

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: «Аналіз та дослідження методів зниження пульсацій крутного моменту у системі векторного керування вентильно-реактивним двигуном»

*КНУ.МР.141.24.776-03*

Виконав студент II курсу, групи ЕПА-23м /Дмитро КОЗАКОВ/

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

(шифр і назва спеціальності, освітньо-професійної програми)

Керівник:

к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ /Юрій ОСАДЧУК/

Нормоконтролер:

к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ /Юрій ОСАДЧУК/

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**

КОЗАКОВ Дмитро Євгенович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Аналіз та дослідження методів зниження пульсацій крутного моменту у системі векторного керування вентильно-реактивним двигуном

1. Термін подання студентом роботи: 09 грудня 2024 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є аналіз та дослідження методів зниження пульсацій крутного моменту у системі векторного керування вентильно-реактивним двигуном
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Загальні відомості про систему електроприводу на базі вентильного реактивного двигуна та багаторівневого перетворювача; II. Розробка системи керування електроприводом на базі вентильно-реактивного двигуна та багаторівневого перетворювача; III. Моделювання системи електроприводу на базі вентильно-реактивного двигуна та багаторівневого перетворювача.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Результати моделювання для традиційної схеми; II. Трирівневий перетворювач T-типу; III. Структурна схема системи управління з прямим керуванням моментом; IV. Таблиця спостереження за потоком; V. Таблиця спостереження за крутним моментом; VI. Параметри розробленої системи керування.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Осадчук Ю.Г.		
II	Осадчук Ю.Г.		
III	Осадчук Ю.Г.		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Схема електроприводу з вентильним реактивним двигуном	10.09.24
2	Система керування багаторівневим перетворювачем	12.10.24
3	Аналіз пульсації крутного моменту	19.10.24
4	Розробка структури системи керування	24.10.24
5	Розробка алгоритмів роботи системи керування	28.11.24
6	Розрахунок параметрів та налаштування	30.11.24
7	Вибір обладнання	04.12.24
8	Результати моделювання	07.12.24

Дата видання завдання 02.09.2024 р.

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

Козаков Д.Є.  
(ПІБ)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Осадчук Ю.Г.  
(ПІБ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра на тему «Аналіз та дослідження методів зниження пульсацій крутного моменту у системі векторного керування вентильно-реактивним двигуном»

***КНУ.МР.141.24.776-04***

45 с., 10 рис., 4 табл.,  
15 літературних джерел.

Об'єкт дослідження – система векторного керування вентильно-реактивним двигуном.

У роботі було розглянуто методи зниження пульсацій крутного моменту у системі векторного керування вентильно-реактивним двигуном. Зазначено причини виникнення пульсацій крутного моменту у системі електроприводу вентильно-реактивним двигуном та багаторівневим перетворювачем.

Також було проаналізовано ефективність методів зниження пульсацій крутного моменту у системі векторного керування вентильно-реактивним двигуном у структурі з багаторівневим перетворювачем.

Зазначено що звичайні шестимодульовані вектори напруги є причиною підвищення рівню пульсацій крутного моменту у системі векторного керування вентильно-реактивним двигуном у структурі з багаторівневим перетворювачем. Тому ефективним є перехід від звичайної на дванадцятимодульовану структуру.

**ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНИЙ ДВИГУН,  
БАГАТОРІВНЕВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ПУЛЬСАЦІЇ КРУТНОГО  
МОМЕНТУ, ЕФЕКТИВНІСТЬ**

