

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет
Кафедра електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

магістра

(рівень вищої освіти)

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

На тему: «Дослідження процесу створення крутного моменту в тягових електричних двигунах електроприводів змінного струму»

КНУ.МР.141.24.776-01

Виконав студент II курсу, групи ЕПА-23м /Сергій БОСЕНКО/

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

(шифр і назва спеціальності, освітньо-професійної програми)

Керівник:

д.е.н., професор

_____ /Тетяна БЕРІДЗЕ/

Нормоконтролер:

д.е.н., професор

_____ /Тетяна БЕРІДЗЕ/

Завідувач кафедри,

д.т.н., професор

_____ /Олег СІНЧУК/

Гарант ОПП:

к.т.н., доцент

_____ /Юрій ОСАДЧУК/

Кривий Ріг
2024 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: магістр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

БОСЕНКО Сергій Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Дослідження процесу створення крутного моменту в тягових
електричних двигунах електроприводів змінного струму

1. Термін подання студентом роботи: 09 грудня 2024 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою дослідження процесу створення крутного моменту в тягових електричних двигунах електроприводів змінного струму
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Аналіз структури тягових електричних двигунів електроприводів змінного струму; II. Дослідження процесу створення крутного моменту в тягових електричних двигунах електроприводів змінного струму; III. Дослідження процесу створення реактивного моменту в тягових електричних двигунах електроприводів змінного струму.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Електричні машини; II. Аналіз щільності магнітного потоку; III. Аналіз щільності магнітного потоку у повітряному зазорі; IV. Дослідження процесу створення крутного моменту.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Тетяна БЕРІДЗЕ		
II	Тетяна БЕРІДЗЕ		
III	Тетяна БЕРІДЗЕ		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Характеристика структури тягових двигунів	10.09.24
2	Електричні двигуни електроприводів змінного струму	12.09.24
3	Складові крутного моменту в тягових електричних двигунах	17.10.24
4	Дослідження процесу створення крутного моменту	24.10.24
5	Дослідження процесу створення реактивного моменту	26.11.24
6	Синхронні реактивні двигуни	28.11.24
7	Синхронні реактивні двигуни з постійними магнітами	02.12.24
8	Вентильні реактивні двигуни	07.12.24

Дата видання завдання 02.09.2024 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Сергій БОСЕНКО
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Тетяна БЕРІДЗЕ
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи магістра на тему: «Дослідження процесу створення крутного моменту в тягових електричних двигунах електроприводів змінного струму»

У першому розділі проведено аналіз тягових електричних двигунів електроприводів змінного струму. Показано, найбільш ефективними у структурі тягового електроприводу є синхронні двигуни. Зазначено, що актуальним є завдання дослідження процесу створення крутного моменту в тягових електричних двигунах електроприводів змінного струму.

У другому розділі проведено дослідження процесу створення крутного моменту в тягових електричних двигунах електроприводів змінного струму. Дослідження проведені для синхронних та асинхронних двигунів. Показано, що асинхронні двигуни мають більш високі показники перетворення енергії.

У третьому розділі досліджено процесу створення крутного моменту в тягових електричних двигунах електроприводів з вентильними реактивними двигунами. Показано, що такий електропривод має численні переваги щодо ефективності створення крутного моменту.

ЕЛЕКТРОПРИВОД ЗМІННОГО СТРУМУ, ТЯГОВИЙ
ЕЛЕКТРИЧНИЙ ДВИГУН, КРУТНИЙ МОМЕНТ, СИНХРОННИЙ
ДВИГУН, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ВЕНТИЛЬНИЙ РЕАКТИВНИЙ
ДВИГУН

Зміст

Вступ.....	7
Розділ 1. Аналіз структури тягових електричних двигунів електроприводів змінного струму.....	11
1.1. Характеристика структури тягових електричних двигунів електроприводів змінного струму	11
1.2. Електричні двигуни електроприводів змінного струму.....	12
Розділ 2. Дослідження процесу створення крутного моменту в тягових електричних двигунах електроприводів змінного струму.....	15
2.1. Складові крутного моменту в тягових електричних двигунах електроприводів змінного струму	15
2.2. Дослідження процесу створення крутного моменту в тягових електричних синхронних двигунах електроприводів змінного струму	18
2.3. Дослідження процесу створення крутного моменту в тягових електричних асинхронних двигунах електроприводів змінного струму	24
Розділ 3. Дослідження процесу створення реактивного моменту в тягових електричних двигунах електроприводів змінного струму.....	27
3.1. Дослідження процесу створення реактивного моменту в тягових синхронних реактивних двигунах електроприводів змінного струму	27
3.2. Дослідження процесу створення реактивного моменту в тягових синхронних реактивних двигунах з постійними магнітами електроприводів змінного струму.....	30
3.3. Дослідження процесу створення реактивного моменту в тягових вентильних реактивних двигунах електроприводів змінного струму.....	34
Висновки	36
Додаток А.....	37

	6
Додаток Б	39
Додаток В	41
Додаток Г	43

Вступ

Розвиток електричного транспорту напряму залежить від досягнень щодо впровадження інноваційних технологій у структуру електромеханічної системи.

Можна бачити, що за останні роки існує тенденція відносно розробки нових типів електричних двигунів, що можуть бути застосовані для потреб електричного транспорту.

У найбільш простому виконанні представлені двигуни змінного струму.

Але для реалізації можливості усунення складного перетворення електричної енергії використовують також й тягові двигуни постійного струму, як альтернативний варіант.

Дослідження показують, що з огляду реалізації крутного моменту відносно параметрів перетворювального пристрою, для потреб тягових електромеханічних систем доволі часто використовують синхронні електричні двигуни.

Вони з гарного боку зарекомендували себе при виконанні поставлених завдань.

Ступінь їх регульованості є доволі задовільним, при цьому показник перетворення моменту знаходиться на високому рівні у порівнянні з іншими типами електричних машин.

Найбільше поширення набули системи електричного транспорту, що містять тягові синхронні двигуни з постійними магнітами.

Такі системи відрізняються високою ефективністю щодо можливостей реалізації тягового зусилля.

При цьому слід зазначити, що ефективність процесу створення крутного моменту при застосуванні у якості намагнічуючих елементів постійних магнітів є доволі суперечливим.

Оскільки при доволі високих показниках перетворення крутного моменту, суттєвим недоліком є наявність залишкового магнітного поля, що спричиняє можливість виникнення пульсуючого характеру крутного моменту.

Також, слід виходити з можливого у подальшому обмеження даного ресурсу.

Саме тому дослідження проводять у бік розробок нових типів електричних двигунів.

Для можливості с часом простої заміни синхронних двигунів з постійними магнітами розглядають такі варіанти, що відносяться до трифазних систем.

Для визначення характеристик електричної машини на процесі проектування застосовують досвід попередніх розробок та виконують розрахунки їх складових.

При цьому ефективним є застосування методів моделювання процесів у розробленій електричній машині відповідно до параметрів та конструкційних особливостей.

Широке поле щодо дослідження виявляє вибір необхідного програмного забезпечення.

Доволі гарний результат надає метод польового моделювання за допомогою дискретних інтервалів.

Річ в тім, що подібне застосування методологічного рішення дозволяє суттєво скоротити час та складність розрахунків диференціальних рівнянь, що складають основу моделі.

Для отримання характеристик електричної машини використовують ефект візуалізації.

При цьому процеси, що носять сталий характер досліджуються у динаміці.

За картиною розподілу складових магнітного поля електричної машини можна зробити висновок щодо ефективності перетворення електричної енергії у її структурі.

Польові моделі хоч і складні для реалізації, адже налічують багато незалежних змінних, але надають можливість провести доволі ретельний аналіз.

За допомогою аналізу електричної машини на створеній моделі можна зробити висновки щодо щільності розподілу магнітного потоку та ефективності процесу створення крутного моменту у тяговій електричній машині.

Аналітичні дослідження показують, що важливим для показників роботи електричної машини є зменшення значення радіального магнітного потоку.

При його наявності виникають процеси виникнення пульсацій крутного моменту.

Тому у процесі дослідження польових моделей перспективним варіантом може бути використання асинхронних тягових електричних двигунів.

При цьому тангенційна складова тягового зусилля у таких машинах є вищою ніж у інших.

Вентильні реактивні двигуни для можливості їх подальшого розвитку, мають бути модернізовані для можливості усунення недоліків, що викликані заниженим значенням щільності крутного моменту, підвищеним рівнем пульсацій та як наслідок наявністю високого рівню акустичного шуму при їх роботі.

Розділ 1. Аналіз структури тягових електричних двигунів електроприводів змінного струму

1.1. Характеристика структури тягових електричних двигунів електроприводів змінного струму

Електромеханічні системи перебувають на шляху розвитку їх технічних можливостей.

Велику роль при такому розвитку відіграють процеси створення електромагнітного моменту та перетворення параметрів електричної енергії в механічні.

При цьому важливим є тип електричної машини, як основний чинник що впливає на якісні показники такого перетворення.

Слід зазначити, що на показники якості перетворення параметрів електричної енергії, що споживається електричною машиною з мережі живлення, та перетворюється на механічну, впливає щільність розподілу магнітного потоку у її структурі.

Слід зазначити що показники розподілу щільності магнітного потоку електричної машини суттєво змінюються під час роботи.

А також, багато в чому залежать від режиму енергоспоживання та параметрів системи живлення.

Найбільш поширені системи змінного струму з асинхронними та синхронними двигунами.

Тому на практиці визначення ефективності процесу перетворення параметрів електричної енергії у механічну розглядають структури з асинхронними та синхронними електричними двигунами.

1.2. Електричні двигуни електроприводів змінного струму

Ефективність перетворення параметрів електричної енергії у механічну у структурах з асинхронними та синхронними електричними двигунами, як вже зазначалось, залежатиме від щільності розподілу магнітного потоку.

При цьому, конструктивно слід розрізняти контури статорних та роторних компонентів.

При насиченні магнітної системи такі структури мають розбіжності у тлумаченні вибіркового компонента у залежності від типу та приналежності конструктивних елементів до того чи іншого контуру.

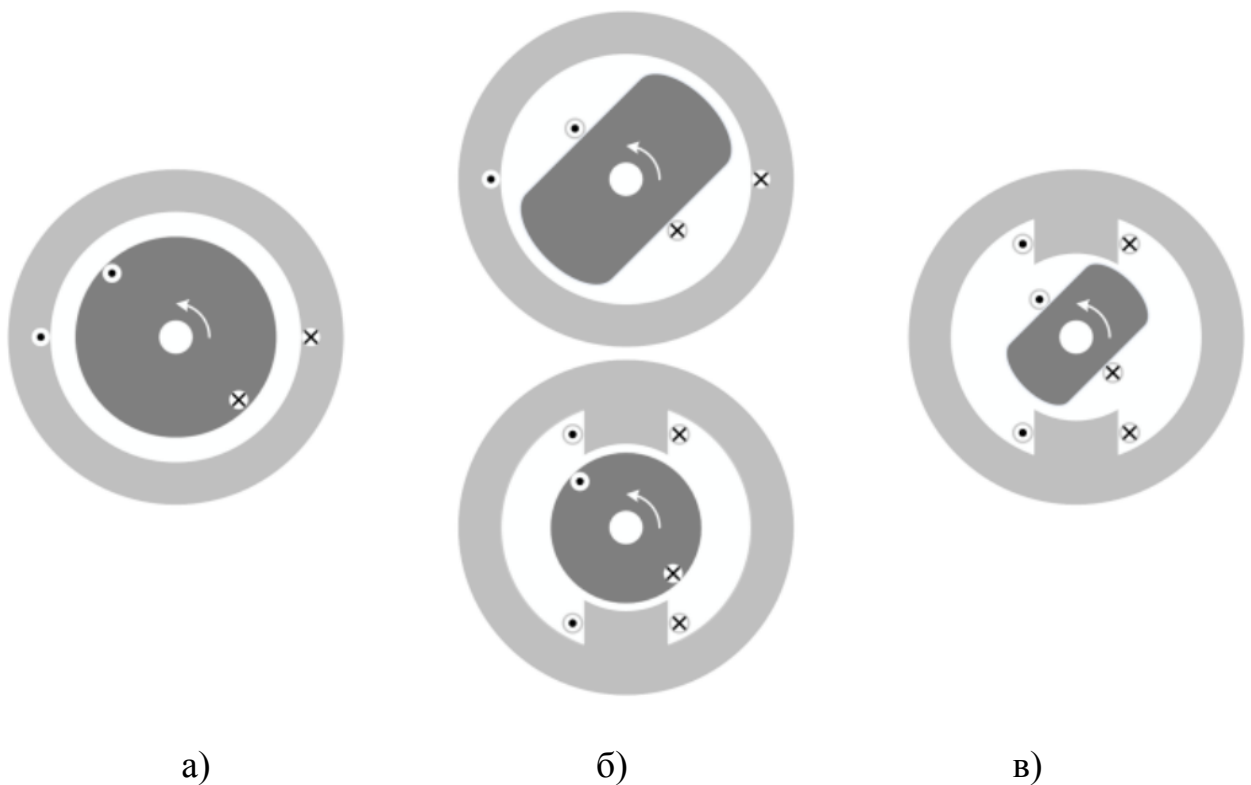


Рисунок 1.1 – Конфігурація електричних двигунів електроприводів змінного струму

$$W^c = \frac{1}{2} \Lambda^t(\theta_r) I, \quad (1.1)$$

де

$$I = \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix};$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \Lambda_s(\theta_r) \\ \Lambda_r(\theta_r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Lambda_{ss}(\theta_r) + \Lambda_{sr}(\theta_r) \\ \Lambda_{rr}(\theta_r) + \Lambda_{rs}(\theta_r) \end{bmatrix}$$

$$M = \frac{\partial W^c}{\partial \theta_r} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial \Lambda_{ss}^t}{\partial \theta_r} I_s + \frac{\partial \Lambda_{sr}^t}{\partial \theta_r} I_s + \frac{\partial \Lambda_{rr}^t}{\partial \theta_r} I_s + \frac{\partial \Lambda_{rs}^t}{\partial \theta_r} I_s \right\}. \quad (1.2)$$

