотки із пластиною у третину повітряного проміжку для різних значень ковзання

№	Ковзання s	Максимальна густина струму, A/mm^2	Характер розподілу густини струму	Загальний електромагніт ний момент ротора, Н·м
1	0	8...9	Рівномірний, мінімальні викривлення поля	9550
2	-0,01	14...15	Незначна асиметрія, локальні підвищення	13550
3	-0,02	20...22	Відчутна нерівномірність, чіткі зони перенавантаження	13640
4	-0,1	52...54	Максимальна нерівномірність, різкі пікові зони	15300

Загальний електромагнітний момент ротора

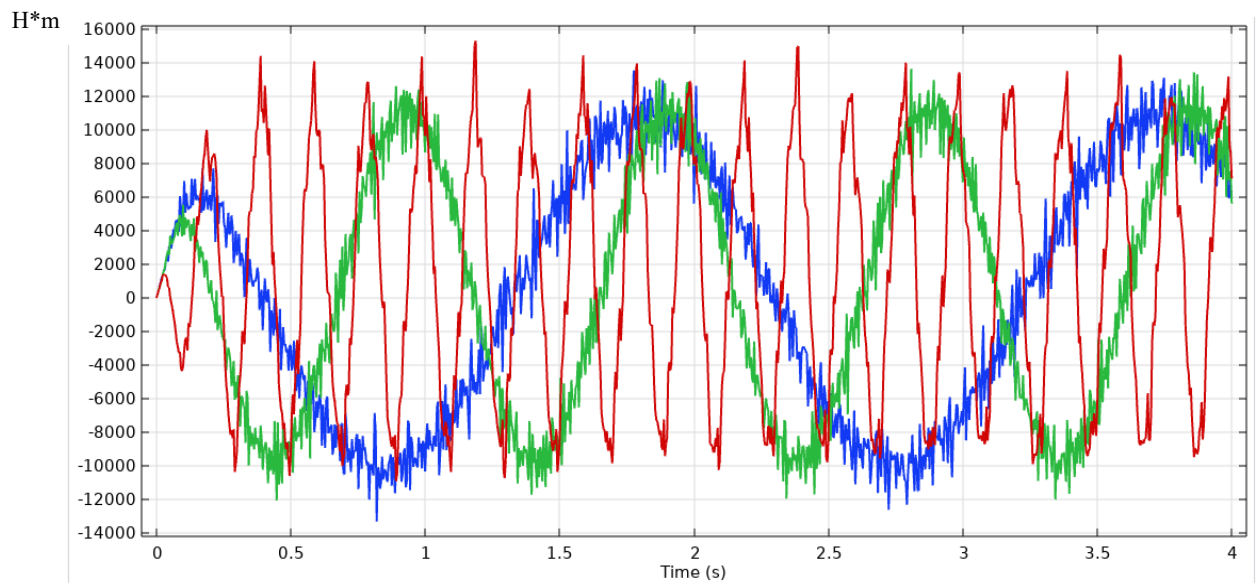


Рисунок 3.36 – розподіл загального електромагнітного моменту ротора
(Синій – $s = -0,01$, зелений – $s = -0,02$, червоний – $s = -0,1$)

3.5 Аналіз та порівняння для всіх варіантів конструкцій ДО синхронного генератора.

Таблиця 3.5 – Узагальнююча таблиця максимального значення густини струму для всіх варіантів конструкцій

Максимальне значення густини струму, A/mm^2				
Конструкції				
Ковзання s	Базова	Прямокутний профіль витка	Г-подібний профіль витка	У третину повітряного проміжку
$s = 0$	2	2	2	8
$s = -0,01$	4	3	6	15
$s = -0,02$	7	5	11	22
$s = -0,1$	17	10	19	54