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СИСТЕМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НА БАЗІ ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГУНА ТА БАГАТОРІВНЕВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА .....	12
1.1. Схема електроприводу з вентильним реактивним двигуном та система прямого керування моментом.....	12
1.2. Система керування багаторівневим перетворювачем.....	15
1.3. Аналіз пульсації крутного моменту у системах електроприводу з вентильно-реактивним двигуном та багаторівневим перетворювачем .....	17
2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НА БАЗІ ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГУНА ТА БАГАТОРІВНЕВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА .....	20
2.1. Розробка структури системи керування та стратегія управління електроприводом на базі вентильно-реактивного двигуна та багаторівневого перетворювача .....	20
2.2. Розробка алгоритмів роботи системи керування електроприводом на базі вентильно-реактивного двигуна та багаторівневого перетворювача ...	22
2.3. Розрахунок параметрів та налаштування роботи системи керування електроприводом на базі вентильно-реактивного двигуна та багаторівневого перетворювача .....	26
3. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НА БАЗІ ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГУНА ТА БАГАТОРІВНЕВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА .....	29
3.1. Вибір обладнання та розрахунок параметрів імітаційної моделі системи електроприводу на базі вентильно-реактивного двигуна та багаторівневого перетворювача .....	29
3.2. Результати моделювання системи електроприводу на базі вентильно- реактивного двигуна та багаторівневого перетворювача .....	30
ВИСНОВКИ.....	35
ЛІТЕРАТУРА .....	36
ДОДАТОК А.....	38

	6
ДОДАТОК Б .....	39
ДОДАТОК В .....	40
ДОДАТОК Г .....	41
ДОДАТОК Д .....	42
ДОДАТОК Е .....	43
ДОДАТОК Ж .....	44
ДОДАТОК З .....	45

## ВСТУП

Вентильні реактивні двигуни зайняли своє місце у переліку тих що використовується для потреб сучасних систем електроприводу завдяки своїй перевантажувальній здатності та можливостям підтримувати ефективну щільність електромагнітного моменту двигуна.

Вони широко використовуються у промисловості, авіаційному, залізничному та автомобільному електричному транспорті.

Але наявність явнополюсної конструкції ротору електричної машини спричиняє суттєве спотворення індуктивного опору обмоток.

Тому нелінійність індуктивного опору вентильно-реактивної електричної машини спричиняє суттєвих ускладнення при керуванні.

Для ефективного керування подібними системами електроприводу змінного струму необхідна можливість регулювання напруги живлення на обмотці статора електричної машини.

Для здійснення такого регулювання застосовують перетворювачі параметрів електричної енергії.

Такі системи представлені безліччю варіантів щодо їх структури та параметрів.

Саме тому з їх допомогою можна здійснювати регулювання режимами роботи майже будь якою промисловою установкою.

Для потреб відповідальних технологічних установок, які мають забезпечувати високі показники ефективності використання обладнання необхідним є застосування спеціальних типів перетворювачів.

Так у структурах, для яких важливою є точність та швидкість відпрацьовування сигналів завдання доволі ефективно використовуються матричні перетворювачі.

Завдяки використуванню матричних перетворювачів у системах електричного приводу можливим стає здійснення прямого керування моментом електричної машини.

При цьому керування здійснюється у векторній формі, а для отримання вектору моменту електричної машини застосовується комбінація векторів напруги на обмотці статора, яка формується перетворювачем відповідно до налаштування системи керування.

Таке завдання можна виконати завдяки застосуванню багаторівневої структури матричного перетворювача.

Зазвичай використовуються двох або трирівневі структури матричних перетворювачів.

Завдяки цьому можна створити шість або дванадцять векторів напруги для живлення електричного двигуна.

Вектори напруги формуються у відповідності до перемикання вентилів що складають структуру матричного перетворювача.

Однак, з огляду наявності суттєвої нелінійності значень індуктивного опору обмоток вентиляно-реактивної машини при регулюванні виникають суттєві коливання електромагнітного моменту електричного двигуна.

Для зменшення пульсацій електромагнітного моменту вентиляно-реактивної машини використовують оптимізацію її конструкції.

Але при застосуванні системи регульованого електроприводу більш цікавим виглядає використання можливостей системи керування вентиляно-реактивною машиною.

Ефективним методом зменшення пульсацій електромагнітного моменту вентиляно-реактивної машини є застосування можливості використання переходу на асиметричну топологію структури матричного перетворювача.



