

Міністерство освіти і науки України

Криворізький національний університет

Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка

**до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

ТЕМА РОБОТИ:

**Варіативність заходів з підвищення ефективності використання тягових
електромеханічних систем**

Виконав: студент групи ЕЕМ-21ск

Микита ПЕРШАКОВ

Керівник випускної роботи _____

к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК

Нормо контролер _____

к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК

Декан ЕТФ _____

к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____

к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг 2024 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ПЕРШАКОВ Микита Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Варіативність заходів з підвищення ефективності використання
тягових електромеханічних систем

1. Термін подання студентом роботи: 10 червня 2024 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є розробка заходів з
підвищення ефективності використання тягових електромеханічних систем
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I.
Огляд структур тягових електромеханічних систем; II. Електромагнітні
процеси в електричних двигунах; III. Формування реактивного моменту в
електричних машинах.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових
креслень) I. Класифікація електричних машин на основі чотирьох складових
моменту; II. Аналіз складових нормальної та тангенціальної щільності
потoku та у середині повітряного зазору синхронного двигуна; III. Розподіл
щільності магнітного потоку у повітряному зазорі синхронної машини; IV.
Аналіз складових нормальної та тангенціальної щільності потоку та у
середині повітряного зазору синхронного двигуна.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ігор СІНЧУК		
II	Ігор СІНЧУК		
III	Ігор СІНЧУК		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Технічні характеристики тягових систем	10.05.24
2	Електричні машини	12.05.24
3	Розподіл складових магнітного потоку електричних двигунів	17.05.24
4	Синхронні двигуни з постійними магнітами	24.05.24
5	Аналіз процесів у асинхронному двигуні	26.05.24
6	Синхронні реактивні двигуни	28.05.24
7	Синхронні реактивні двигуни з постійними магнітами у роторі	31.05.24
8	Вентильні реактивні двигуни	07.06.24

Дата видання завдання 29.04.2024 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Микита ПЕРШАКОВ
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ігор СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

Зміст

Вступ.....	5
Розділ 1. Огляд структур тягових електромеханічних систем	8
1.1. Технічні характеристики тягових електромеханічних систем	8
1.2. Електричні машини.....	10
Розділ 2. Електромагнітні процеси в електричних двигунах	13
2.1. Розподіл складових магнітного потоку електричних двигунів.....	13
2.2. Синхронні двигуни з постійними магнітами	16
2.3. Аналіз процесів у асинхронному двигуні.....	22
Розділ 3. Формування реактивного моменту в електричних машинах	25
3.1. Синхронні реактивні двигуни	25
3.2. Синхронні реактивні двигуни з постійними магнітами у роторі.....	28
3.3. Вентильні реактивні двигуни.....	33
Висновки	36

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	К.
мн.	Арк.	Лист	опис	Дата		

Вступ

Модернізація електромеханічної системи починається з вибору електричного двигуна.

Нові типи електричних двигунів входять до перспективного напрямку розвитку систем електричного приводу.

У роботі проведено аналіз існуючих структур тягових електричних приводів.

Нові типи електричних машин відрізняються підвищеним ступенем ефективності перетворення енергії.

Це суттєво впливає на показники якості споживання ними електричної енергії.

Перетворювальні пристрої які входять до структури тягових електроприводів можуть впливати на якість перетворення параметрів електричного приводу і також використовуватись для поліпшення експлуатаційних показників.

Якість перетворення параметрів електричної енергії у структурах електричних приводів з перетворювачами має забезпечуватись системою керування.

Визначено що до перспективних типів електричних машин для тягового електроприводу є синхронні машини з постійними магнітами у структурі.

Але складність розрахунку системи керування та розбудови системи регулювання за багатокритеріальним управлінням висуває завдання пошуку нових типів електричних машин з подібними характеристиками.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	К.
мн.	Арк.	Лист	опис	Дата		

Слід зазначити що асинхронні двигуни мають подібну до синхронних структуру статора.

Також слід зазначити що принцип керування асинхронною машиною з боку статора має схожі засади.

На відміну від синхронної машини асинхронна має значно простішу конструкцію ротору.

Таким чином виникає можливість реалізувати базові принципи керування при значно легшій реалізації.

Для забезпечення керованості подібних систем відповідно до синхронних машин проводиться аналіз структури та моделювання енергетичних процесів.

У роботі проведено дискретне польове моделювання структури магнітопроводу машини.

Було проаналізовано синхронний двигун з постійними магнітами та асинхронний тяговий двигун.

Слід зазначити що структура асинхронного двигуна відрізняється навіть більш високим коефіцієнтом перетворення енергії ніж у синхронному двигуні.