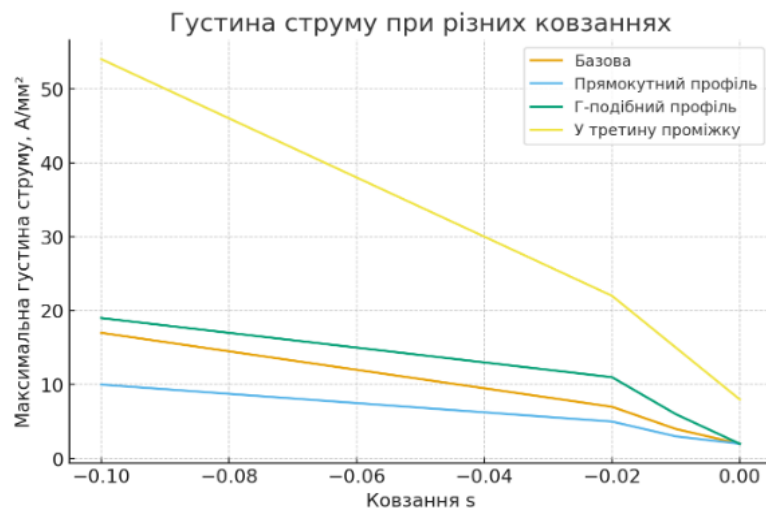


Рисунок 3.37 – Густини струму для всіх конструкцій при різних значеннях ковзання

Таблиця 3.6 – Узагальнююча таблиця максимального значення загального електромагнітного моменту для всіх варіантів конструкцій

Максимальне значення загального електромагнітного моменту, Н·м				
Конструкції				
Ковзання s	Базова	Прямокутний профіль витка	Г-подібний профіль витка	У третину повітряного проміжку
$s = 0$	9950	9950	9950	9950
$s = -0,01$	10274	10269	10455	13550
$s = -0,02$	10100	10171	10400	13640
$s = -0,1$	9731	9966	10162	15300

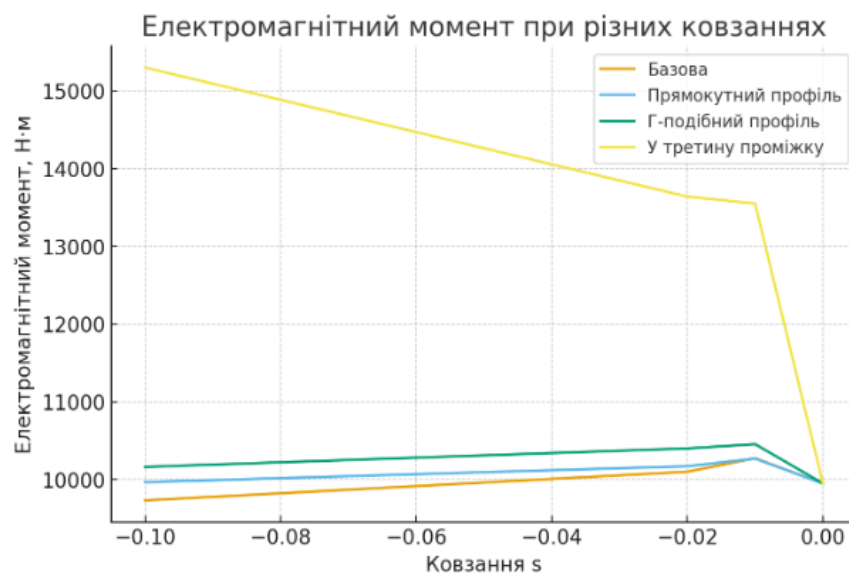


Рисунок 3.38 – Загальний електромагнітний момент ротора для всіх конструкцій при різних значеннях ковзання

Підсумовуючи результати моделювання для усіх розглянутих конструкційних варіантів, можна зазначити, що характер розподілу магнітного поля та густини струму суттєво корелює з конфігурацією полюсів та наявністю додаткових компонентів у повітряному зазорі. Базова модель демонструє найвищий ступінь стабільності та найбільшу однорідність розподілу електромагнітних параметрів, що супроводжується помірними величинами густини струму та мінімальним рівнем локальних перенапружень. Інтеграція пластини в половину частину повітряного зазору спричиняє посилення неоднорідності поля, збільшення локальних концентрацій магнітних силових ліній та підвищення густини струму в зонах, що межують з краєм пластини. Розміщення пластини у третинній частині повітряного зазору лише посилює цей ефект, адже геометричне зміщення елемента впливає на структуру силових ліній, викликаючи більш виражене викривлення поля та зростання струмових навантажень, яке особливо помітно при збільшенні ковзання. Аналіз результатів для різних значень ковзання продемонстрував, що при незначному ковзанні рівень струмових навантажень залишався відносно обмеженим для всіх конструкцій; однак зі збільшенням ковзання амплітуда густини струму зростала у кілька разів, і це зростання було найбільш інтенсивним саме для моделей з використанням пластин. Отже, конструкції з додатковими компонентами у повітряному зазорі є більш чутливими до змін ковзання та продукують більші локальні навантаження, що вимагає уважного врахування під час подальшої оптимізації. Зрештою, найкращу однорідність поля та мінімальні пікові значення струму забезпечувала базова модель, тоді як моделям з пластинами потрібне більш деталізоване налаштування параметрів та режимів експлуатації для запобігання перегріву та надмірних електромагнітних втрат.