Трирівнева топологія структури матричного перетворювача дозволяє формувати дванадцять векторів вихідної напруги.

Для орієнтації структури векторів створюють та контролюють вектор нульової послідовності.

Завдяки цьому формується тривалість прикладення кожного з дванадцяти відповідних векторів.

Принцип формування вектору прикладеної до обмотки двигуна напруги засновано на використанні дванадцятисекторальної площі формування траєкторії.

У відповідному полі також формується площа вектору потокозчеплення.

При накладанні отриманого вектору потокозчеплення на площину векторів прикладеної напруги формується завдання у відповідності з геометричним положенням двох векторів.

Таким чином здійснюється формування вектору моменту електричного двигуна.

Таким чином, використання дванадцятисекторального розподілу площини векторів прикладеної напруги дозволяє зменшити похибку між положенням векторів потокозчеплення та прикладеної напруги, що у свою чергу дозволяє знизити пульсації електромагнітного моменту вентильно-реактивного двигуна.

Слід зазначити що при асиметрії обмоток статора необхідно допрацьовувати метод прямого керування моментом вентильно-реактивного двигуна.

Існує стратегія управління, що заснована на виділенні постійної складової моменту вентильно-реактивного двигуна.

Система керування при цьому складається з каналу попередньої обробки сигналів та каналу обчислення отриманої інформації.

Розподіл системи керування на дві складові дозволяє розраховувати прогнозне значення положення вектору електромагнітного моменту.

Завдяки розподілу площини прикладеної напруги на додаткові шість секторів забезпечується зниження пульсацій при формуванні вектору електромагнітного моменту у зоні комутації.

Таким чином поєднання двох розглянутих методик дозволяє створити новий підхід щодо створення вектору електромагнітного моменту вентильно-реактивного двигуна.

Таким чином для реалізації функціонування розробленої стратегії керування застосовують для визначення вектору потокозчеплення систему попередньої обробки сигналів, а розрахункову частину використовують для визначення значення та секторального положення вектору електромагнітного моменту.

Для визначення дієвості запропонованої стратегії керування електроприводом з вентильно-реактивним двигуном, що живиться від трирівневого матричного перетворювача виконують моделювання режимів роботи такої системи.

Оскільки складність розв'язку подібних задач може бути вирішена завдяки математичному моделюванню, то для здійснення такого завдання розробляється математична модель, що складається з блоку вентильно-реактивного двигуна та трирівневого матричного перетворювача, яка досліджується за допомогою використання обчислювальних прикладних програм.

Завдяки моделюванню режимів роботи можна отримати графіки перехідних процесів та визначити ефективність запропонованої стратегії

керування вентиляно-реактивним двигуном не виконуючи складних розрахунків та проведення додаткових дослідів.

# 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СИСТЕМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НА БАЗІ ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГУНА ТА БАГАТОРІВНЕВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

## 1.1. Схема електроприводу з вентильним реактивним двигуном та система прямого керування моментом

Як вже було зазначено, системи керування вентильно-реактивними двигунами є перспективними системами електроприводу, що дозволяють здійснювати ефективне керування його параметрами.

З огляду на підвищення конкуренції на ринку створення нових видів електричних машин, можна зазначити, що такі розробки здійснюються відповідно до технічних можливостей, які надає сучасна база конструктивних елементів.

Можна зазначити, що це складний процес, тому потребує достатньої уваги щодо його вирішення.

Ефективність вентильно-реактивних двигунів у процесі створення моменту є перевагою їх структури.

Щодо недоліків, тут можна віднести складність виконання та необхідність розглядати додаткові умови щодо функціонування системи керування.

Тому важливим є розрахунок параметрів вентильно-реактивних двигунів відповідно до їх конструктивних особливостей.

Розглянемо структуру вентильно-реактивної машини з позиції створення моменту.

Для створення моменту використовується взаємодія струму статорної обмотки з магнітним полем індуктора.

