

**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:**

**ЧотириквADRANTний перетворювач для умов тягового електроприводу  
транспортного засобу**

**Виконав: студент групи ЕЕМ-21ск**

**Артур ЗАЄЦЬ**

**Керівник випускної роботи \_\_\_\_\_**

**д.т.н., проф. Олег СІНЧУК**

**Нормо контролер \_\_\_\_\_**

**д.т.н., проф. Олег 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

ЗАЄЦЬ Артур Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: ЧотириквADRANTНИЙ перетворювач для умов тягового  
електроприводу транспортного засобу

1. Термін подання студентом роботи: 10 червня 2024 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є розробка чотириквADRANTного перетворювач для умов тягового електроприводу транспортного засобу
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Аналіз перетворювачів; II. Система керування чотириквADRANTним перетворювачем; III. Моделювання режимів роботи перетворювачів.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Загальний вид чотириквADRANTного перетворювача; II. Принципова схема автономного тягового інвертора напруги на IGBT транзисторах; III. Режими роботи чотириквADRANTного перетворювача; IV. Модель двоквADRANTного перетворювача; V. Модель керування швидкістю двигуна постійного струму за допомогою H-мосту; VI. Результати моделювання керування швидкістю двигуна постійного струму за допомогою H-мосту.

5. Консультанти розділів роботи

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

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Перетворювачі типу DC – DC	10.05.24
2	Робота двохквADRантного перетворювача	12.05.24
3	Робота чотириквADRантного перетворювача	17.05.24
4	ЧотириквADRантні перетворювачі у структурах тягових електроприводів	19.05.24
5	Синтез структури чотириквADRантного контролера	26.05.24
6	Управління чотириквADRантним контролером	28.05.24
7	Моделювання роботи двоквADRантного перетворювача	31.05.24
8	Моделювання роботи чотириквADRантного перетворювача	04.06.24
9	Реалізація законів керування чотириквADRантним перетворювачем	07.06.24

Дата видання завдання 29.04.2024 р.

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_  
(підпис)

Артур ЗАЄЦЬ  
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Олег СІНЧУК  
(Ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «ЧотириквADRANTНИЙ перетворювач для умов тягового електроприводу транспортного засобу»

Об'єкт розробки – перетворювачі електричної енергії в структурах тягового електроприводу.

У першому розділі проаналізовано електричні схеми перетворювачів електричної енергії в структурах тягового електроприводу, виділено такі моменти при роботі, які впливають на вибір структури перетворювача, показано основні напрями підвищення енергетичної ефективності таких схем за рахунок використання перетворювачів нового типу.

У другому розділі була розроблена математична модель перетворювача електричної енергії в структурах тягового електроприводу та проведено дослідження електромагнітних процесів в електричних колах перетворювача.

У третьому розділі було проведено вибір комп'ютерної моделі для дослідження роботи перетворювача електричної енергії в структурах тягового електроприводу, обрана й обґрунтована його структура, проведено аналіз електромагнітних процесів при роботі тягового електроприводу в режимі реверсу.

ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, ПЕРЕТВОРЮВАЧ, РЕВЕРС,  
ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Зміст

Вступ.....	6
Розділ 1. Аналіз перетворювачів .....	8
1.1. Перетворювачі типу DC – DC.....	8
1.2. Робота двохквADRANTного перетворювача .....	11
1.3. Робота чотириквADRANTного перетворювача .....	13
1.4. ЧотириквADRANTні перетворювачі у структурах тягових електроприводів .....	17
Розділ 2. Система керування чотириквADRANTним перетворювачем .....	20
2.1. Синтез структури чотириквADRANTного контролера.....	20
2.2. Визначення частоти тактування чотириквADRANTного контролера .....	26
2.3. Управління чотириквADRANTним контролером .....	31
Розділ 3. Моделювання режимів роботи перетворювачів .....	37
3.1. Моделювання роботи двоквADRANTного перетворювача.....	37
3.2. Моделювання роботи чотириквADRANTного перетворювача .....	40
3.3. Реалізація законів керування чотириквADRANTним перетворювачем....	47
3.4. Спосіб реалізації системи електроприводу на базі чотириквADRANTного перетворювача .....	56
Висновки .....	57

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Вступ

Перетворювальні пристрої використовуються у сучасних електроприводах для поліпшення їх регулювальних властивостей у порівнянні зі звичайними структурами.