3.6 Висновки до розділу Ошибка! Источник ссылки не найден.

У теоретично ідеальній моделі при ковзанні $s = 0$ струми в демпферній обмотці повинні бути відсутні, оскільки ротор обертається синхронно з обертовим магнітним полем статора і не виникає ЕРС індукції. Проте в реальній машині, а також у наших моделях, повністю позбутися струмів у демпферних стрижнях неможливо. Це зумовлено низкою факторів, які породжують пульсації магнітного поля та локальні нерівномірності його розподілу.

Магнітний потік під полюсом розподіляється нерівномірно. У окремі зубці він може заходити інтенсивніше, в інші — слабше. Така асиметрія залежить від кута навантаження, а також від миттєвого положення ротора відносно статора. У різні моменти часу потік може зміщуватися з одного зубця в інший, що призводить до появи змінних складових у магнітному полі й відповідно до індукції невеликих струмів у демпферній обмотці навіть при $s = 0$.

У процесі моделювання фіксуються електричні струми, характерні для синхронного режиму, що узгоджується з принципами функціонування справжньої синхронної машини. Наявність поверхневих пульсацій магнітного поля, специфічні риси конструювання полюсів призводять до генерації цих струмів, які вважаються природним явищем та мають фізичне обґрунтування в контексті експлуатації машини.

Аналіз отриманих даних показує, що збільшення модуля негативного ковзання s у всіх досліджених моделях призводить до значного збільшення максимальної щільності індуктивних струмів. Початкова модель показує зростання цього показника від близько 2 А/мм^2 при $s = 0$ до 17 А/мм^2 при $s = -0,1$, що відповідає передбачуваній роботі демпферної обмотки в умовах несиметрії. Змінені конструкції також відображають цю тенденцію, але з різним ступенем вираженості. Прямокутна форма обмоток має трохи менший рівень пікової щільності струму, а варіант з розміщенням пластини на третині повітряного зазору демонструє найвищі значення (до 54 А/мм^2), що вказує на

посилену взаємодію з магнітним полем та відповідне збільшення електромагнітних втрат та теплового навантаження.

У процесі аналізу результатів моделювання розглядається загальний електромагнітний момент усієї установки, а не тільки вплив демпферної обмотки окремо. Таким чином, зв'язок між моментом та ковзанням не відображатиме пропорційну залежність до величини самого моменту, оскільки демпферна обмотка функціонує як одне з численних джерел моменту під час перехідних та асинхронних станів. Важливий внесок у створення моменту залишається за магнітною системою ротора та основним магнітним потоком машини.

Коли відбувається зміна ковзання, в першу чергу змінюється величина струмів всередині демпферних стержнів. Водночас, загальний момент синхронної машини формується завдяки спільній роботі всіх елементів електромагнітного типу. Загальний момент не демонструє тенденції до зменшення або збільшення у лінійній формі зі зміною ковзання, на противагу моменту, що генерується виключно демпферною обмоткою.

У випадку електромагнітного моменту, всі моделі фіксують однакове значення при $s = 0$ (9950 Н·м), що цілком логічно, враховуючи відсутність ковзання та, як наслідок, відсутність індукованих струмів у демпферній обмотці. У межах незначних негативних значень ковзання ($s = -0,01 \dots -0,02$) відбувається помітне нарощування моменту у всіх конструкціях, що є типовою ознакою синхронної машини у режимі випереджаючого струму. Найзначніше зростання продемонструвала конструкція з пластиною, розташованою на третині повітряного зазору – до 13550–13640 Н·м. Це підкреслює посилення взаємодії між магнітним полем та демпферними струмами. Коли ж $s = -0,1$, електромагнітний момент у переважній більшості моделей дещо зменшується, проте в моделі з пластиною він стрімко підвищується до 15300 Н·м, що свідчить про високу чутливість даної модифікації до значного ковзання та підтверджує її потенціал істотно впливати на динамічну поведінку генератора.