При цьому необхідне значення магнітного потоку створюється та контролюється завдяки налаштуванню відповідної комутації вентилів, що створюють на необхідних проміжках часу послідовність ввімкнень та вимкнень між обмоткою статора та джерелом електричної енергії.

Важливим при роботі вентиляно-реактивної машини є можливість створювати запас електричної енергії у елементах її конструкції.

Такі складні процеси необхідно контролювати під час роботи, та забезпечувати безперервність їх протікання.

У системах електроприводу з вентиляно-реактивним двигуном цей процес виконують перетворювачі ні пристрої.

Завдяки використанню перетворювачів ні пристроїв виконується керування електроприводом з вентиляно-реактивним двигуном.

Перетворювач виконує керування такою складною системою відповідно до розробленої програми функціонування.

Новітнім підходом є метод прямого керування моментом вентиляно-реактивної машини.

При цьому є важливим враховувати провідності ключів відповідно до структури перетворювача.

У таких структурах важливою складовою є значення індуктивності на кожному з рівнів перетворення параметрів електричної енергії.

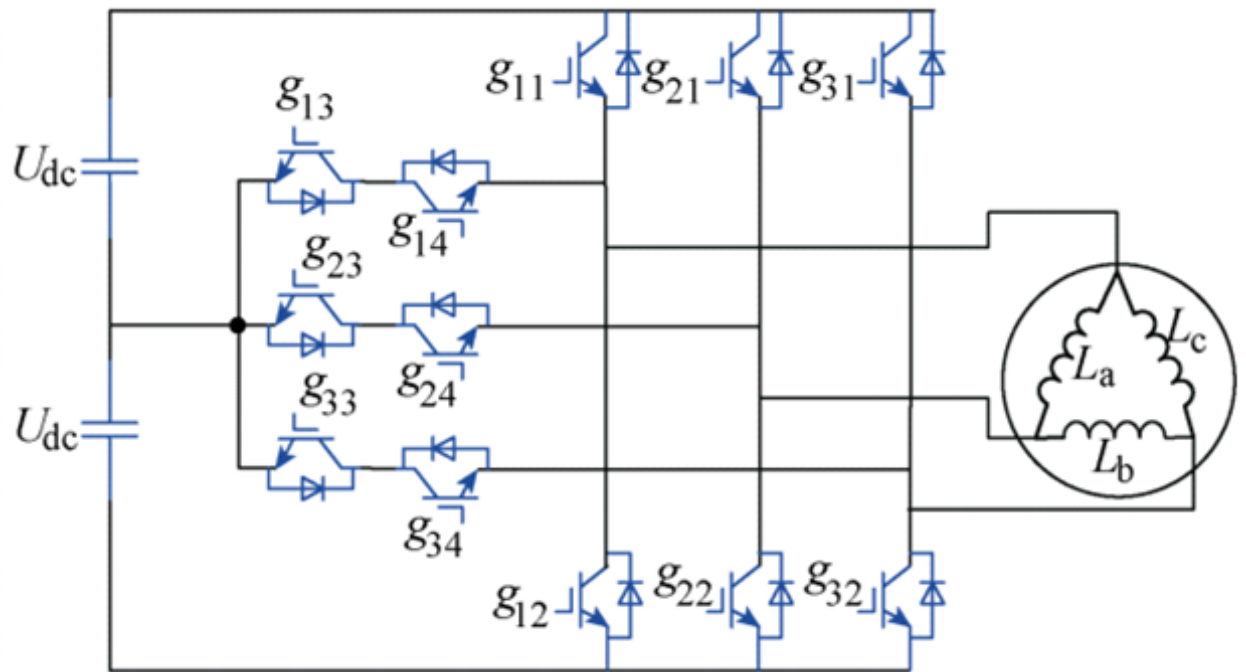


Рисунок 1.1 – Трирівневий перетворювач Т-типу

## 1.2. Система керування багаторівневим перетворювачем

Подвійний набір перемикаючих функцій у структурі перетворювача допомагає ефективно відтворювати вигляд складових вектору моменту.