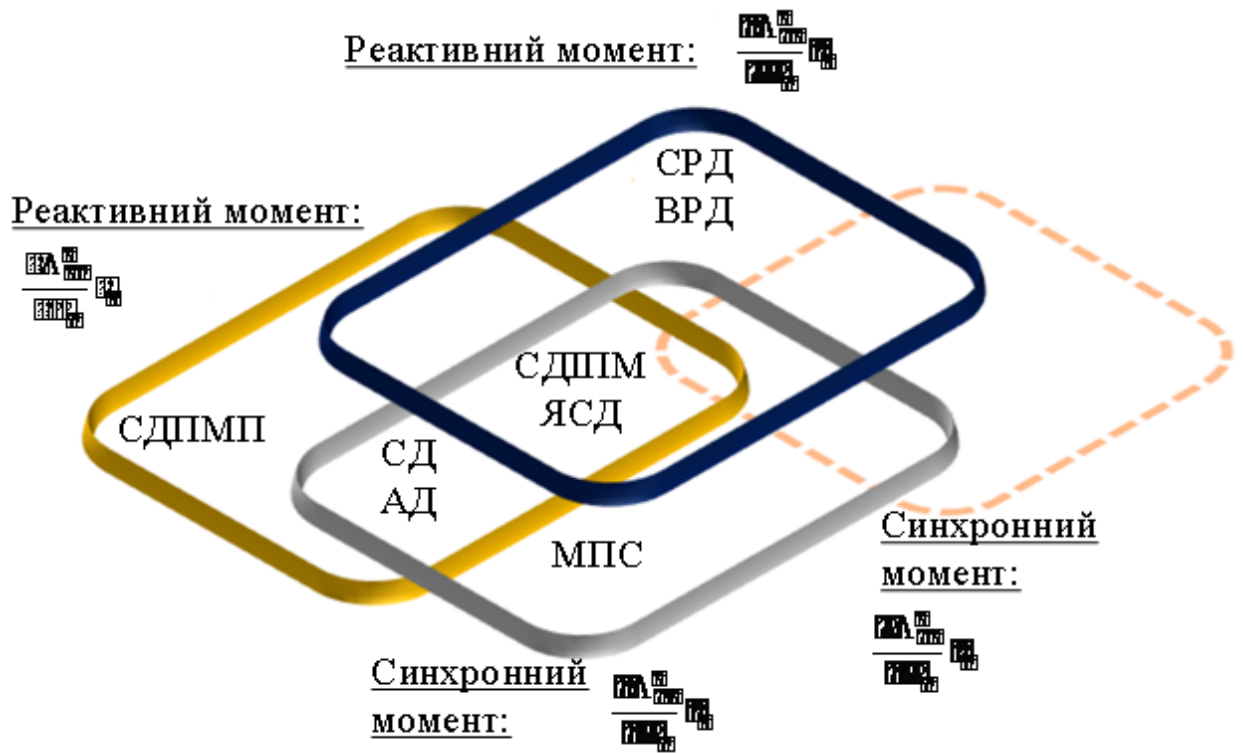


Рисунок 1.2 – Классификация показателей электрических двигателей переменного тока

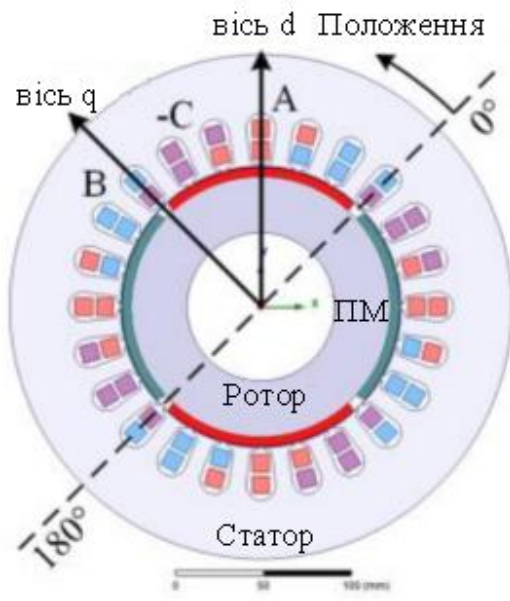
Розділ 2. Дослідження процесу створення крутного моменту в тягових електричних двигунах електроприводів змінного струму

2.1. Складові крутного моменту в тягових електричних двигунах електроприводів змінного струму

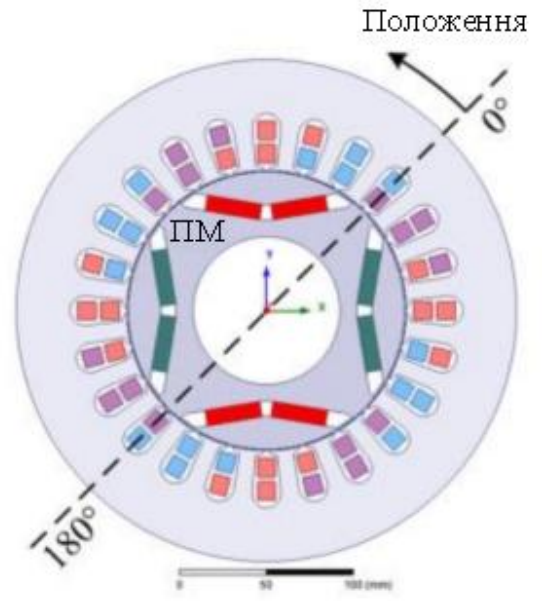
У електричних машинах змінного струму процес створення електромагнітного моменту зручно поділяти на наступні етапи:

- утворення намагніченої ділянки магнітопроводу;
- поширення магнітного поля намагніченої ділянки магнітопроводу на суміжні ділянки магнітопроводу;
- протікання електричних струмів розглянутими конструктивними елементами електричних машин;
- взаємодія магнітного поля намагніченої ділянки зі струмами конструктивних елементів;
- створення вектору магнітного потоку, як результуюча складова такої взаємодії;
- створення електромагнітного моменту, як результуючої дії між параметрами векторів магнітного потоку а струму.

Складові параметри вектору магнітного потоку зручно представляти у вигляді карти магнітного поля електричної машини.



а)



б)

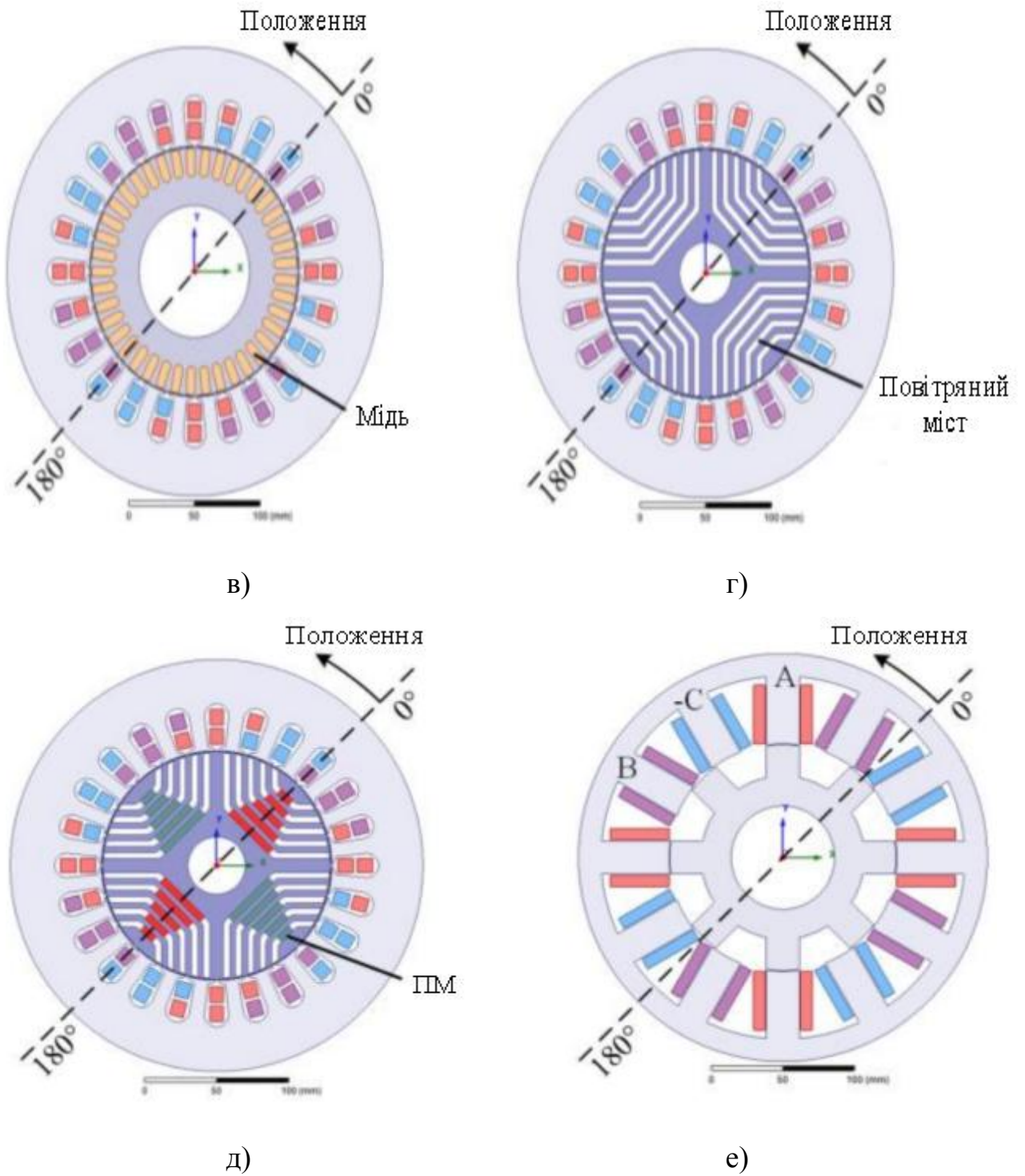


Рисунок 2.1 Складові крутного моменту в тягових електричних двигунах електроприводів змінного струму

2.2. Дослідження процесу створення крутного моменту в тягових електричних синхронних двигунах електроприводів змінного струму

Розглянемо картину магнітного поля при дослідженні синхронних електричних машин.

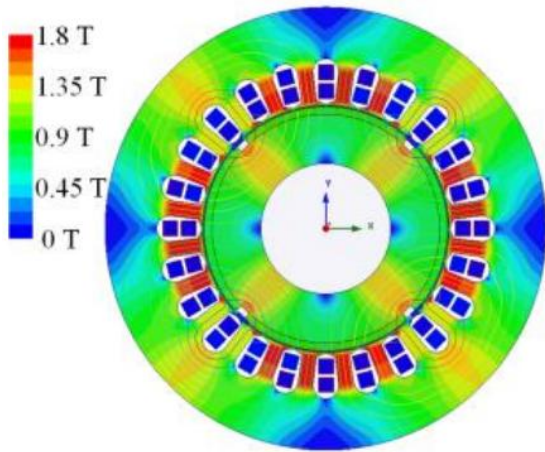
Зазвичай такий розподіл виконується відповідно до складових вектору електромагнітного моменту машини.

Для синхронного двигуна кутове зміщення картини магнітного поля пропорційне тангенціальній складовій вектору електромагнітного моменту.

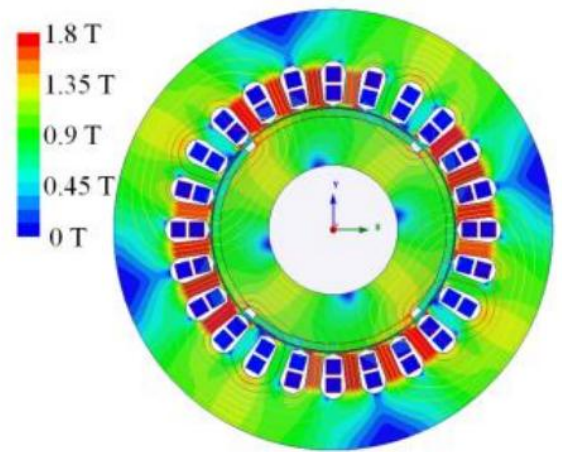
При цьому переважний вплив має такий розподіл у магнітному зазорі синхронного двигуна.

Слід також зазначити, що у багато чому значення тангенціальній складовій вектору магнітного потоку залежатиме від типу та конструктивних особливостей системи збудження синхронної машини.