Особливо це стосується систем постійного струму у яких при використанні звичайної схеми регулювання дуже підвищується рівень втрат електричної енергії.

Схеми перетворювальних установок електроприводів постійного струму набули широкого застосування внаслідок використання такого підходу.

У залежності від типу електричного приводу та його потужності застосовують різні елементи що складають структуру перетворювача відповідної схеми.

Це обумовлено значенням робочих струмів у колі перетворювального пристрою.

Ще одним критерієм щодо вибору схеми перетворювача є забезпечення функціонування електричного приводу у відповідних до технологічних потреб виробничої установки режимах його роботи та забезпечення експлуатаційних показників.

Новим підходом у розбудові структури перетворювача постійного струму є чотириквADRANTні перетворювачі.

Вони забезпечують роботу електричного приводу в усім діапазоні зміни частоти обертання та струму.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При цьому слід відзначити що робота електричної машини забезпечується ефективним регулюванням як у двигунному так й усіх трьох гальмівних режимах.

Важливим також є принцип розбудови структури перетворювального пристрою.

Схеми перетворювальних пристроїв розбудовані за чоперним принципом відрізняються суттєво поліпшеними енергетичними характеристиками.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Розділ 1. Аналіз перетворювачів

### 1.1. Перетворювачі типу DC – DC

Розглянемо перетворювальний пристрій який забезпечує регулювання параметрів вхідної та вихідної напруги за принципом з постійного у постійний струм.

Такі схеми розбудовані за чоперним принципом забезпечують плавне регулювання вихідної напруги.

Принцип дії такої системи нагадує статичний перемикач, який виконує функцію порогового пристрою.

Зазвичай такі структури складають регульовані транзисторні елементи.

Тип транзисторів як ключових елементів обирається за максимальним значенням струму та частоти комутації відповідно до режиму роботи електропривода.

Ключові елементи можуть використовувати примусову комутацію або спеціальні буферні схеми.

Ефективність перетворення забезпечує вихідні характеристики з підвищеними енергетичними показниками.

Схема працює за принципом керованого ділильника, що забезпечує комутацію почергово приєднання джерела до входу та комутацію входу та виходу перетворювача.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05			
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Розділ 1	<i>Лім.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>
<i>Розробив</i>	Заєць А.А.						8	12
<i>Перевірів</i>	Сінчук О.М.							
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. Контр.</i>	Сінчук О.М.							
<i>Затвердив</i>	Пересунько І.І.					КНУ ЕЕМ-21ск		



Ділильник у першому квадранті називають ділильником перетворювача класу А.

При цьому забезпечується тільки режим роботи із споживанням електричної енергії з мережі.

Ділильник у другому квадранті називають ділильником перетворювача класу В.

При цьому забезпечується тільки режим роботи із віддачею електричної енергії у мережу.

Ділильник у першому та другому квадранті називають ділильником перетворювача класу С.

При цьому забезпечується як режим роботи із споживанням електричної енергії з мережі так і режим роботи із віддачею електричної енергії у мережу.

Ділильник у першому та четвертому квадранті називають ділильником перетворювача класу D.

При цьому забезпечується не тільки режим роботи із споживанням електричної енергії з мережі але й реверсування електричної схеми електроприводу.

Відповідні структури мають свою реалізацію стосовно до режимів роботи.

Сучасні чоперні схеми можна використовувати для реалізації подібних структур.

При цьому виходячи з потреб електричного приводу можна забезпечити усі режими його функціонування.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для такої реалізації на базі схеми перетворювача використовують комбінацію простих структур відповідно до потреби у забезпечені енергетичних режимів відповідно до класу.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

## 1.2. Робота двохквADRANTНОГО перетворювача

Розглянемо для початку принцип дії двоквADRANTНОГО перетворювального пристрою.