Отже ефективність перетворення крутного моменту у структурі асинхронного тягового двигуна є доволі високою.

Також з аналізу моделювання випливає факт більш низького рівню радіальних зусиль у статорі асинхронної машини.

Таким чином можна відзначити що подібні нові типи тягових асинхронних двигунів будуть відрізнятись зменшеним рівнем вібрації при роботі.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	К.
мн.	Арк.	Лист	опис	Дата		

Також очевидним є зменшення акустичного шуму при роботі та уникнення явища витіснення радіального струму.

Таким чином доведено що для підвищення показників ефективності роботи тягового електроприводу необхідно уникати виникнення пульсацій крутного моменту.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	К.
мн.	Арк.	Лист	опис	Дата		

Розділ 1. Огляд структур тягових електромеханічних систем

1.1. Технічні характеристики тягових електромеханічних систем

До тягової електромеханічної системи входять як самий двигун так й перетворювач.

Перетворювач забезпечує плавність регулювання параметрів електричного приводу.

Від потужності тягових електричних двигунів залежатиме вибір структури перетворювача.

Технічні характеристики тягового перетворювача налічують безліч параметрів.

До основних характеристик тягового перетворювача у структурі тягового електроприводу можна віднести:

- тип напівпровідникових ключів;
- клас точності регулювання параметрів;
- частота модульованого сигналу.

Можна відзначити що до технічних характеристик слід також віднести значення номінального струму та напруги перетворювального пристрою, що визначаються параметрами тягових електричних двигунів та структурою системи живлення.

Основним критерієм подібних систем буде збереження ефективної щільності розподілу крутного моменту.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08				
<i>Зм.З</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Пі</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розробив</i>	ПершаковМ.В.					Розділ 1	<i>Лім.</i>	<i>ЛистАр</i>	<i>Листів</i>
<i>Перевірів</i>	Сінчук І.О.							108	5
<i>Реценз.</i>						КНУ ЕЕМ-21ск			
<i>Н. Контр.</i>	Сінчук І.О.								
<i>Затвердив</i>	ПересунькоІ.І.								

Для реалізації таких тягових електромеханічних систем підійдуть системи змінного струму на базі асинхронного електроприводу.

Але слід розглядати й інші структури.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
						9
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

де

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

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

Вираз для розрахунку електромагнітного крутного моменту:

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

Рисунок 1.2 – Класифікація електричних двигунів за показниками електромагнітного моменту

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Отже у розділі представлено класифікацію основних типів електричних двигунів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Розділ 2. Електромагнітні процеси в електричних двигунах

2.1. Розподіл складових магнітного потоку електричних двигунів

Розглянемо яким чином відбувається розподіл електричного крутного моменту у структурі електричної машини.

Розподіл крутного моменту відбувається відповідно до проекцій вектору на відповідні вісі.

Розподіл складових магнітного потоку буде залежити від їх фізичного розташування тобто конструкції обмотки ротору електричної асинхронної машини.

а)

б)

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08			
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>	Розділ 2	<i>Літ.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>
<i>Розробив</i>	ПершаковМ.В.						15	12
<i>Перевірів</i>	Сінчук І.О.							
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. Контр.</i>	Сінчук І.О.							
<i>Затвердив</i>	Пересунько І.І.					КНУ ЕЕМ-21ск		

в)

г)

д)

е)

Рисунок 2.1 Електричні двигуни при моделюванні:

а – синхронні двигуни з постійними магнітами по схемі загального виконання; б – синхронні двигуни з магнітами що знаходяться у роторі; в – асинхронні двигуни; г – синхронні реактивні двигуни; д – синхронні реактивні двигуни по схемі з постійними магнітами що знаходяться у роторі; е – вентильні реактивні двигуни

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Таким чином отримано розподіл магнітного потоку у тягових електричних машинах.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

2.2. Синхронні двигуни з постійними магнітами

Розглянемо розподіл складових нормального та тангенціального магнітного потоку.

а)

б)

в)

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

г)

Рисунок 2.2 – Складові нормального та тангенціального розподілу магнітного потоку у повітряному зазорі синхронних двигунів з постійними магнітами

Тепер розглянемо розподіл складових нормального та тангенціального розподілу магнітного потоку для повітряного зазору електричної машини.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

a)

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

б)

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

в)

Рисунок 2.3 – Складові нормального та тангенціального розподілу магнітного потоку у повітряному зазорі синхронних двигунів з постійними магнітами

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином у розділі отримано характеристику щільності розподілу крутного моменту електричної машини.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

2.3. Аналіз процесів у асинхронному двигуні

Розглянемо можливість зниження рівню вібрації при роботі електричних двигунів у структурі тягового електроприводу змінного струму.