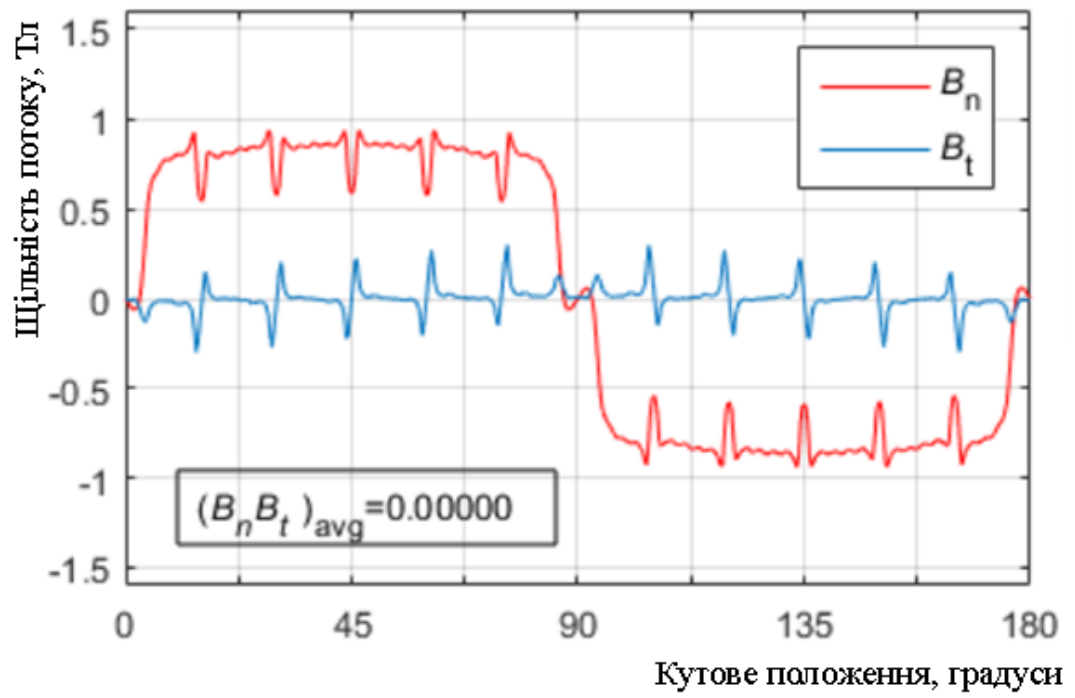
При наявності постійно діючого магнітного поля буде відчуватись його вплив на викривлення процесу створення електромагнітної складовій вектору моменту у зазначеній структурі.



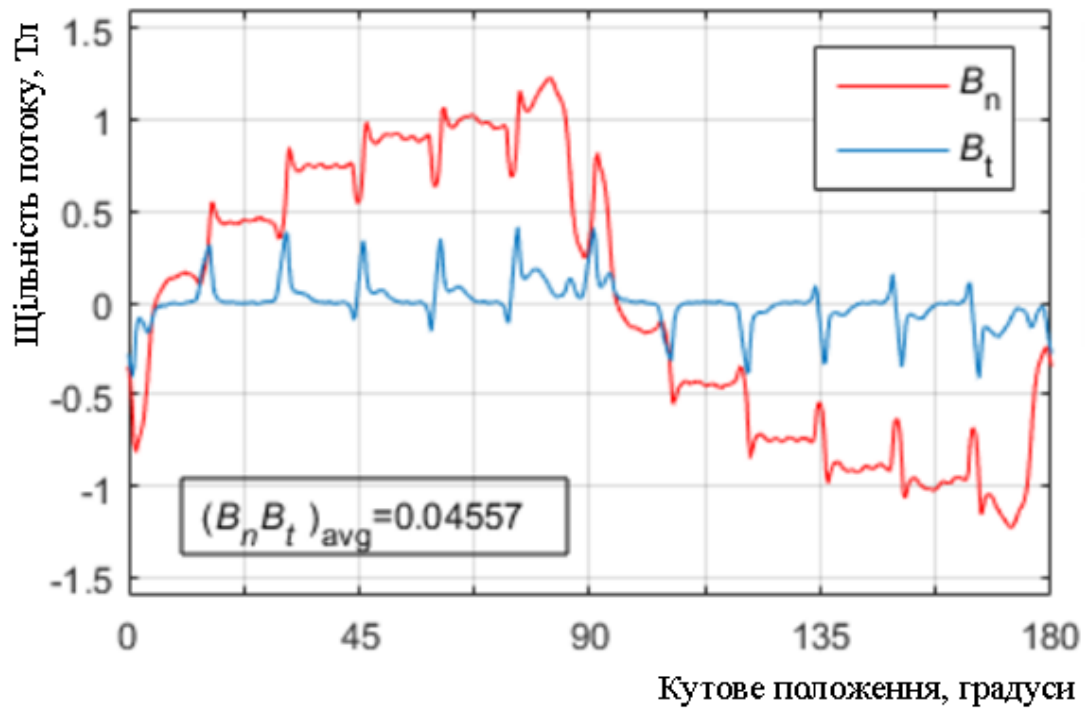
a)



б)

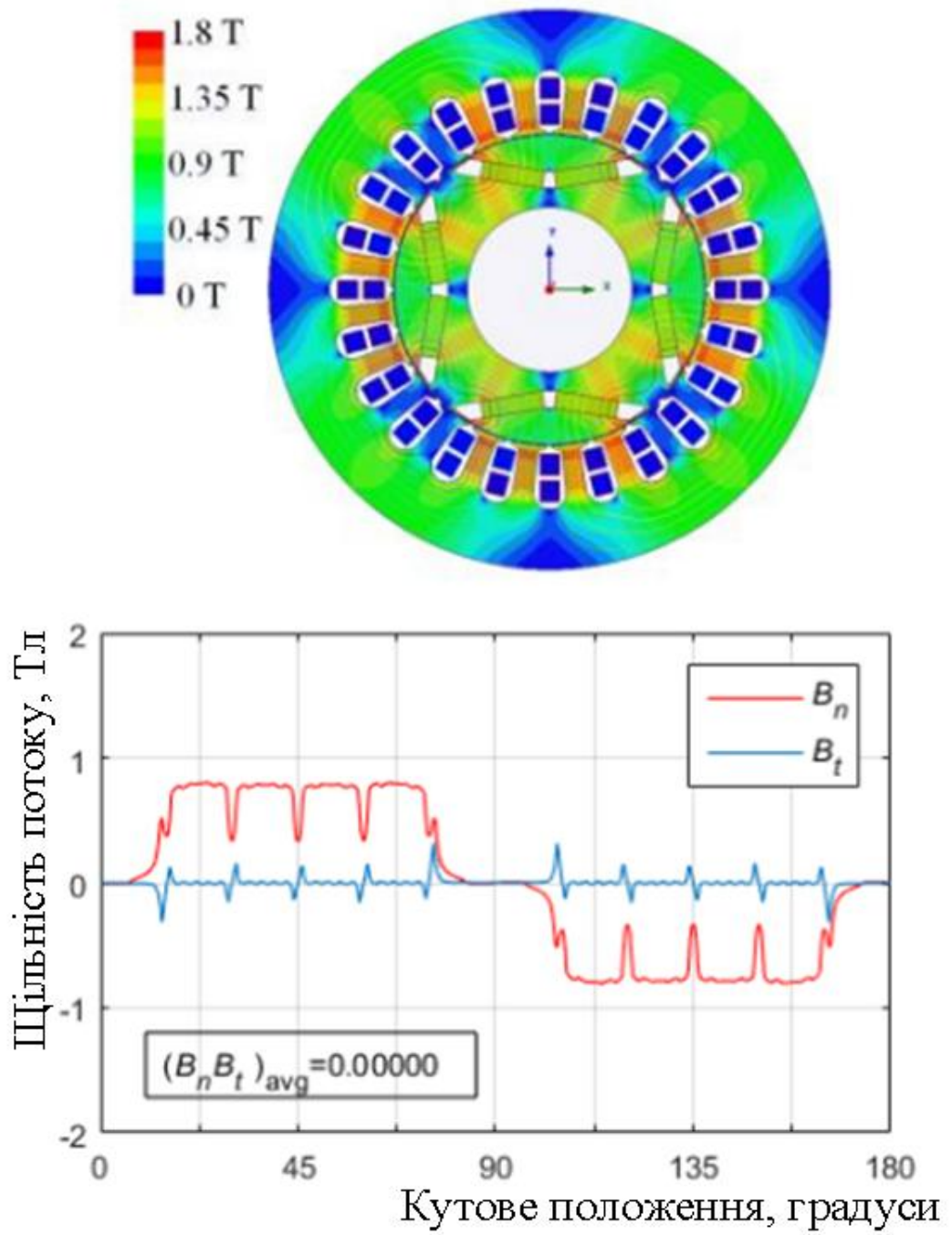


в)

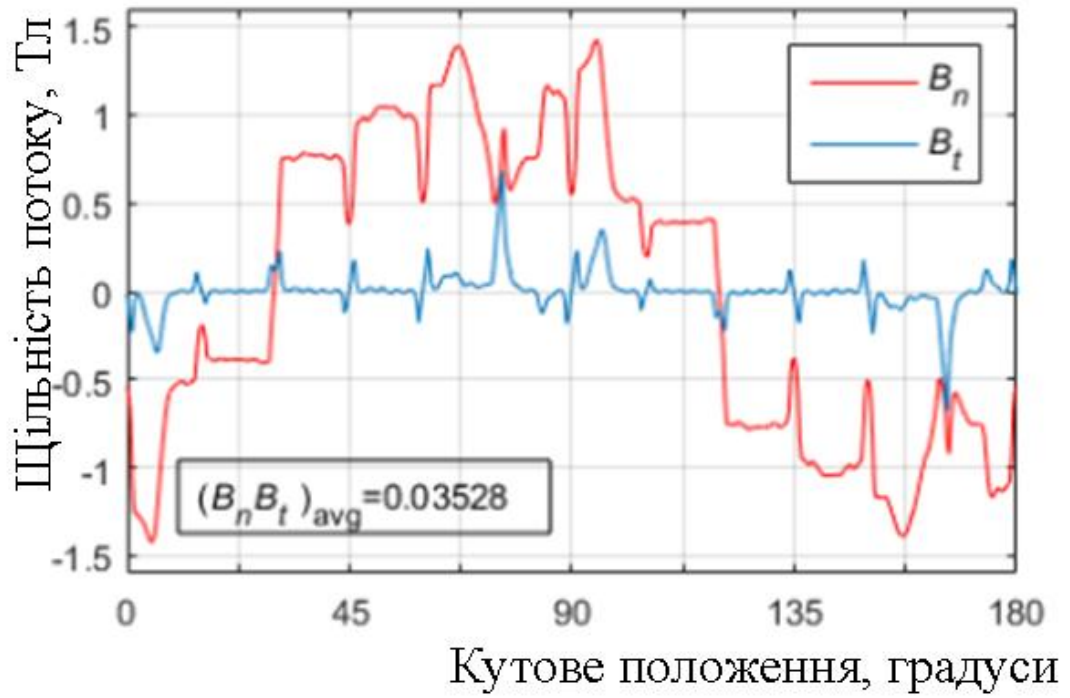
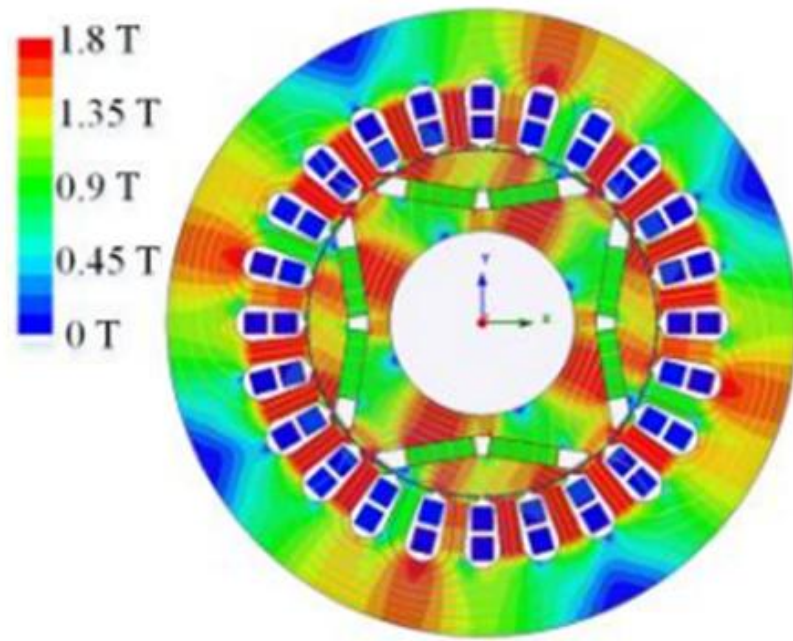


г)

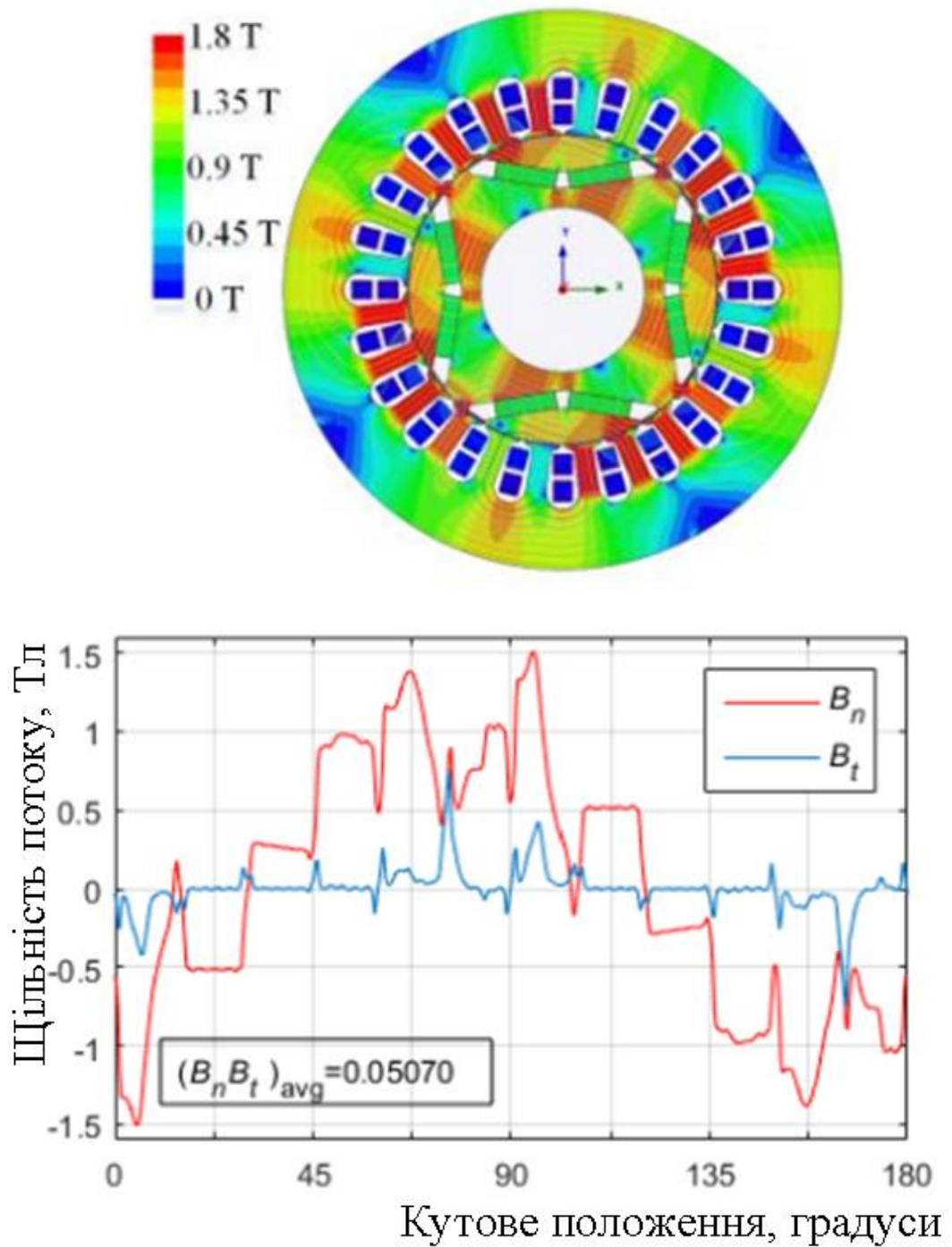
Рисунок 2.2 – Дослідження процесу створення крутного моменту в тягових електричних синхронних двигунах електроприводів змінного струму