Рис. 1.1 Перетворювач типу С

Представимо область роботи перетворювача.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Рис. 1.2 Область роботи перетворювача

Необхідним є попередження одночасного ввімкнення ключових елементів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

### 1.3. Робота чотириквADRANTного перетворювача

Розглянемо роботу Н-подібного перетворювального пристрою на базі ключових елементів.

Рис. 1.3 Н-міст

Розглянемо режими роботи та функціонування елементів Н-подібної схеми.

Статична робота.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Рис. 1.4

Тоді у зворотному режимі.

Рис. 1.5

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Рис. 1.6

На базі розглянутих режимів реалізуємо роботу електроприводу постійного струму.

Структура електроприводу буде містити перетворювач що забезпечує роботу електроприводу у чотирьох квадрантах.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Рис. 1.7 Схема приводу постійного струму

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16



#### 1.4. ЧотириквADRантні перетворювачі у структурах тягових електроприводів

Реалізовані на базі чотирьохквADRантного перетворювача схеми промислового електроприводу будуть мати подібні до приведених на рисунках структури.

Рис. 1.8 Силове коло вагону метрополітену на IGBT транзисторах

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Рис. 1.9 Робота чотириквADRANTНОГО перетворювача

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Рис. 1.10 Принципова схема автономного інвертора напруги

Рис. 1.11 Режими роботи чотириквADRантного перетворювача: *a* — контур к.з. тягової обмотки; *б* — контур віддачі енергії тягової обмотки до вхідного фільтру; *в* — контур к.з. тягової обмотки; *г* — контур віддачі енергії вхідного фільтру до тягової обмотки.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

## Розділ 2. Система керування чотириквADRантним перетворювачем

### 2.1. Синтез структури чотириквADRантного контролера

Синтез силової структури чотириквADRантного перетворювача виконується на базі схем заміщення.

Схема заміщення складається для кожного з режимів його функціонування.

При синтезуванні елементів подібної структури необхідно виходити з призначення елементів.

Так слід розділяти можливості роботи при зміні параметрів постійного та змінного струму.

При останньому слід враховувати індуктивність внутрішнього контуру перетворювача.

Перемикання ключових елементів подібних структур має забезпечувати високу частоту комутації.

Перетворювачі складені за подібним принципом зазвичай комплектуються транзисторними ключами з високими частотними характеристиками.

Базова тактова частота подібного пристрою може бути дещо меншою за можливу кратність струмів у контурі відповідного плеча схеми у співвідношенні.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05			
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>				
<i>Розробив</i>	Заєць А.А.				Розділ 2	<i>Літ.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>
<i>Перевірів</i>	Сінчук О.М.						20	18
<i>Реценз.</i>					КНУ ЕЕМ-21ск			
<i>Н. Контр.</i>	Сінчук О.М.							
<i>Затвердив</i>	Пересунько І.І.							

а

б

в

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Г

Рис. 2.1 Основна схема однофазного інвертора із симетрично розділеною вхідною напругою (а), альтернативне зображення тієї ж функції (б) та реалізація схеми (в); Хід вихідної напруги  $u_2$  і керуюча функція перемикача S згідно (а) і (б) і силових транзисторів T1 і T2 (г).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

а

б

в

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Г

Д

Рис. 2.2: Топологія чотириквADRантного контролера (а) та хід вихідної напруги та вихідного струму для пасивного омично-індуктивного навантаження (б). Переміщення системи на рівні вихідної напруги-вихідного струму (в), тимчасова крива вхідного струму (г) і рух системи на рівні вхідного струму-вхідної напруги (д).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24



а

б

в

Рис. 2.3: Розгляд мостової гілки чотириквADRANTного контролера за рис. 2.2 (а).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2.2. Визначення частоти тактування чотириквadrантного контролера

Представимо вирази для розрахунку тактової частоти перетворювального пристрою.

$$\hat{U}_{2,(n)} = \frac{2}{T_2} \int_t^{t+T_2} u_2(t) \sin(n\omega_2 t) dt = \frac{4}{T_2} \int_0^{\frac{T_2}{2}} U_1 \sin(n\omega_2 t) dt = \frac{4}{\pi} U_1 \frac{1}{n} \quad n = 1, 3, 5, 7, \dots ,$$

$$\hat{U}_{2,(1)} = \frac{4}{\pi} U_1 \approx 1,27 U_1 \quad ,$$

$$u_2 = u_{2,(1)} + u_{2,n} .$$

Наведемо діаграми роботи пристрою.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Рис. 2.4: Тактування базової частоти чотириквADRANTНОГО контролера.