Після переходу машини в асинхронний режим характер розвитку електромагнітного моменту змінюється суттєво. Порівняно із синхронним режимом, де момент залишається майже сталим і визначається кутом навантаження, в асинхронному режимі спостерігаються періодичні коливання (качання) моменту, що змінює знак у часі. Поясненням цьому факту є те, що миттєво прикладені сили, що впливають на ротор, протягом різних періодів часу направлені в протилежні сторони, проте усереднена механічна швидкість ротора зберігається майже без змін порівняно з моментом, що передував цій події. Момент інерції ротора є незмінним, тому при знакоперемінному електромагнітному моменті виникають кутові коливання, що й проявляються як качання ротора.

У асинхронному режимі амплітуда електромагнітного моменту зростає тому, що демпферна система та взаємодія з полем статора працюють вже за принципом асинхронної машини. При іншому значенні ковзання частота качань збільшується, фактично подвоюється відносно попереднього випадку, тоді як амплітуда змінюється незначно та залишається близькою до попередніх значень.

Важливо розрізняти два режими роботи машини. Під час роботи в синхронному режимі машина генерує майже постійну величину моменту, яка складає близько $M \approx 9950 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Перехід до асинхронного режиму призводить до зміни характеру моменту – він набуває змінності, характеризується коливаннями вищої частоти та невеликим збільшенням максимальних значень.

Проаналізувавши електромагнітний момент відносно його середньої лінії, можна помітити, що попри наявність знакоперемінних коливань, сумарний інтегральний момент залишається спрямованим у той самий бік, що і до переходу в асинхронний режим. Навіть за умови, що миттєві значення моменту змінюються в межах приблизно від -10 до $+14 \text{ Н}\cdot\text{м}$, середнє значення залишається додатним, тобто напрямок дії сумарного моменту не змінюється.

Попри коливальний характер миттєвих сил, інтегральний (середній) момент продовжує “штовхати” ротор у напрямку основного обертання. Власне через це ротор продовжує рухатися в тому самому векторі, який був присутній у синхронному режимі, а варіації демонструються виключно як ритмічні відхилення навантажувальної сили, без зміни загального вектора руху.

Як наслідок, асинхронний режим супроводжується появою знакоперемінних складових моменту, проте інтегральна дія електромагнітних сил зберігає сталий напрямок, що забезпечує продовження обертання ротора без зміни його напрямку.

Проведений аналіз показав, що зміни в конструкції демпферної обмотки по-різному відбиваються на величині індукованих струмів та електромагнітному моменті. Прямокутна форма витка дозволяє досягти найменших значень пікових струмів, тим самим покращуючи термостійкість обмотки. Форма у вигляді літери "Г" збільшує силу струму, але й сприяє розподілу магнітного поля. Розташування пластини в одній третині зазору між полюсами має найбільший ефект на струмове навантаження та електромагнітний момент, забезпечуючи посилення демпфуючої функції, однак вимагає уважного регулювання температури.

Конструктивна форма та геометричні параметри демпферної обмотки суттєво впливають на рівень індукованих струмів, особливості їх просторового розподілу, а також на формування електромагнітного моменту синхронного генератора. Встановлено, що зі зростанням від'ємного ковзання густина струму в елементах демпферної системи збільшується у 3–10 разів залежно від типу конструкції, що свідчить про її високу чутливість до перехідних режимів роботи.

Модель з розміщенням провідної пластини у третині повітряного зазору забезпечує досягнення максимального електромагнітного моменту, проте характеризується значним зростанням теплових і механічних навантажень, що може негативно впливати на довговічність машини. Натомість встановлено, що найбільш збалансованою з точки зору співвідношення електромагнітних та

тепломеханічних показників є модель з Г-подібним профілем витків демпферної обмотки. Така конструкція забезпечує зниження пікових значень струмів, зменшення термомеханічних напружень і водночас достатній рівень електромагнітного моменту, що робить її найбільш доцільною для практичного застосування у високонадійних синхронних машинах.

Крім того, результати аналізу четвертої моделі показали концентрацією струмів у окремих зонах, що потребує додаткових конструктивних заходів для їх зменшення. Застосування тривимірної чисельної моделі дозволило комплексно оцінити як електромагнітні характеристики, так і потенційні тепломеханічні наслідки, що є важливим етапом подальшої оптимізації геометрії демпферної обмотки.