а)



б)



в)

Рисунок 2.3 – Дослідження процесу створення крутного моменту в тягових електричних синхронних двигунах електроприводів змінного струму

2.3. Дослідження процесу створення крутного моменту в тягових електричних асинхронних двигунах електроприводів змінного струму

Для асинхронних електричних машин, на відміну від синхронних, процес створення вектору електромагнітного моменту не залежить від типу та структури магнітопроводу електричної машини.

Тому у структурі асинхронної машини важливим є врахування поперечного впливу від дії магнітного поля.

Тобто слід надавати перевагу розгляду та врахуванню при створенні вектору електромагнітного моменту процесу витіснення його складових з картини розподілу магнітного поля.

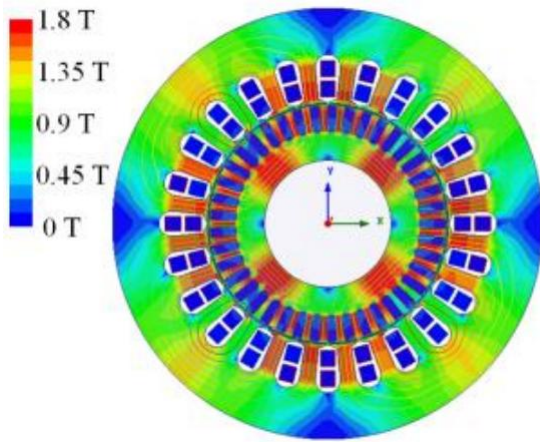
Або іншими словами слід розглядати можливу втрату взаємодії між магнітними полями відповідно до створеної картини їх розподілу.

$$\eta_{\text{перев}} = \frac{F_t}{\sqrt{F_n^2 + F_t^2}} \quad (2.1)$$

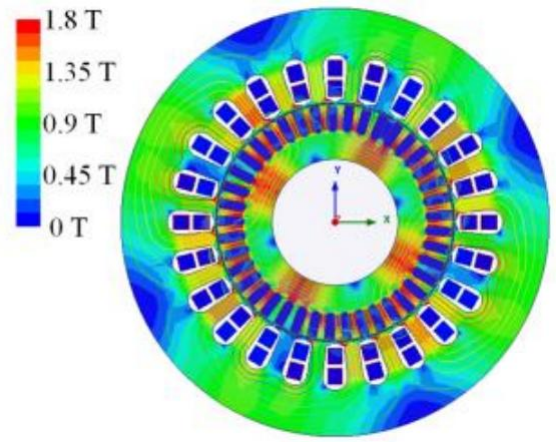
Де

$$F_t = \frac{B_n B_t}{\mu_0};$$

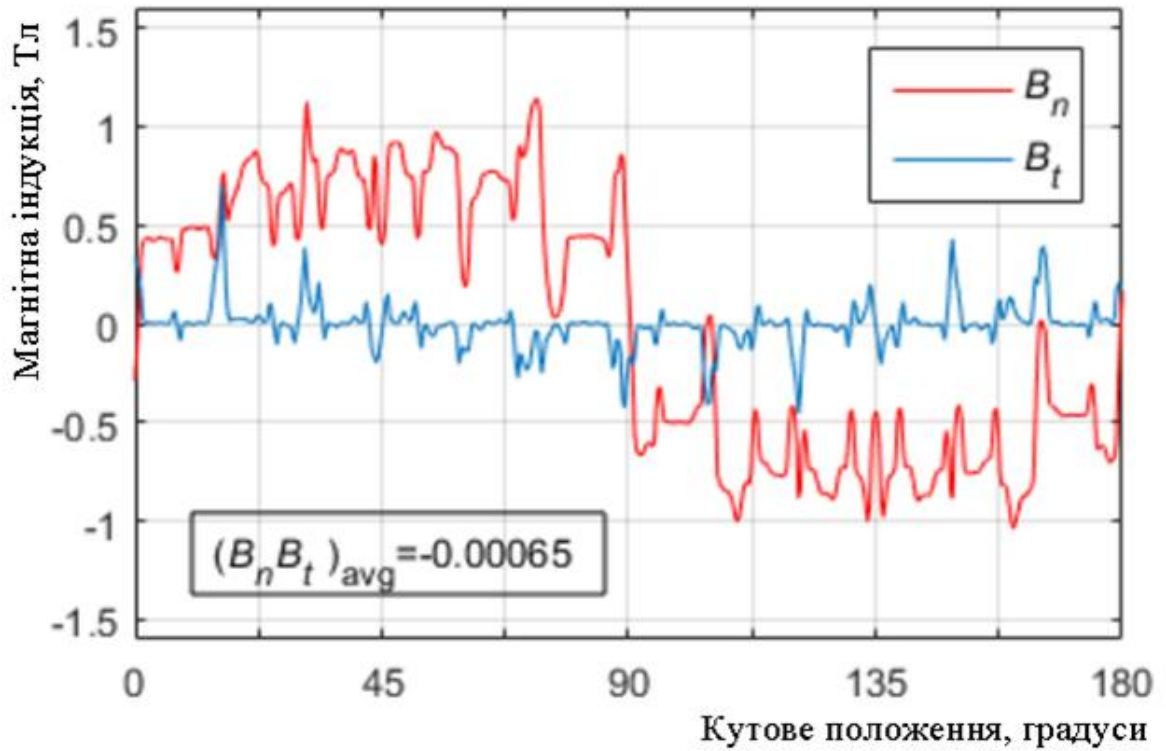
$$F_n = \frac{B_n^2 - B_t^2}{2\mu_0}.$$



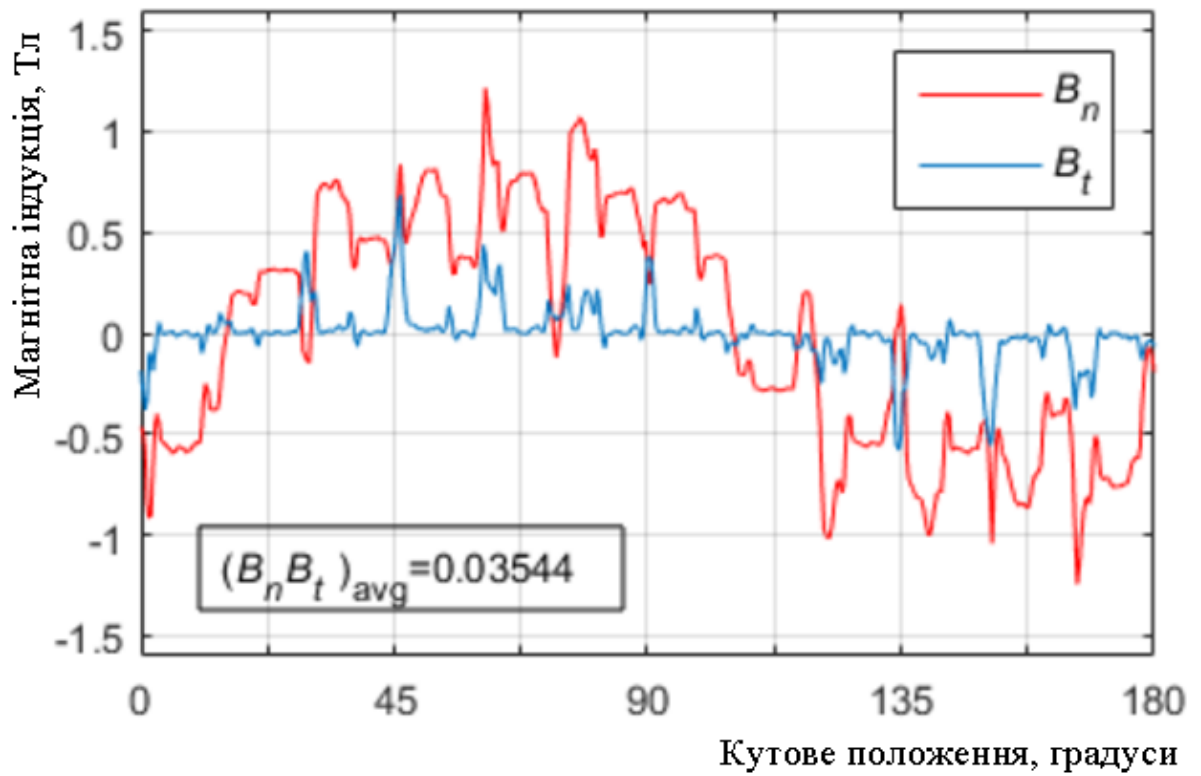
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.4 – Дослідження процесу створення крутного моменту в тягових електричних асинхронних двигунах електроприводів змінного струму

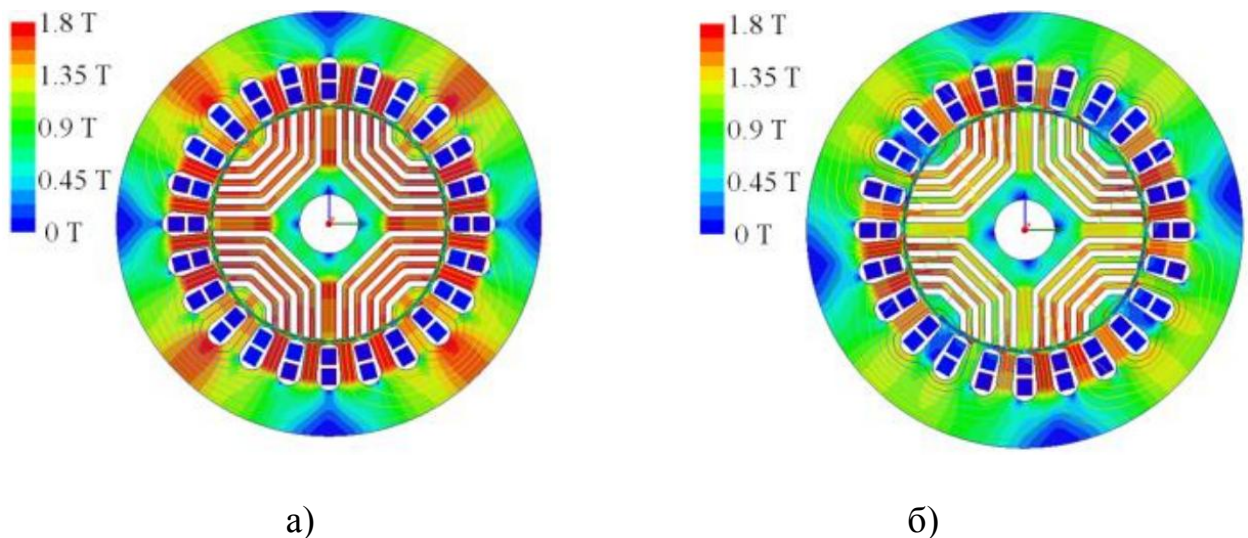
Розділ 3. Дослідження процесу створення реактивного моменту в тягових електричних двигунах електроприводів змінного струму

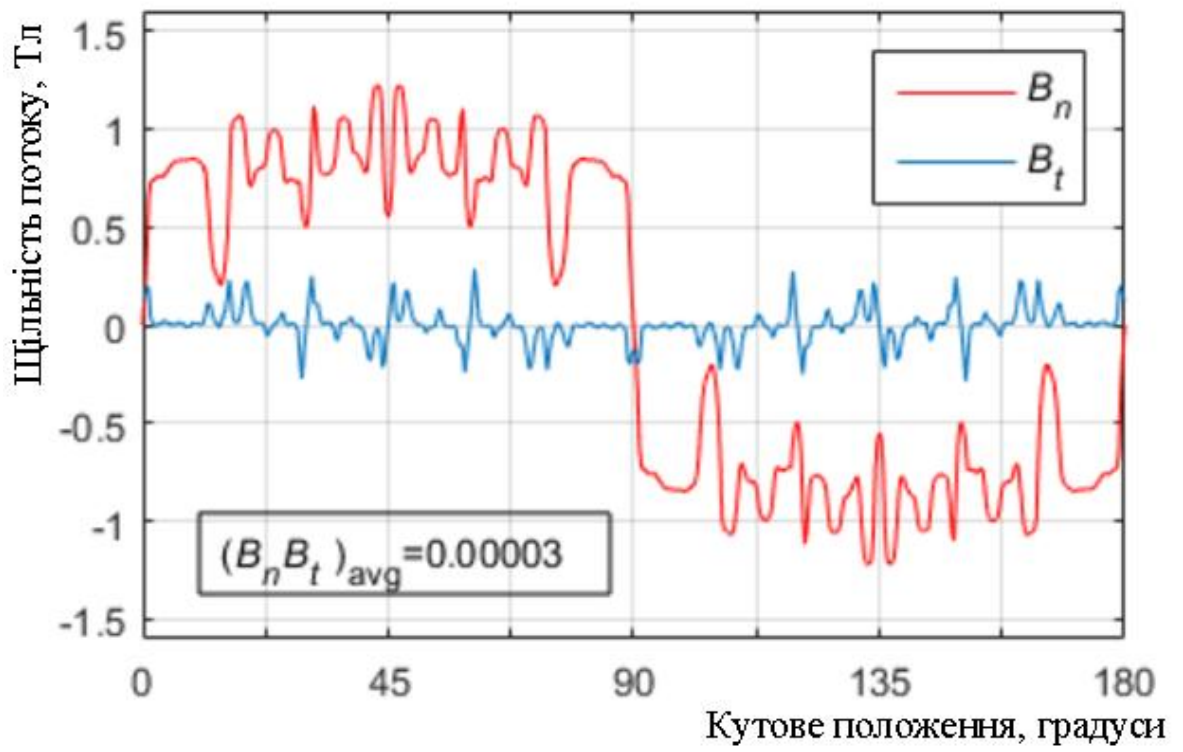
3.1. Дослідження процесу створення реактивного моменту в тягових синхронних реактивних двигунах електроприводів змінного струму

Як вже зазначалось, для підвищення ефективності перетворення параметрів електричної енергії у структурі синхронної машини слід підтримувати високу щільність розподілу складових магнітного потоку.