При цьому для кожного сектору створюються передумови формування необхідного значення величини та її зміщення відносно іншої складової.

Такий підхід підвищує щільність векторів, що позитивно сприяє на формування узагальнюючого значення при відтворенні функції розподілу одних складових відносно інших.

Порівняння здійснюється відносно вектору напруги статорної обмотки, що спрощує обчислення.

Таким чином представлені вектори створюють результуючий вектор моменту необхідного значення й спрямованості у просторі.

Амплітуді значення векторів при цьому можуть бути зменшені удвічі, у відповідності до збільшеного числа векторів.

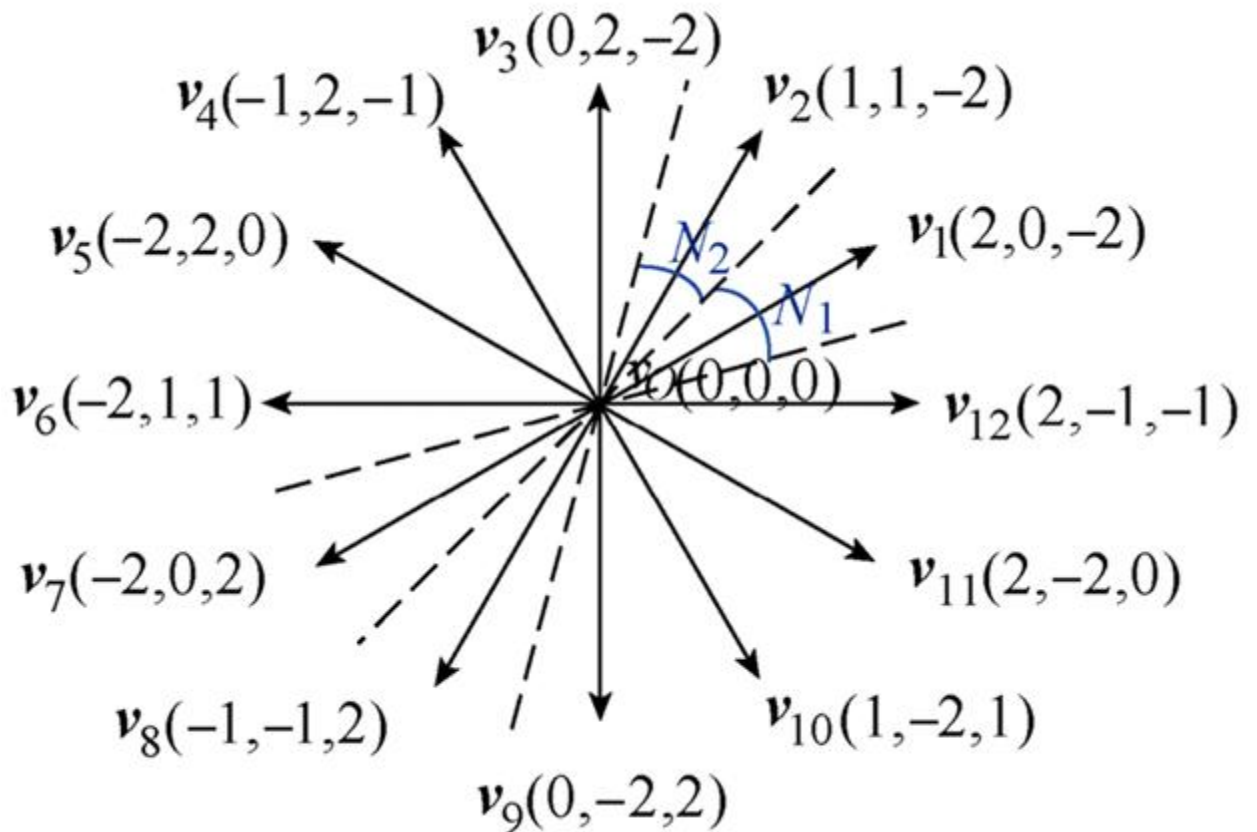


Рисунок 1.2 – Сектори вектора напруги

Таблиця 1.1. Алгоритм вибору вектора з 12 векторів напруги в секторі  $N_l$  відповідно до зміни крутного моменту та потокозчеплення