Тоді для струмів запишемо:

$$i_2 = i_{2,(1)} + i_{2,n} \cdot$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

а

б

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

В

Г

2.5: Еквівалентна схема (а) навантаження, утвореної чисто синусоїдною внутрішньою напругою навантаження  $u$  та індуктивністю витоку або індуктивністю згладжування  $L$ .

Струм буде записано:

$$i_{2,n} = \frac{1}{L} \int_t u_{2,n} dt + i_{2,n,0}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наведемо діаграми роботи пристрою.

Рис.2.6: Зміна основної  $u_{2,(1)}$  вихідної напруги чотириквADRANTНОГО контролера при тактуванні основної частоти через перекриття гілок моста; для  $\alpha = 0$  є співвідношення, показані на рис. 2.4.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

### 2.3. Управління чотириквADRантним контролером

Розглянемо схему управління чотириквADRантного перетворювального пристрою.

Відповідно до схеми керування керуючі впливи буде спрямовано відповідно до інтегральної складової виразу напруги що були розраховані раніше.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рис. 2.7: Послідовне з'єднання двох чотириквADRANTНИХ контролерів для генерації напруги навантаження  $u_2$  зі ступінчастою кривою.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Виразимо значення напруги:

$$\bar{u}_2 = \frac{1}{T_P} \int_0^{T_P} u_2 dt$$

$$\alpha = \frac{1+m(t)}{2}.$$

$$\bar{u}_2 = \frac{2}{T_P} \left( \alpha \frac{T_P}{2} U_1 - (1-\alpha) \frac{T_P}{2} U_1 \right) = (2\alpha - 1) U_1.$$

$$\bar{u}_2 = m(t) U_1,$$

$$u_{2,(1)} = \hat{U}_{2,(1)} \sin(\omega_2 t + \delta)$$

$$\bar{u}_2 = u_{2,(1)}$$

$$m(t) = \frac{\bar{u}_2}{U_1} = \frac{\hat{U}_{2,(1)}}{U_1} \sin(\omega_2 t + \delta)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{\hat{U}_{2,(1)}}{2U_1} \sin(\omega_2 t + \delta),$$

$$M = \frac{\hat{U}_{2,(1)}}{U_1};$$

$$m(t) = M \sin(\omega_2 t + \delta).$$

Представимо діаграми чергування імпульсів керування та відповідні до них режими.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

а

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

б

Рис. 2.8: Виведення керуючих сигналів  $s_{ij}$  силових транзисторів  $T_{ij,ij} = 11,12,21,22$ , чотириквadrантного контролера з перетину сигналу несучої частоти  $\omega_D$  з (синусоїдальною) функцією модуляції  $m(t)$  (метод недоскоку).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином можна бачити що реалізація системи керування можлива як у біполярному так і у однополярному режимі роботи перетворювального пристрою.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
						36
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## Розділ 3. Моделювання режимів роботи перетворювачів

### 3.1. Моделювання роботи двоквадрантного перетворювача

Моделювання режимів роботи перетворювального пристрою що реалізує чотириквадрантну схему роботи системи електричного приводу будується на базі почергового компонування ключових елементів за схемами двоквадрантних перетворювачів.

Зазвичай такий перетворювач складається з ділильника класу С що працює у першому та другому квадранті.

Чаперні схеми широко представлені у програмних моделях та налічують безліч можливостей реалізації.

Зворотний струм у таких моделях забезпечується діодним елементом схеми.

Моделювання подібного пристрою виконується за розрахованими параметрами схеми заміщення відповідно до контуру що відповідає замкненому та розімкненому станам.

Буферні схеми реалізуються достатнім індуктивним опором у контурі чергування імпульсів.

Потік потужності відповідно до режиму роботи розраховується за значенням струму у контурі.