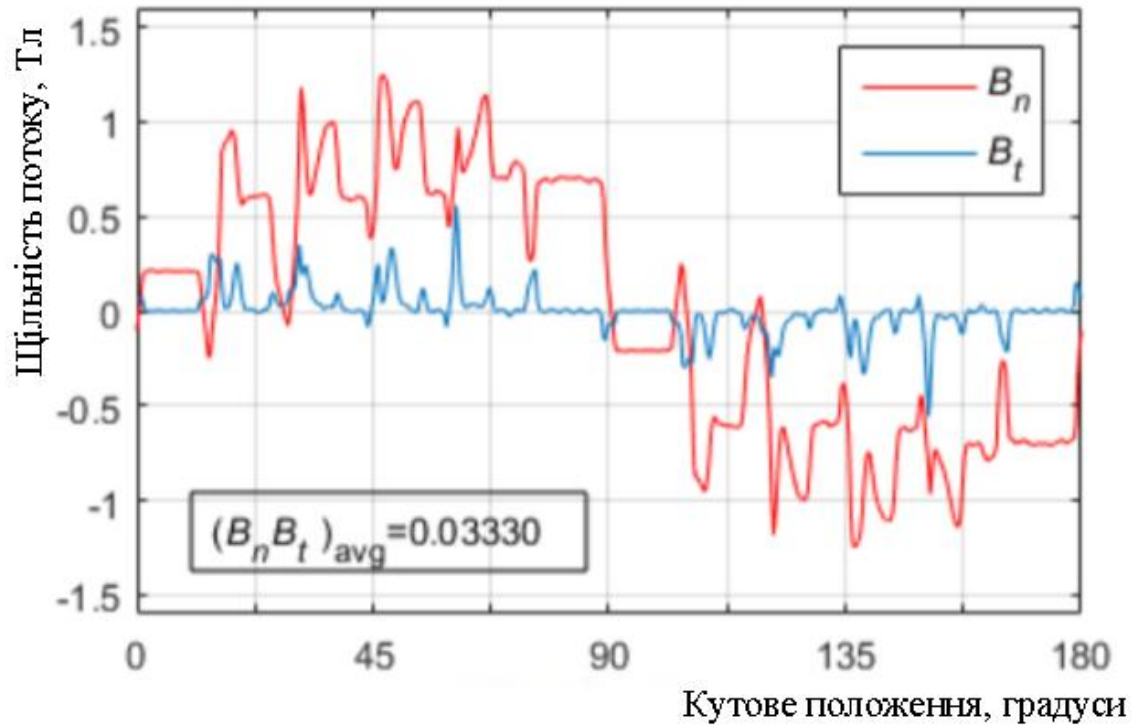
Також важливим є відсутність, або компенсація складової кутового зсуву між вектором магнітного потоку та вектором електромагнітного моменту синхронного двигуна.

Також, слід зазначити що особливу увагу слід надавати розгляду процесів взаємодії між цими векторами у зоні повітряного зазору.





в)



г)

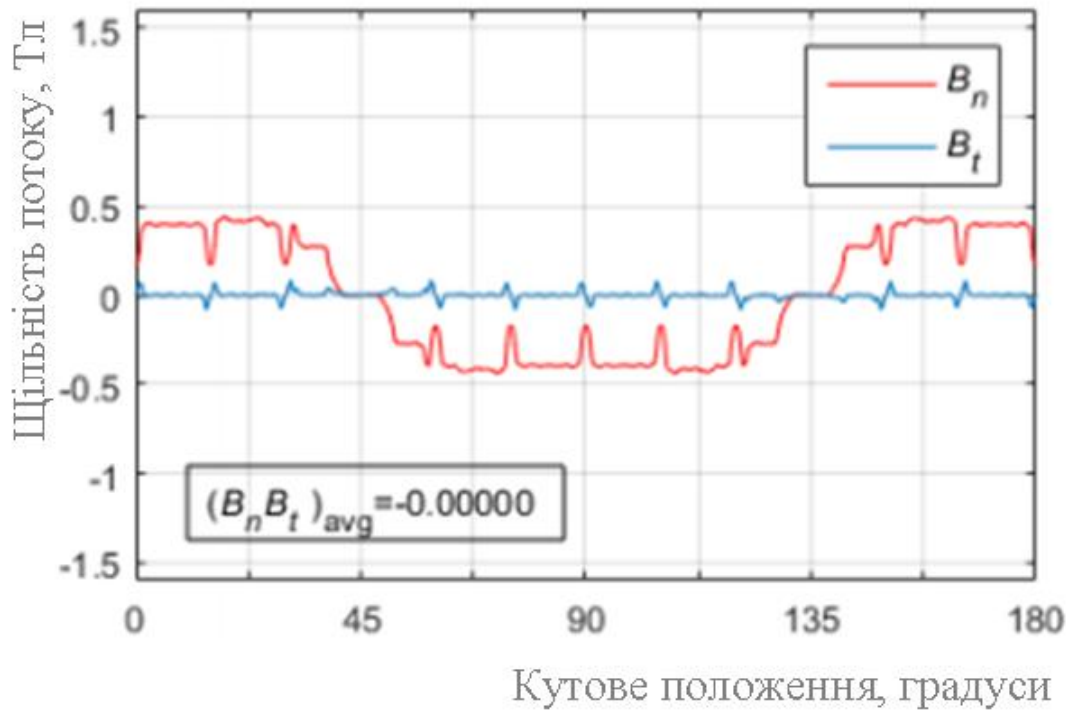
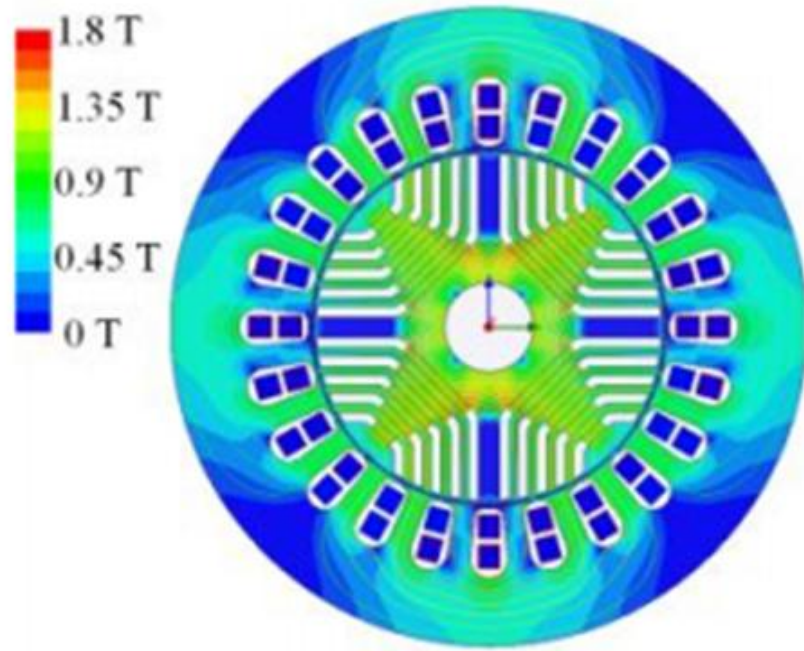
Рисунок 3.1 – Дослідження процесу створення реактивного моменту в тягових синхронних реактивних двигунах електроприводів змінного струму

3.2. Дослідження процесу створення реактивного моменту в тягових синхронних реактивних двигунах з постійними магнітами електроприводів змінного струму

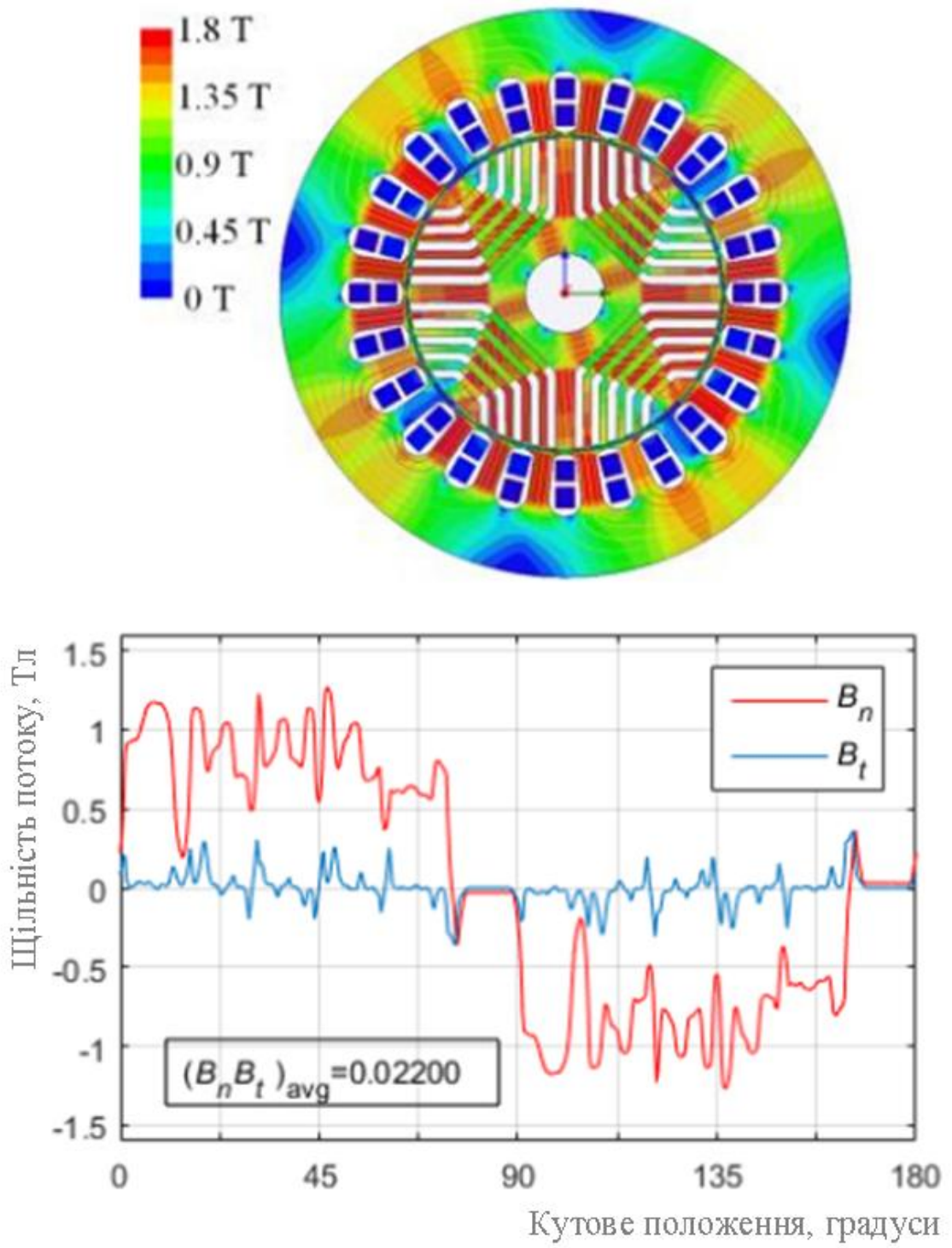
Синхронні реактивні двигуни мають у своїх структурах прояв дії постійної складової магнітного поля.

Тому важливим є врахування прояву такої дії на викривлення картин магнітного поля.