$T \uparrow \psi \uparrow$	$T \uparrow \psi \downarrow$	$T \downarrow \psi \uparrow$	$T \downarrow \psi \downarrow$
$\mathbf{v}_3$	$\mathbf{v}_5$	$\mathbf{v}_{11}$	$\mathbf{v}_9$
$\mathbf{v}_2$	$\mathbf{v}_6$	$\mathbf{v}_{12}$	$\mathbf{v}_8$



### 1.3. Аналіз пульсації крутного моменту у системах електроприводу з вентильно-реактивним двигуном та багаторівневим перетворювачем

Табличні значення відхилень при прямому регулюванні моменту у просторі подвійного відтворення результуючих функцій може бути використана для реалізації програмного керування.

На основі таблиці, що формують значення векторів у відповідні проміжки часу проводиться моделювання роботи електроприводу з вентильно-реактивним двигуном у розрахованому заздалегідь інтервалі часу.

Табличні значення формуються виходячи з кількості векторів, що одночасно перебувають у просторі, або секторі.

Збільшення щільності формування моменту вентильно-реактивної машини призводить до зменшення пульсацій цієї величини.

При цьому формування необхідних параметрів у секторі, в якому перебувають два чи більше сталих значень складових вектору, виконується за законом коливального контуру.

При цьому є важливим формування необхідних сигналів на вентилі схеми перетворювача.

Для перетворювача, що живить вентильно-реактивну машину такий підхід призводить до зменшення комутаційних провалів у секторі взаємодії між векторами.

Але для можливості відтворювати подібне керування слід також контролювати наявність запаленої енергії у структурі керуючого контуру.

Цю складову можна контролювати завдяки визначенню індуктивної складової у сигналі.

Таблиця 1.2. Вибір векторів шестимодульованого сигналу напруги багаторівневого перетворювача при формуванні постійної складової при зміні параметрів системи електроприводу

	$T\uparrow \psi\uparrow$	$T\uparrow \psi\downarrow$	$T\downarrow \psi\uparrow$	$T\downarrow \psi\downarrow$
$N_1$	$\mathbf{v}_3$	$\mathbf{v}_5$	$\mathbf{v}_{11}$	$\mathbf{v}_9$
$N_2$	$\mathbf{v}_3$	$\mathbf{v}_7$	$\mathbf{v}_1$	$\mathbf{v}_9$
$N_3$	$\mathbf{v}_5$	$\mathbf{v}_7$	$\mathbf{v}_1$	$\mathbf{v}_{11}$
$N_4$	$\mathbf{v}_5$	$\mathbf{v}_9$	$\mathbf{v}_3$	$\mathbf{v}_{11}$
$N_5$	$\mathbf{v}_7$	$\mathbf{v}_9$	$\mathbf{v}_3$	$\mathbf{v}_1$
$N_6$	$\mathbf{v}_7$	$\mathbf{v}_{11}$	$\mathbf{v}_5$	$\mathbf{v}_1$
$N_7$	$\mathbf{v}_9$	$\mathbf{v}_{11}$	$\mathbf{v}_5$	$\mathbf{v}_3$
$N_8$	$\mathbf{v}_9$	$\mathbf{v}_1$	$\mathbf{v}_7$	$\mathbf{v}_3$
$N_9$	$\mathbf{v}_{11}$	$\mathbf{v}_1$	$\mathbf{v}_7$	$\mathbf{v}_5$
$N_{10}$	$\mathbf{v}_{11}$	$\mathbf{v}_3$	$\mathbf{v}_9$	$\mathbf{v}_5$
$N_{11}$	$\mathbf{v}_1$	$\mathbf{v}_3$	$\mathbf{v}_9$	$\mathbf{v}_7$
$N_{12}$	$\mathbf{v}_1$	$\mathbf{v}_5$	$\mathbf{v}_{11}$	$\mathbf{v}_7$