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

де

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

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

а)

б)

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

В)

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

г)

Рисунок 2.4 – Складові нормального та тангенціального розподілу магнітного потоку у повітряному зазорі асинхронних двигунів

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Розділ 3. Формування реактивного моменту в електричних машинах

3.1. Синхронні реактивні двигуни

Проведемо порівняння щільності розподілу крутного моменту асинхронної машини із структурою синхронної яка була обрана за базову модель.

Для тягового електроприводу важливим є концентрація щільності розподілу складових вектору крутного моменту у відповідності до щільності розподілу магнітного потоку.

Наведемо результати моделювання подібної системи при визначені щільності розподілу за нормальною та тангенціальною складовими магнітного потоку.

а)

б)

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08			
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>				
<i>Розробив</i>		ПершаковМ.В.			Розділ 3	<i>Літ.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>
<i>Перевірів</i>		Сінчук І.О.					27	11
<i>Реценз.</i>						КНУ ЕЕМ-21ск		
<i>Н. Контр.</i>		Сінчук І.О.						
<i>Затвердив</i>		Пересунько І.І.						

В)

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
						26
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

г)

Рисунок 3.1 – Складові нормального та тангенціального розподілу магнітного потоку у повітряному зазорі синхронних реактивних двигунів

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2. Синхронні реактивні двигуни з постійними магнітами у роторі

Наведемо результати моделювання подібної системи при визначені щільності розподілу за нормальною та тангенціальною складовими магнітного потоку у порівнянні з синхронною машиною з постійними магнітами.

Картину розподілу поля буде показано у вигляді панорамного поля відповідно до щільності.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

a)

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
						29
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

б)

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
						30
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

в)

Рисунок 3.2 – Складові нормального та тангенціального розподілу магнітного потоку у повітряному зазорі синхронних реактивних двигунів з постійними магнітами

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином у розділі було проведено порівняльний аналіз картини розподілу щільності магнітного потоку при його розподілі на нормальну та тангенціальну складові синхронного двигуна з постійними магнітами й асинхронного тягового двигуна.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
						32
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

3.3. Вентильні реактивні двигуни

Наведемо результати моделювання подібної системи при визначені щільності розподілу за нормальною та тангенціальною складовими магнітного потоку у порівнянні з синхронною вентильною машиною.

Картину розподілу поля буде показано у вигляді панорамного поля відповідно до щільності.

а)

б)

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

в)

г)

Рисунок 3.3 – Складові нормального та тангенціального розподілу магнітного потоку у повітряному зазорі вентильних реактивних двигунів

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином у розділі було проведено порівняльний аналіз картини розподілу щільності магнітного потоку при його розподілі на нормальну та тангенціальну складові синхронного вентильного двигуна й асинхронного тягового двигуна.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Висновки

Модернізація електромеханічної системи починається з вибору електричного двигуна.

Нові типи електричних двигунів входять до перспективного напрямку розвитку систем електричного приводу.

У роботі проведено аналіз існуючих структур тягових електричних приводів.

Нові типи електричних машин відрізняються підвищеним ступенем ефективності перетворення енергії.

Це суттєво впливає на показники якості споживання ними електричної енергії.

Перетворювальні пристрої які входять до структури тягових електроприводів можуть впливати на якість перетворення параметрів електричного приводу і також використовуватись для поліпшення експлуатаційних показників.

Якість перетворення параметрів електричної енергії у структурах електричних приводів з перетворювачами має забезпечуватись системою керування.

Визначено що до перспективних типів електричних машин для тягового електроприводу є синхронні машини з постійними магнітами у структурі.

Але складність розрахунку системи керування та розбудови системи регулювання за багатокритеріальним управлінням висуває завдання пошуку нових типів електричних машин з подібними характеристиками.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Слід зазначити що асинхронні двигуни мають подібну до синхронних структуру статора.

Також слід зазначити що принцип керування асинхронною машиною з боку статора має схожі засади.

На відміну від синхронної машини асинхронна має значно простішу конструкцію ротору.

Таким чином виникає можливість реалізувати базові принципи керування при значно легшій реалізації.

Для забезпечення керованості подібних систем відповідно до синхронних машин проводиться аналіз структури та моделювання енергетичних процесів.

У роботі проведено дискретне польове моделювання структури магнітопроводу машини.

Було проаналізовано синхронний двигун з постійними магнітами та асинхронний тяговий двигун.

Слід зазначити що структура асинхронного двигуна відрізняється навіть більш високим коефіцієнтом перетворення енергії ніж у синхронному двигуні.