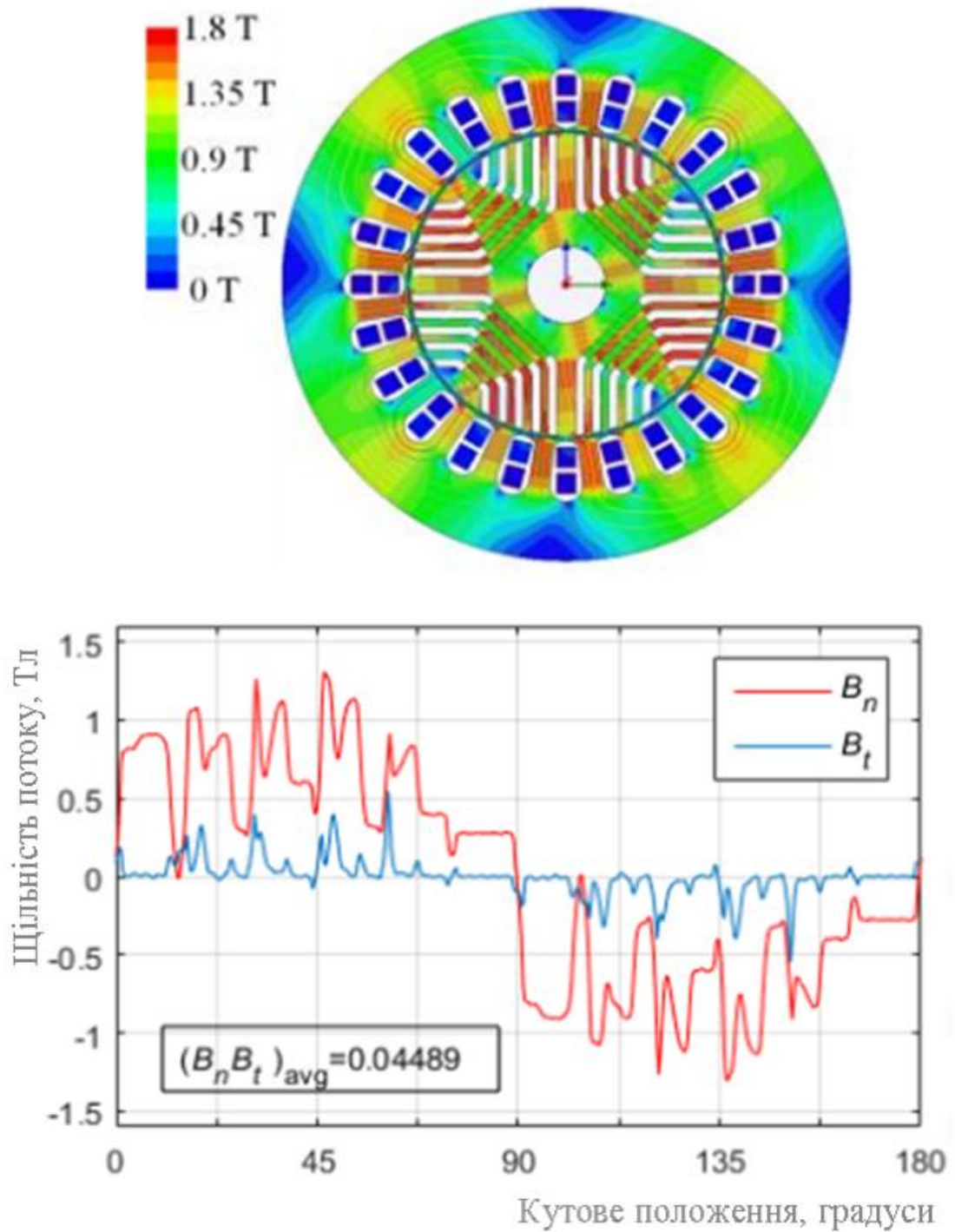
Такі викривлення мають прояв у вигляді кутового зміщення складових вектору магнітного потоку відносно складових вектору електромагнітного моменту, та мають бути враховані для усунення негативних проявів у вигляді коливального процесу у роторі електричної машини.



а)



б)



в)

Рисунок 3.2 – Дослідження процесу створення реактивного моменту в тягових синхронних реактивних двигунах з постійними магнітами електроприводів змінного струму

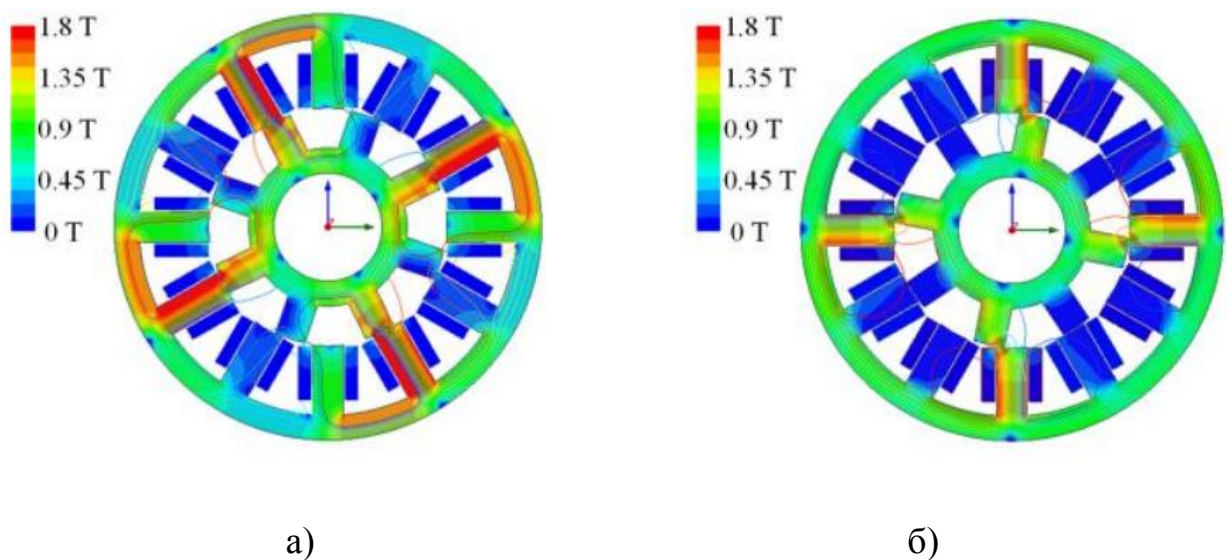
3.3. Дослідження процесу створення реактивного моменту в тягових вентильних реактивних двигунах електроприводів змінного струму

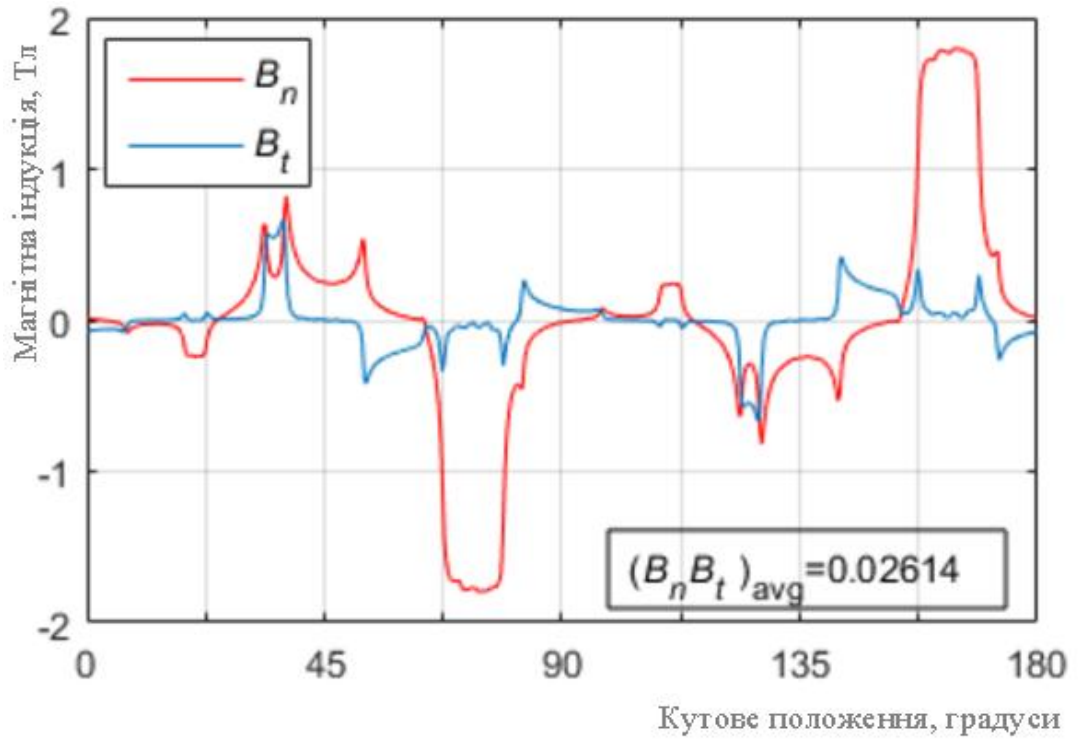
Вентильні реактивні двигуни є найбільш ефективними за якість перетворення параметрів електричної енергії у механічну.

Цей факт досягається високими значеннями показників розподілу щільності магнітного потоку, оскільки відбувається нарівні взаємодії двох ідентичних структур.

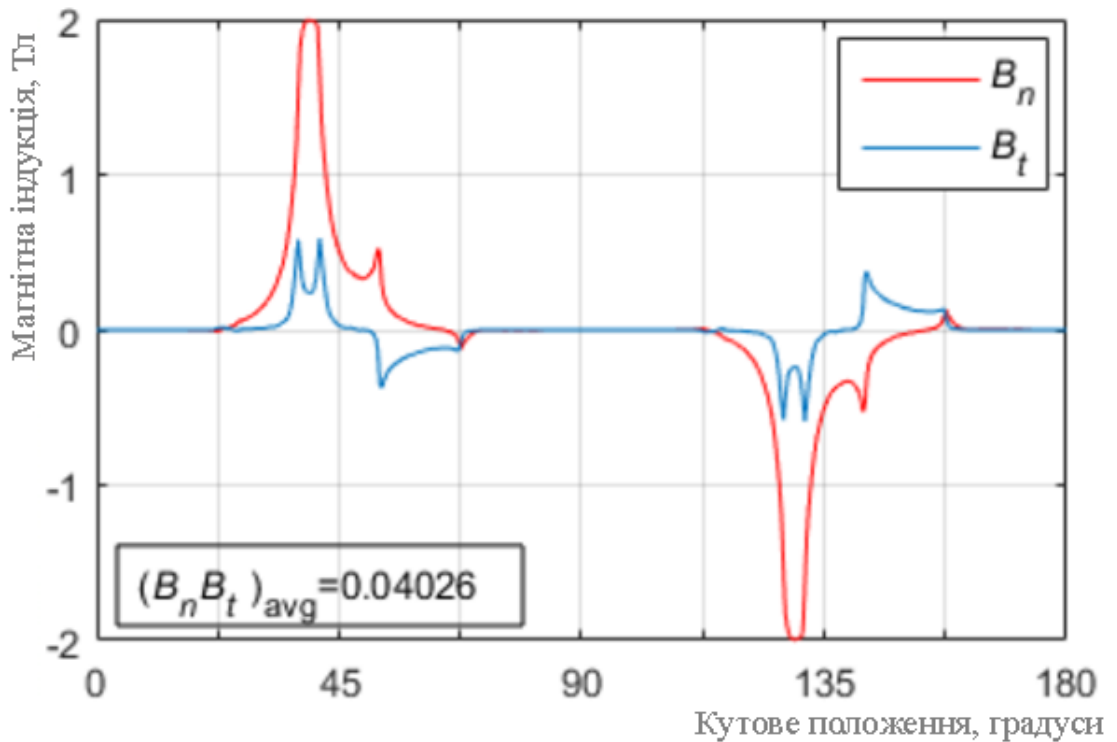
Структури постійного магнітного поля взаємодіють у такому випадку зі структурами такого ж самого прояву, що позитивно впливає у вигляді відсутності коливального процесу.

До цього слід додати простоту щодо керування такими системами в усіх режимах роботи.





в)



г)

Рисунок 3.3 – Дослідження процесу створення реактивного моменту в тягових вентильних реактивних двигунах електроприводів змінного струму

Висновки

У першому розділі проведено аналіз тягових електричних двигунів електроприводів змінного струму.

Показано, найбільш ефективними у структурі тягового електроприводу є синхронні двигуни.

Зазначено, що актуальним є завдання дослідження процесу створення крутного моменту в тягових електричних двигунах електроприводів змінного струму.

У другому розділі проведено дослідження процесу створення крутного моменту в тягових електричних двигунах електроприводів змінного струму.

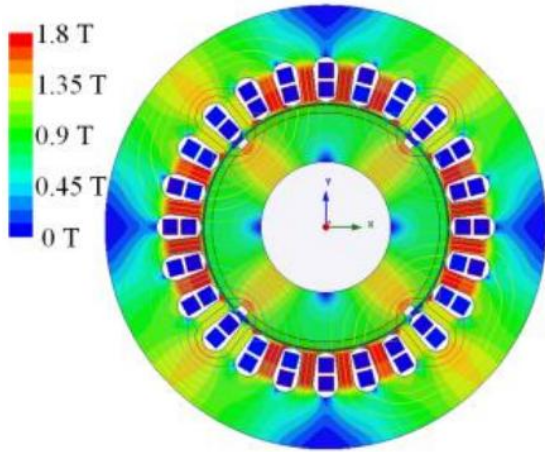
Дослідження проведені для синхронних та асинхронних двигунів.

Показано, що асинхронні двигуни мають більш високі показники перетворення енергії.

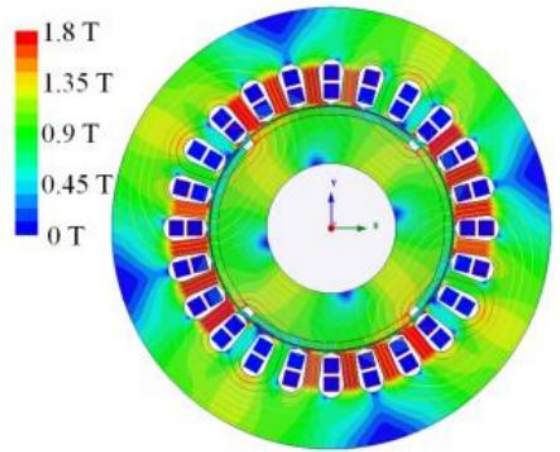
У третьому розділі досліджено процесу створення крутного моменту в тягових електричних двигунах електроприводів з вентильними реактивними двигунами.