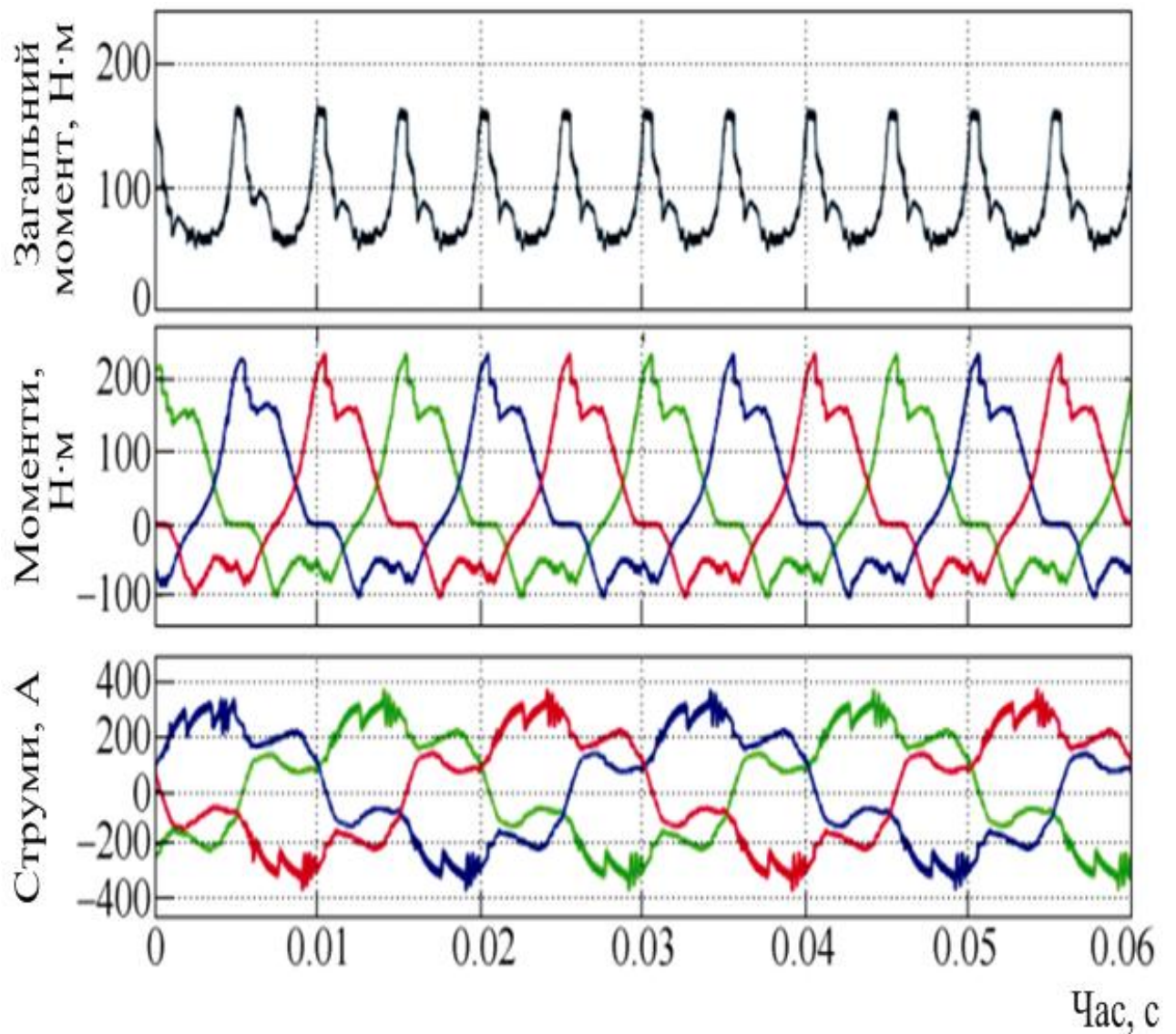


Рисунок 1.3 – Результати моделювання шести непарних векторів нижнього індексу, заснованих на традиційній теорії виділення постійної складової при 500 об / хв