Вважається що напруга виходу на плечовому елементі може змінюватись у невеликих межах.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05			
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>				
<i>Розробив</i>		Засць А.А.			Розділ 3	<i>Літ.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>
<i>Перевірів</i>		Сінчук О.М.					38	20
<i>Реценз.</i>					КНУ ЕЕМ-21ск			
<i>Н. Контр.</i>		Сінчук О.М.						
<i>Затвердив</i>		Пересунько І.І.						

Рис. 3.1 Модель двоквadrантного чопера з використанням simulink.

Представимо результати моделювання.

Рис. 3.2 Результати моделювання

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Можна бачити що реалізація подібної системи відповідає змодельованим графікам.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

### 3.2. Моделювання роботи чотириквADRANTного перетворювача

Розглянемо схему Н-подібного перетворювача.

Рис. 3.3: Принципова схема Н-мосту, побудованого на транзисторі для управління швидкістю та обертанням двигуна постійного струму.

Робота чотирьохквADRANTного перетворювача відрізняється від роботи двохквADRANTного.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 3.4: Графік, що показує широтно-імпульсну модуляцію для керування швидкістю двигуна постійного струму.

Ширина модуляція імпульсів буде дорівнювати:

$$V_{dc} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \cdot V_s \Rightarrow V_{dc} = \delta \cdot V_s,$$

де  $\delta$  – робочий цикл.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Рис. 3.5 MATLAB модель керування швидкістю двигуна постійного струму за допомогою H-мосту

Рис. 3.6 Біполярний транзистор (BJT)

Наведемо результати моделювання.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рис. 3.7 Результати моделювання

Рис. 3.8 Результати моделювання

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рис. 3.9 Результати моделювання

Рис. 3.10 Результати моделювання

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рис. 3.11 Результати моделювання

Представимо схему електроприводу що реалізовує подібні режими роботи перетворювача.

Рис. 3.12 Схема електроприводу

Наведемо результати моделювання.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Рис. 3.13 Результати моделювання

Рис. 3.14 Результати моделювання

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3.3. Реалізація законів керування чотириквADRантним перетворювачем

Розглянемо модель чотирьохквADRантного перетворювача у програмному пакеті.

Рис. 3.15 Simulink модель запропонованої моделі.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рис. 3.16 Підсхема реверсивного FWD (ліворуч) і реверсивного FWD (праворуч).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48



Рис. 3.17 Логіка запуску.

Наведемо результати моделювання.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
						49
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Рис. 3.18 Результати моделювання напруги якоря, напруги генерації та швидкості

Рис. 3.19 Результати моделювання напруги якоря, напруги генерації та швидкості

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рис. 3.20 Результати моделювання напруги якоря, напруги генерації та швидкості

Рис. 3.21 Результати моделювання швидкості

Рис. 3.22 Порівняння періоду гальмування для різних коефіцієнтів навантаження – 50%, 75% і 90% (зліва направо).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Рис. 3.23 Рекуперативна потужність при різних робочих циклах.

Рис. 3.24 Ефект гальмування для різних моментів навантаження (приблизно нульовий момент, 1 Нм і 10 Нм).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Рис. 3.25 Результати моделювання

Рис. 3.26 Результати моделювання

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Рис. 3.27 Результати моделювання

Рис. 3.28 Використаний цикл роботи приводу

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Рис. 3.29 Результати моделювання

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

### 3.4. Спосіб реалізації системи електроприводу на базі чотириквADRANTНОГО перетворювача

Представимо структуру чотириквADRANTНОГО перетворювача який здійснює регулювання електроприводу з синхронним двигуном з постійними магнітами.