Таким чином, виконане дослідження підтверджує доцільність використання різних конструктивних рішень демпферної обмотки та демонструє значний потенціал її геометричної оптимізації з метою підвищення стійкості, надійності та динамічних характеристик синхронного генератора.

РОЗДІЛ 4 СТАРТАП-ПРОЄКТ

4.1 Опис ідеї проєкту

Ідея стартап-проєкту полягає у впровадженні удосконалених конструкцій демпферної обмотки явнопольсного синхронного генератора потужністю 500 кВт, які забезпечують можливість швидкого локального ремонту ротора без необхідності повного демонтажу та тривалого простою електричної машини.

Запропоновані конструктивні рішення дозволяють виконувати ремонт демпферної обмотки безпосередньо на об'єкті експлуатації (наприклад, на малій гідроелектростанції), зокрема у випадку ушкодження одного або кількох полюсів ротора. Це принципово відрізняється від класичних методів ремонту, які потребують повного розбирання генератора, транспортування ротора на ремонтне підприємство та значних фінансових витрат.

Опис об'єкту впровадження

Об'єктом впровадження стартап-проєкту є синхронний генератор СГ-500 кВт, встановлений на малій гідроелектростанції. Орієнтовна вартість такого генератора становить близько 1 млн грн, що робить його критично важливим елементом енергетичного обладнання.

У процесі експлуатації генератор може зазнавати пошкоджень окремих вузлів, зокрема: обмотки статора і демпферної обмотки ротора.

Такі пошкодження призводять до значних витрат на ремонт і тривалого простою електростанції.

4.2 Порівняння витрат

За умов традиційного підходу до ремонту синхронного генератора характерні такі витрати:

Ремонт обмотки статора — близько 400 тис грн;

Ремонт ротора з ушкодженням демпферної обмотки — близько 200 тис грн.

У випадку пошкодження демпферної обмотки навіть на одному полюсі зазвичай проводиться складний ремонт із повним демонтажем ротора, що істотно підвищує вартість робіт.

Запропонований у даній роботі підхід передбачає:

- локальний ремонт лише ушкодженого полюса;
- використання удосконаленої конструкції демпферної обмотки;
- виконання робіт без транспортування генератора на ремонтний завод.

Орієнтовна вартість такого ремонту, включаючи доставку ремонтної бази, розбирання, заміну елементів демпферної обмотки на одному полюсі та збирання генератора, становить близько 50 тис грн.

Запропонований стартап-проект має великий потенціал.

4.3 Оцінка економічної вигоди

Економічний ефект від упровадження запропонованих конструктивних рішень визначається різницею між вартістю класичного ремонту та вартістю удосконаленого локального ремонту.

Для одного випадку ушкодження демпферної обмотки:

$$E = C_{\text{клас}} - C_{\text{запр}}$$

де

$C_{\text{клас}} = 200\,000$ грн – вартість класичного ремонту

$C_{\text{запр}} = 50\,000$ грн – вартість запропонованого ремонту

$$E = 200\,000 - 50\,000 = 150\,000 \text{ грн}$$

Завдяки одному ремонту вдається заощадити 150 тисяч гривень – суттєва сума в контексті вартості окремих компонентів генератора.

4.4 Оцінка окупності проекту

Для впровадження запропонованого підходу необхідні початкові витрати, пов'язані з:

- розробкою та виготовленням удосконалених елементів демпферної обмотки;
- підготовкою ремонтної бази та інструментів;
- організацією виїзної ремонтної бригади.

Орієнтовні стартові витрати можна оцінити на рівні 100 тис грн.

Тоді термін окупності стартап-проєкту визначається як:

$$T = \frac{C_{\text{інв}}}{E}$$

де

$C_{\text{інв}} = 100\,000$ грн — початкові інвестиції;

$E = 150\,000$ грн — економічний ефект від одного ремонту.

$$T = \frac{100\,000}{150\,000} = 0,67$$

Таким чином, стартап-проєкт окупається менше ніж за один ремонтний випадок, тобто фактично протягом першого застосування запропонованої технології.