Показано, що такий електропривод має численні переваги щодо ефективності створення крутного моменту.

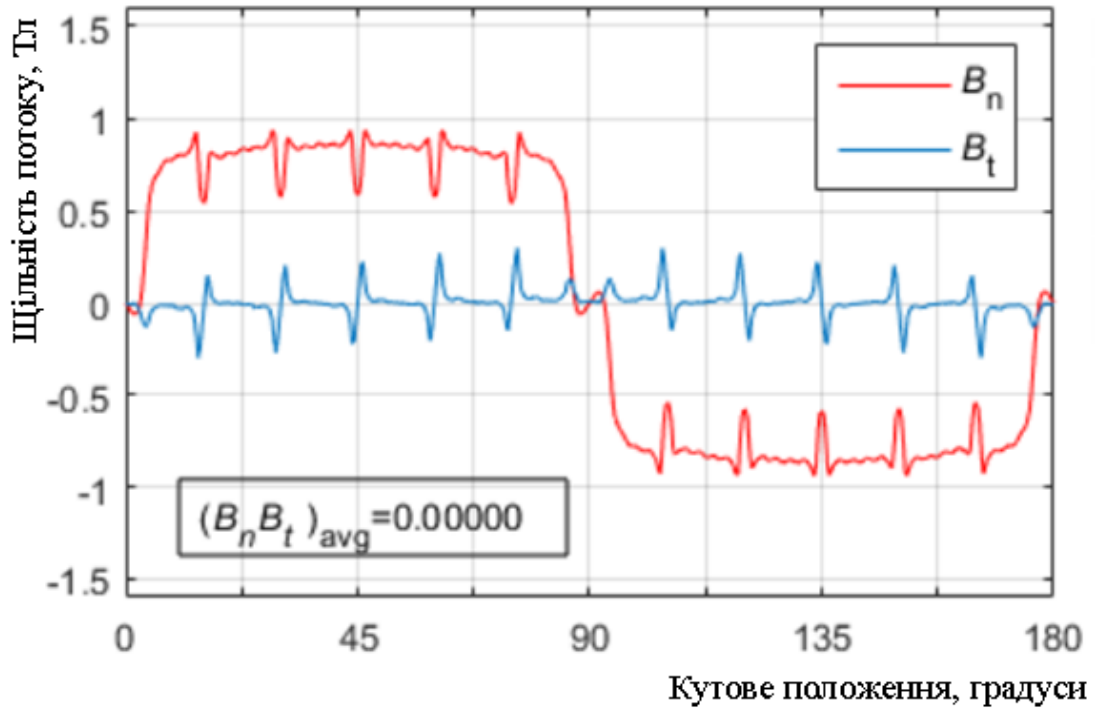
Додаток А



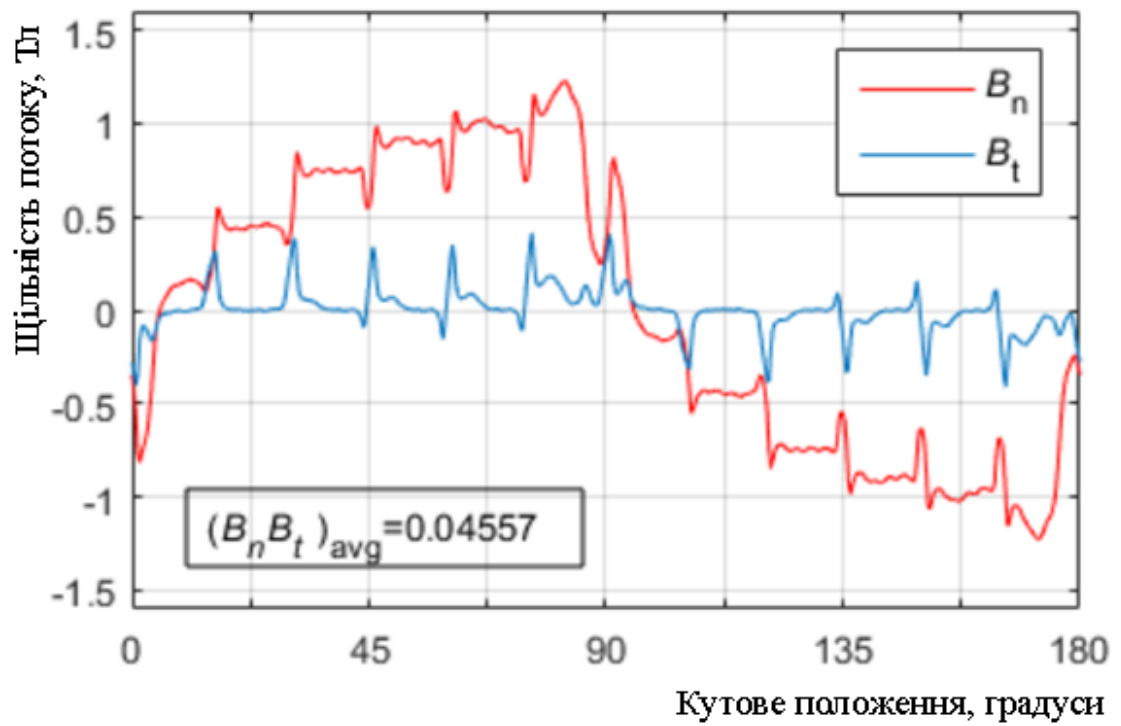
а)



б)

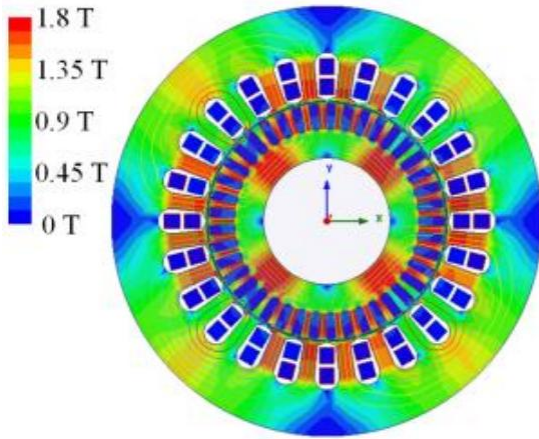


в)

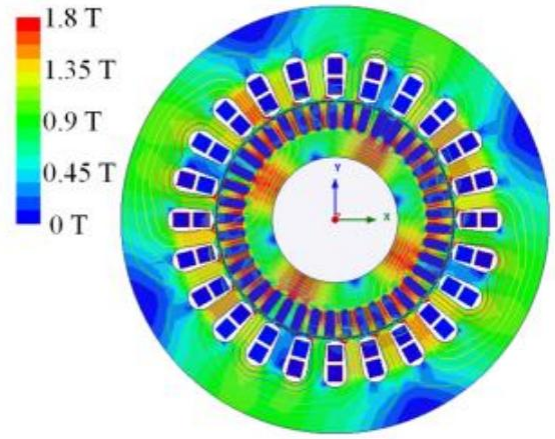


г)

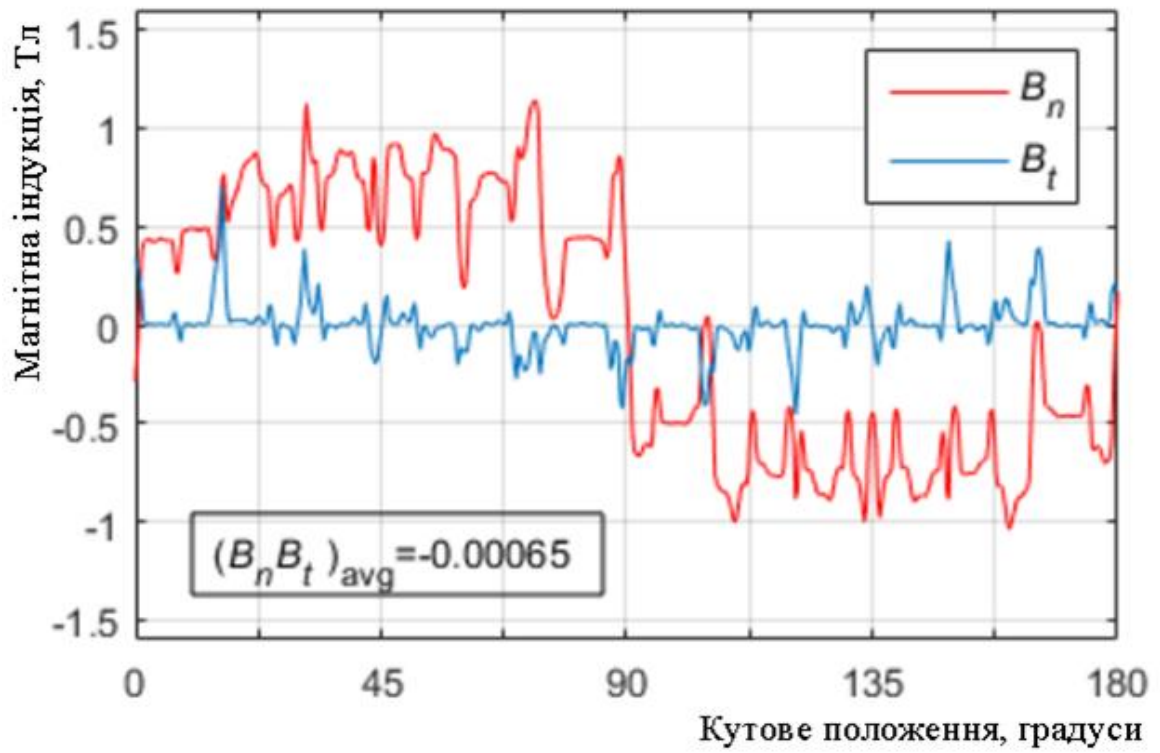
Дослідження процесу створення крутного моменту в тягових електричних синхронних двигунах електроприводів змінного струму



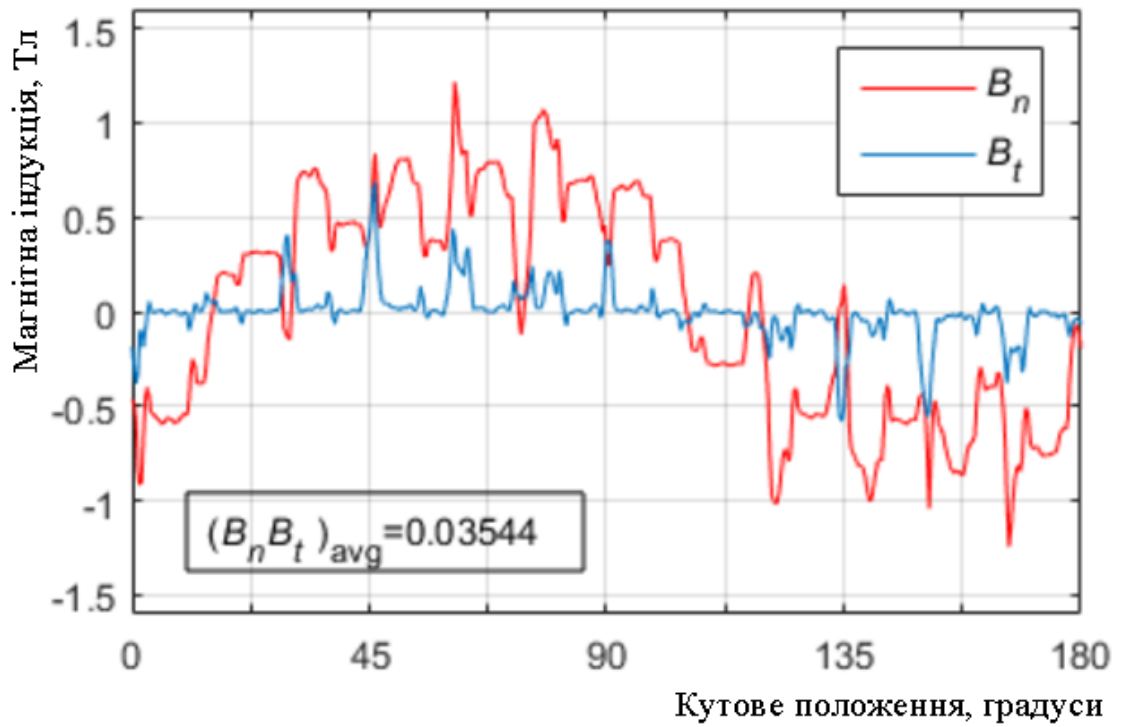
а)



б)



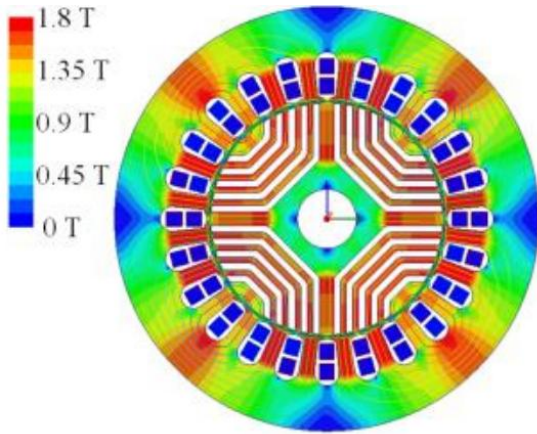
в)