Рис. 3.30 Структурна схема електроприводу на основі СДПМ

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56



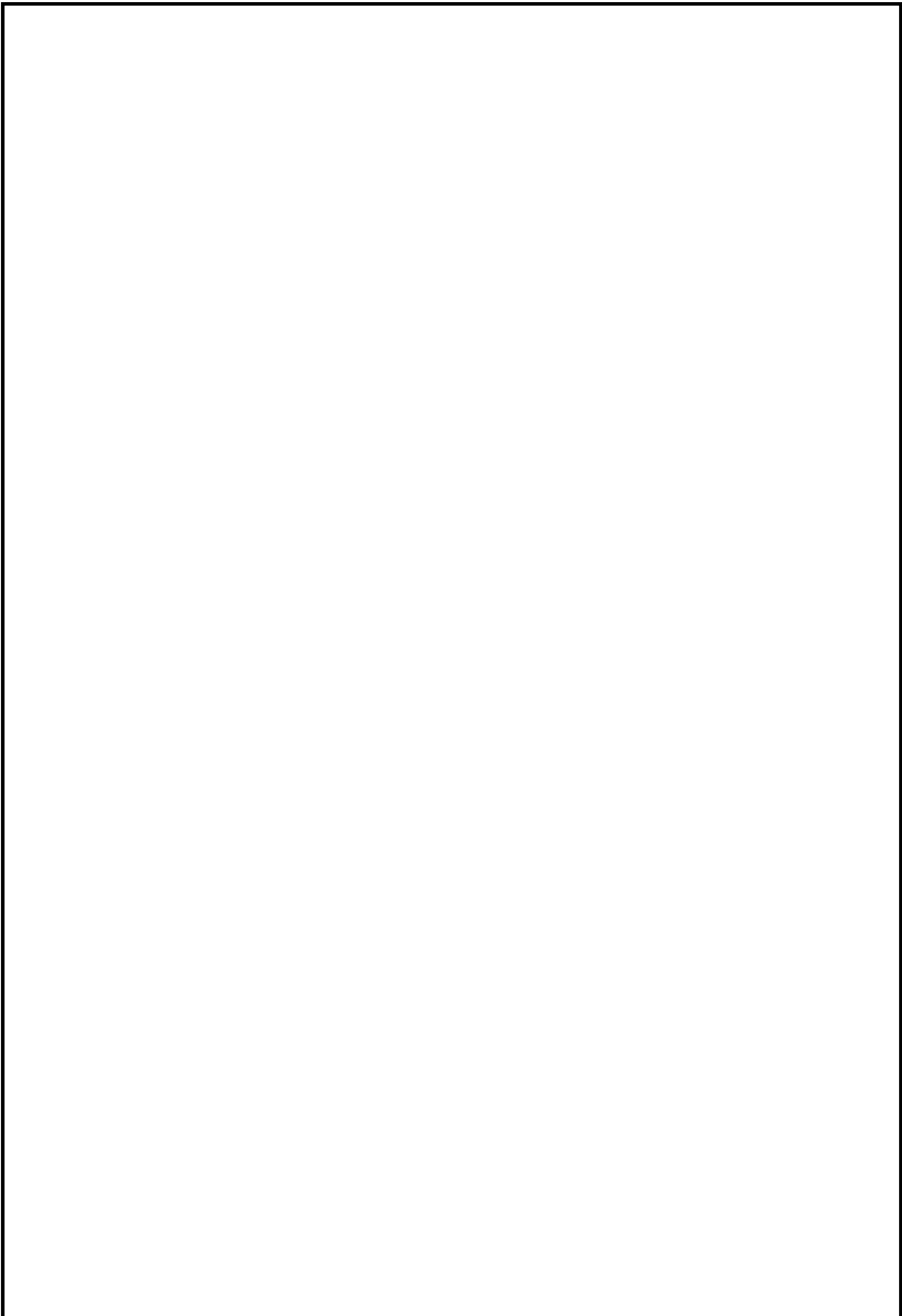
## Висновки

У першому розділі проаналізовано електричні схеми перетворювачів електричної енергії в структурах тягового електроприводу, виділено такі моменти при роботі, які впливають на вибір структури перетворювача, показано основні напрями підвищення енергетичної ефективності таких схем за рахунок використання перетворювачів нового типу.

У другому розділі була розроблена математична модель перетворювача електричної енергії в структурах тягового електроприводу та проведено дослідження електромагнітних процесів в електричних колах перетворювача.

У третьому розділі було проведено вибір комп'ютерної моделі для дослідження роботи перетворювача електричної енергії в структурах тягового електроприводу, обрана й обґрунтована його структура, проведено аналіз електромагнітних процесів при роботі тягового електроприводу в режимі реверсу.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-05	
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		