4.5 Висновки до розділу 4

Розроблений стартап, спрямований на покращення конструкції демпферної обмотки для синхронного генератора СГ-500 кВт, має вагомое практичне значення та є економічно обґрунтованим. Його реалізація сприятиме істотному зменшенню витрат на відновлення ротора, скороченню періодів непрацездатності електростанцій та збільшенню надійності роботи електричних установок. Згідно з фінансовими розрахунками, завдяки зниженню ціни ремонту від 200 тисяч гривень до 50 тисяч гривень, забезпечується економія у розмірі 150 тисяч гривень за кожне технічне обслуговування, при цьому період повернення інвестицій становить менш ніж рік. Це підкреслює високу ефективність використання цих нововведень на малих ГЕС та інших підприємствах енергетичного сектору.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У даній магістерській роботі виконано аналіз та запропоновано шляхи вдосконалення конструкції ДО ротора потужного синхронного генератора. Метою дослідження було проаналізувати конструкції ДО ротора СГ потужністю 500 кВт за результатами розрахунків задля покращення її надійності роботи.

В Розділі 1 приведено теоретичний матеріал стосовно ДО в СГ. Перелічено всі причини і види ушкоджень роторів СГ, режими роботи СГ, різновиди ексцентриситету ротора, різноманітні типи виконання ДО.

В Розділі 2 демонструється процес алгоритму конструювання моделі до ротора синхронного генератора в програмній платформі COMSOL Multiphysics відображено у короткому описі. Окрім цього, надано математичний опис моделі. Зазначено характеристики досліджуваного СГ.

В Розділі 3 здійснено комплексне числове дослідження впливу різноманітних конструкційних рішень демпферної обмотки синхронного генератора на розподіл струмів у його стержнях, особливості магнітного поля та створення електромагнітного моменту під час експлуатації зі змінюваним ковзанням. З цією метою розроблено інтегровану двовимірну електромагнітну модель, яка дала змогу провести порівняльний аналіз чотирьох типів конструкцій: базової, варіанта з прямокутним перерізом витка, форми "Г" та моделі з пластиною в третині повітряного зазору на поверхні полюса.

Отримані результати показали, що ковзання s є ключовим фактором, який визначає рівень індукованих струмів у демпферних стрижнях і ступінь нерівномірності їх розподілу. При $s = 0$ усі конструкції демонструють відносно низькі значення густини струму ($2 \dots 8 \text{ А/мм}^2$), що відповідає нормальному синхронному режиму роботи. Зі збільшенням від'ємного ковзання до $s = -0,1$ у всіх моделях спостерігається різке зростання індукованих струмів, причому їх максимальні значення можуть сягати 17 А/мм^2 для базової конструкції та понад 50 А/мм^2 для конструкції з пластиною в повітряному проміжку, що

свідчить про суттєве посилення гальмівної дії струмів Фуко в перехідних режимах.

Аналіз конструкцій показав, що модель з пластиною в третині повітряного проміжку характеризується найбільшою нерівномірністю розподілу струмів та найвищими піковими значеннями, проте водночас забезпечує максимальний гальмівний електромагнітний момент у межах негативних значень ковзання. На противагу цьому, моделі з прямокутним та Г-подібним профілями витків демонструють більш помірні рівні струмів і менші пікові навантаження, що може позитивно впливати на термомеханічну стійкість конструкції.

Дослідження електромагнітного моменту продемонструвало, що при точці $s = 0$ усі конструкції формують майже нульові значення моменту, що узгоджується з синхронним режимом роботи. Зі збільшенням ковзання моделі демонструють поступове зростання гальмівного моменту, при цьому конструкція з пластиною забезпечує максимальний момент протягом усього розглянутого діапазону ковзань. Це підкріплює тезу про її високу ефективність у загасанні коливань ротора, однак водночас вона спричинює найбільше струмове навантаження на компоненти демпферної обмотки.

Підсумовуючи отримані результати, можна окреслити наступні основні положення:

- Форма та геометрія демпферної обмотки значно впливають на величину індукованих струмів, характер їхнього розподілу та рівень електромагнітного моменту.
- Зі збільшенням від'ємного ковзання густина струму зростає у 3-10 разів залежно від конкретної конструкції, що підтверджує високу чутливість демпферної системи до перехідних станів.
- Модель з пластиною у третині повітряного зазору забезпечує максимальний електромагнітний момент, але водночас генерує найбільші теплові та механічні навантаження.

- Профілі витків у формі літери “Г” та прямокутна форма знижують пікові струми, що робить їх перспективними для використання у високонадійних синхронних машинах.
- Використання тривимірної моделі дозволило оцінити як електромагнітні, так і потенційні тепломеханічні наслідки, що має велике значення для подальшої оптимізації конструкцій.