Отже ефективність перетворення крутного моменту у структурі асинхронного тягового двигуна є доволі високою.

Також з аналізу моделювання випливає факт більш низького рівню радіальних зусиль у статорі асинхронної машини.

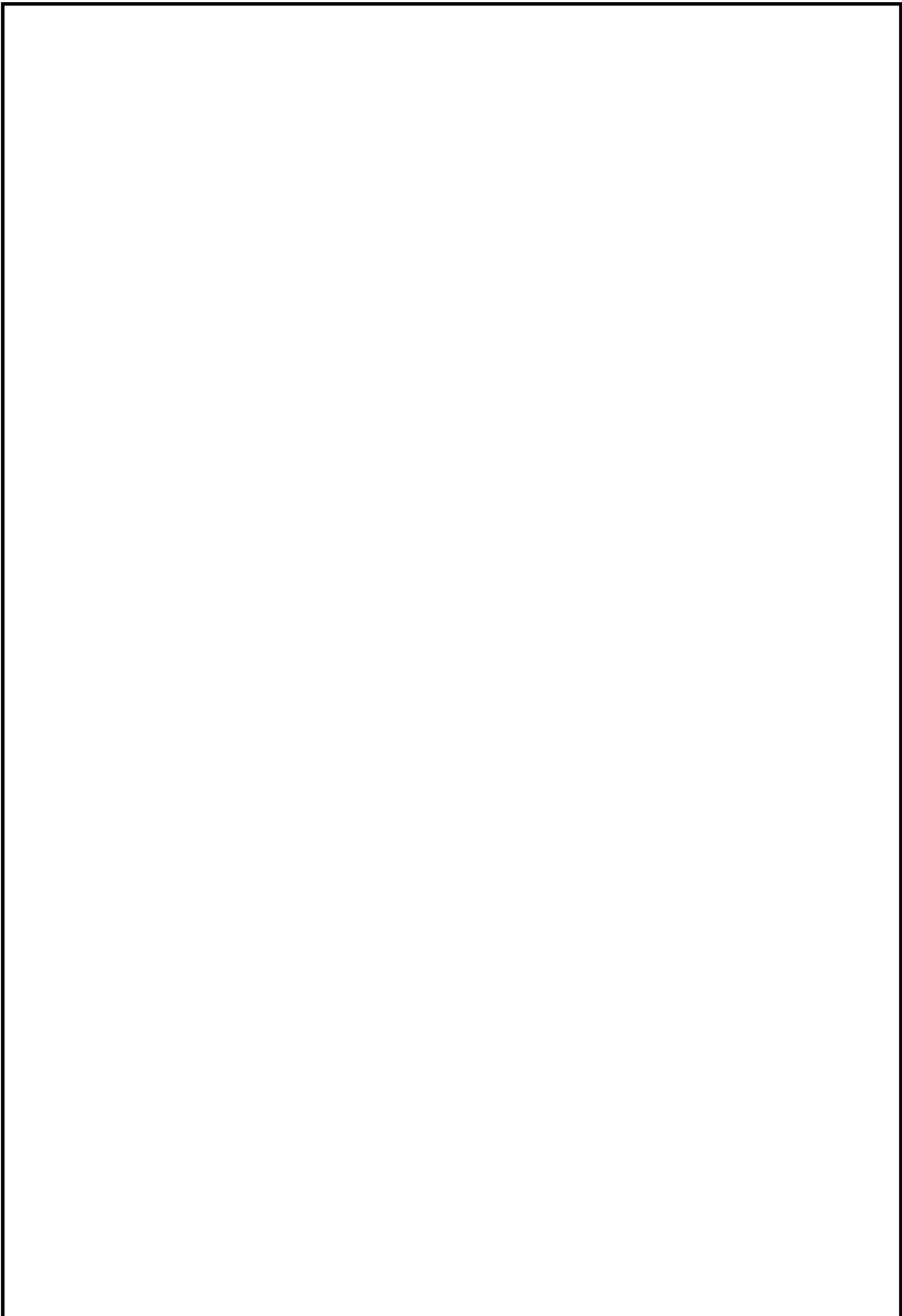
Таким чином можна відзначити що подібні нові типи тягових асинхронних двигунів будуть відрізнятись зменшеним рівнем вібрації при роботі.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Також очевидним є зменшення акустичного шуму при роботі та уникнення явища витіснення радіального струму.

Таким чином доведено що для підвищення показників ефективності роботи тягового електроприводу необхідно уникати виникнення пульсацій крутного моменту.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	Арк.
						38
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		



					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-08	
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		