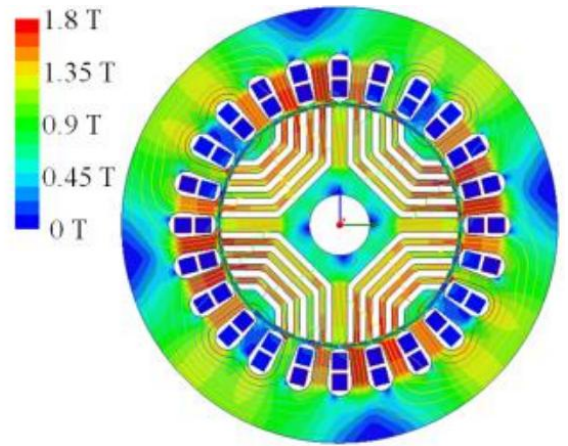
г)

Дослідження процесу створення крутного моменту в тягових електричних асинхронних двигунах електроприводів змінного струму

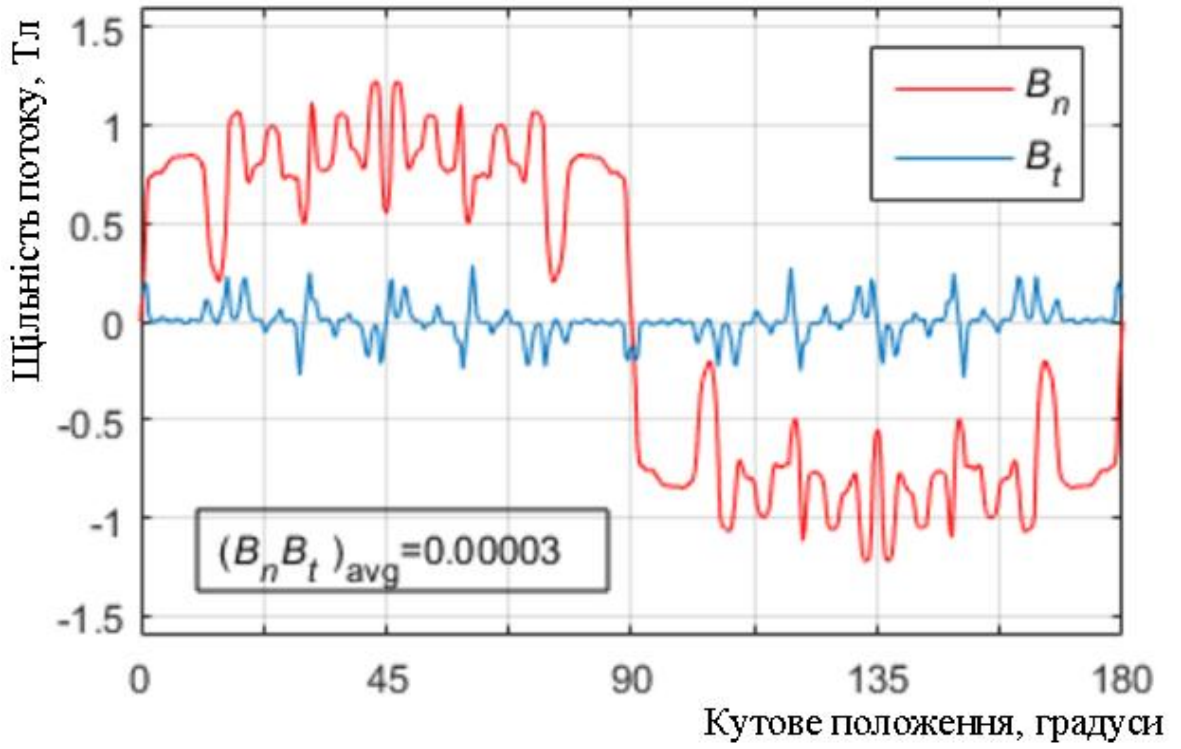
Додаток В



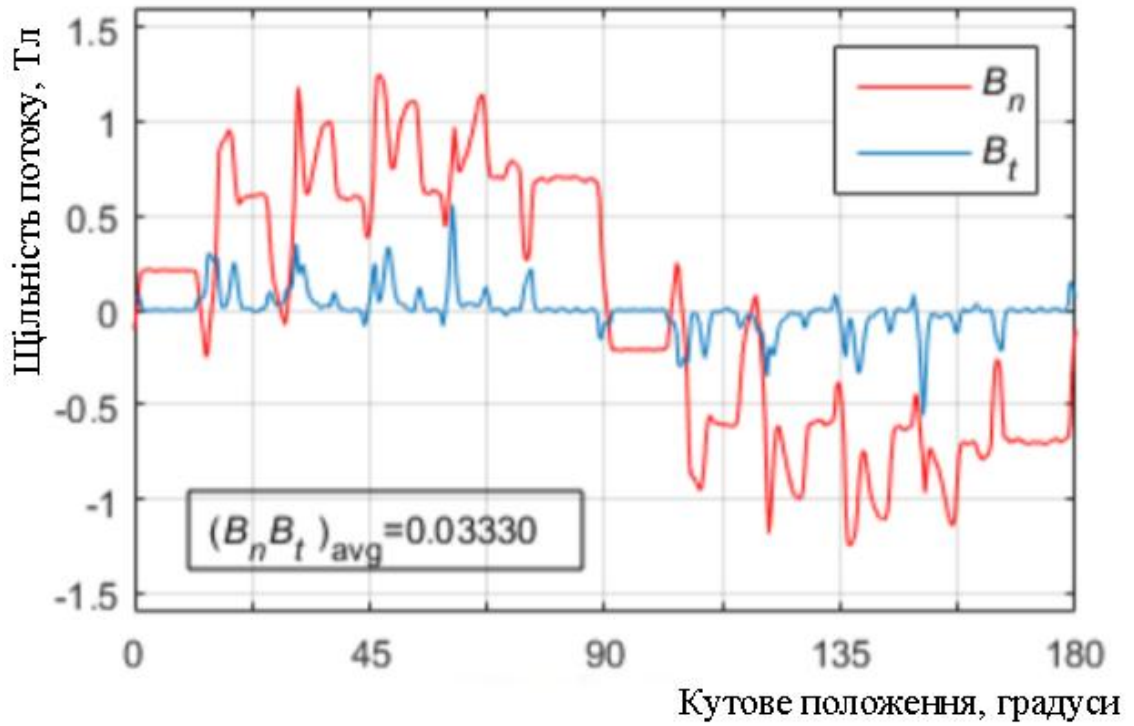
а)



б)



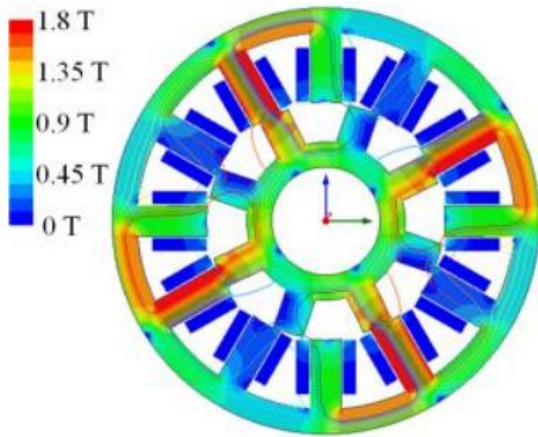
в)



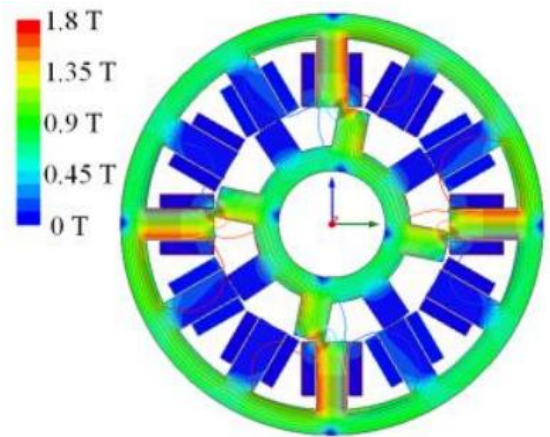
г)

Дослідження процесу створення реактивного моменту в тягових синхронних реактивних двигунах електроприводів змінного струму

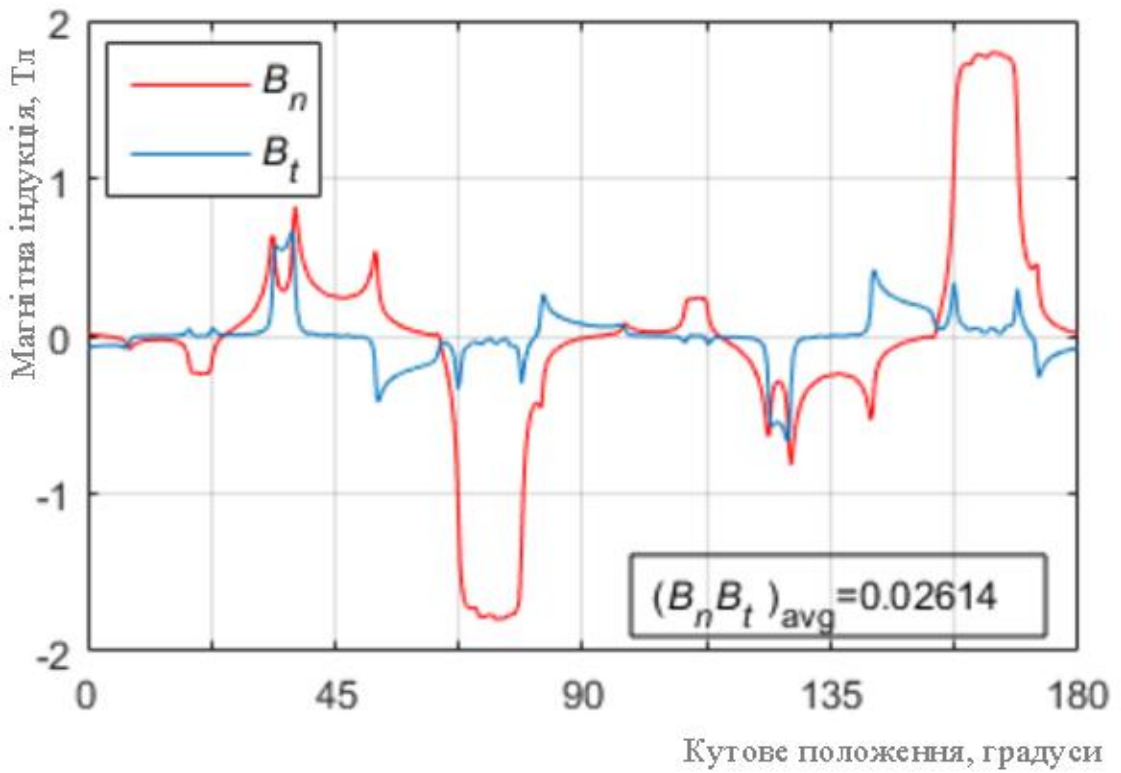
Додаток Г



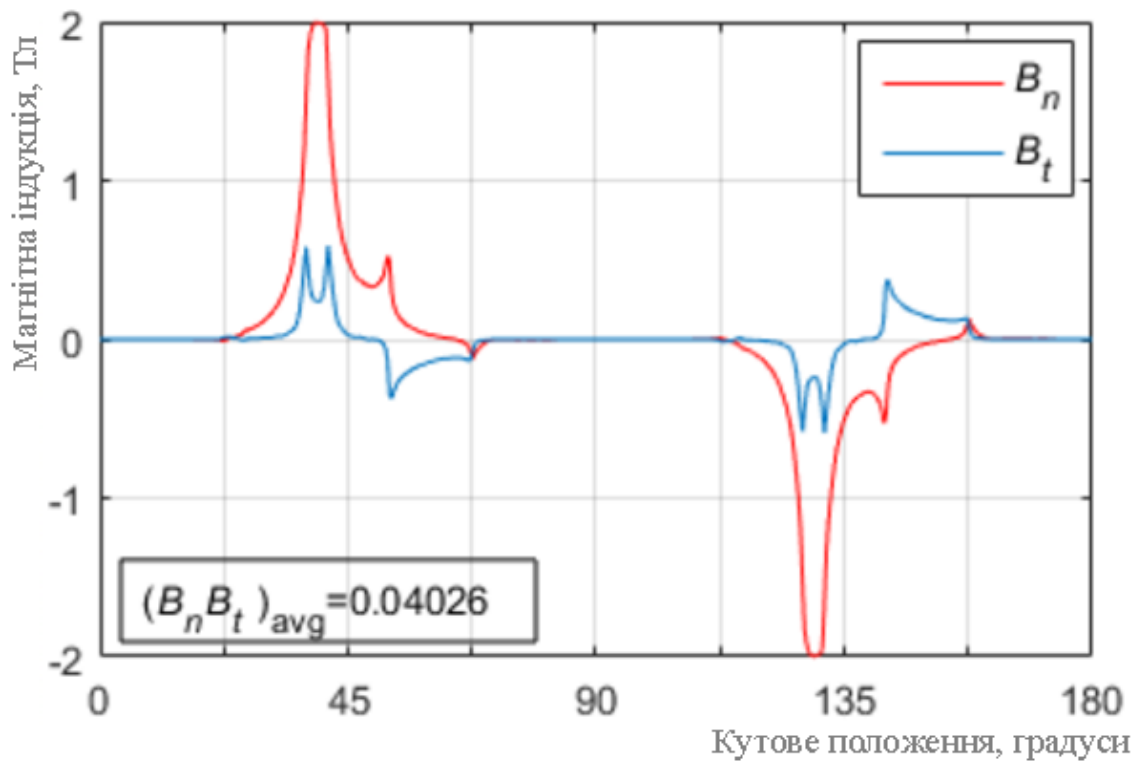
а)



б)



в)



г)

Дослідження процесу створення реактивного моменту в тягових вентильних реактивних двигунах електроприводів змінного струму