Таким чином, виконане дослідження підтверджує обґрунтованість застосування різних конструкцій демпферної обмотки та демонструє потенціал оптимізації її геометрії відповідно до потреб щодо забезпечення стійкості, надійності та динамічних характеристик синхронного генератора.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Принцип і ремонт електричних машин [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://leg.co.ua/info/elektricheskie-mashiny/ustroystvo-i-remont-elektricheskikh-mashin-3.html> (дата звернення: 14.12.2025).
2. J. Antonino-Daviu; Riera-Guasp, M.; Pons Llinares, J.; José Roger-Folch; Perez, R.; Charlton-Perez, C. (2012). Toward condition monitoring of damper windings in synchronous motors via EMD analysis. IEEE Transactions on Energy Conversion. 27(2):432-439. doi:10.1109/TEC.2012.2190292.
3. Кузнецов Н. Л. Надійність електричних машин : навчальний посібник / 2006. – 432 с.
4. Електронний ресурс – Чому виникає міжвіткове замикання обмоток двигуна [<https://samelectryk.in.ua/електрообладнання/електродвигуни/889-чому-виникає-міжвіткове-замикання-обмоток-двигуна-і-як-його-визначити.html> – дата звернення 25.05.2023].
5. Електронний ресурс – Ремонт стартерів вантажних автомобілів [<https://master.shop/articles/remont-starteriv-vantaghnih-avtomobiliv> – дата звернення 14.12.2025].
6. Електронний ресурс – Усунення несправностей обмоток трифазних електродвигунів [<https://electrical-engineering-portal.com/troubleshooting-winding-problems-three-phase-electric-motors> – дата звернення 25.05.2023].
7. Електронний ресурс – Чому тріскаються стрижні ротора двополюсного електродвигуна [<https://hecoinc.com/how-do-2-pole-electric-motor-rotor-bars-crack/> – дата звернення 25.05.2023].
8. Васьковський Ю.М., Цивінський С.С., Титко О.І. Електромагнітні процеси у демпферній системі роторів гідрогенераторів при нерівномірності повітряного проміжку. Техн. електродинаміка. 2015. № 1. С. 65-71.
9. Damper Winding Fault Detection in Synchronous Machines/Fredrik Holmgren

10. H.C. Karmaker, "Broken damper bar detection studies using flux probe measurements and time-stepping finite element analysis for salient-pole synchronous machines," Proc. IEEE SDEMPED, pp. 193-197, 2003
11. H.C. Karmaker, "Broken damper bar detection studies using flux probe measurements and time-stepping finite element analysis for salient-pole synchronous machines," Proc. IEEE SDEMPED, pp. 193-197, 2003
12. D.G. Dorrell, J.K.H. Scheck, M.A. Muller, M. Xie, 'Damping windings in induction machines for reducing unbalanced magnetic attraction and bearing wear', IEEE Trans. Ind. supplement, vol. 1, p. 49, no. 5, pp. 2206-2216, Sept/Oct. 2013.
13. Fredrik Holmgren - Damper winding fault detection in synchronous machines.
14. Fitzgerald A. E., Kingsley C., Umans S. D. Electric Machinery. New York : McGraw-Hill Education, 2014. 712 p.
15. Бабич В. П. Синхронні машини: конструкція, аналіз і моделювання. Львів : Видавництво ЛНУ, 2020. 402 с.
16. Chapman S. J. Electric Machinery Fundamentals. New York : McGraw-Hill, 2015. 784 p.
17. Бондарук М. С., Гераскін О. А. Шляхи підвищення ефективності конструкції демпферних обмоток синхронних генераторів // Матеріали наукової конференції КПІ ім. Ігоря Сікорського. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025.
18. Бондарук М. С., Гераскін О. А. Сучасні підходи до визначення технічного стану асинхронних двигунів // Матеріали наукової конференції КПІ ім. Ігоря Сікорського. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. Електронний ресурс - [<http://jour.fea.kpi.ua/article/view/302471/294468>]
19. Бондарук М. С., Гераскін О. А. Огляд сучасних підходів до визначення технічного стану синхронних генераторів // Наукові праці КПІ ім. Ігоря Сікорського. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Електронний ресурс - [<http://jour.fea.kpi.ua/article/view/328485>]