## 2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НА БАЗІ ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГУНА ТА БАГАТОРІВНЕВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

2.1. Розробка структури системи керування та стратегія управління електроприводом на базі вентильно-реактивного двигуна та багаторівневого перетворювача

Важливим для функціонування системи регулювання вентильно-реактивної машини є можливість зменшувати пульсації двигуна при роботі.

Цей процес слід забезпечувати надійним механізмом запобігання зниження значення моменту при регулюванні.

Це можна відтворити за допомогою впровадження системи визначення та контролю значеннями кута комутації вентилів.

Після визначення кута комутації перетворювача можна формувати необхідні значення векторів по секторам у просторі вектору моменту.

Ефективні значення векторів при цьому перевіряються завдяки їх порівнянню з програмними значеннями.

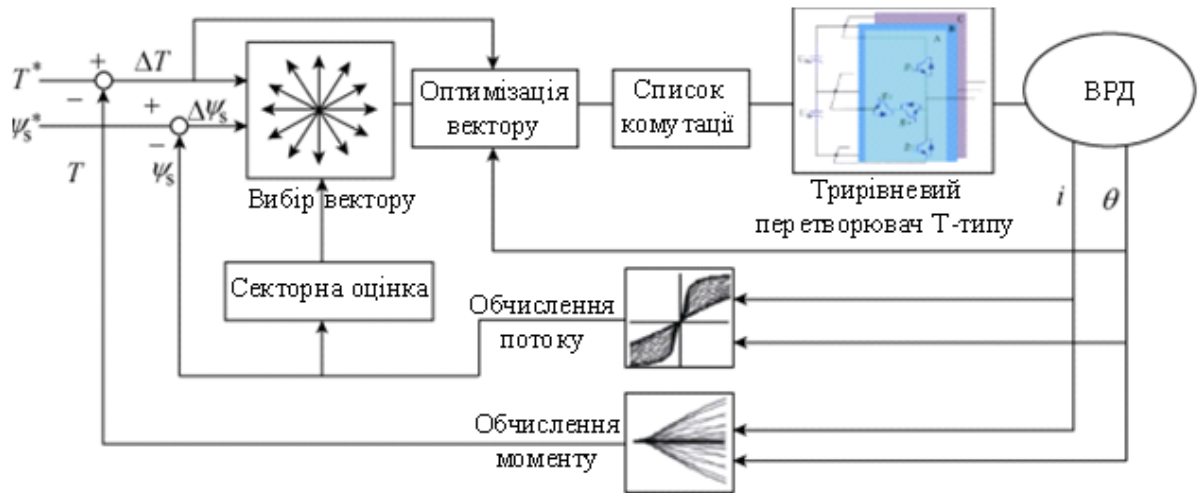


Рисунок 2.1 – Структурна схема інформації про систему приводу з прямим керуванням моменту.

## 2.2. Розробка алгоритмів роботи системи керування електроприводом на базі вентильно-реактивного двигуна та багаторівневого перетворювача

Для прямого керування моментом вентильно-реактивної машини важливим є точність визначення показника магнітного потоку.

При розрахунку потокозчеплення використовуються проекції векторів струму та напруги на площину вектору моменту.

При цьому система керування попередньо розраховує очікувані значення складових векторів напруги та струму у довільній послідовності.

На відміну від зазначеного раніше розподілу, при застосуванні такого підходу, формується подвійна структура складових векторів напруги та струму у вибіркового полі для значень моменту.

При належному виборі моментів комутації така стратегія забезпечить можливість відсутності пульсацій моменту у його формі при роботі.

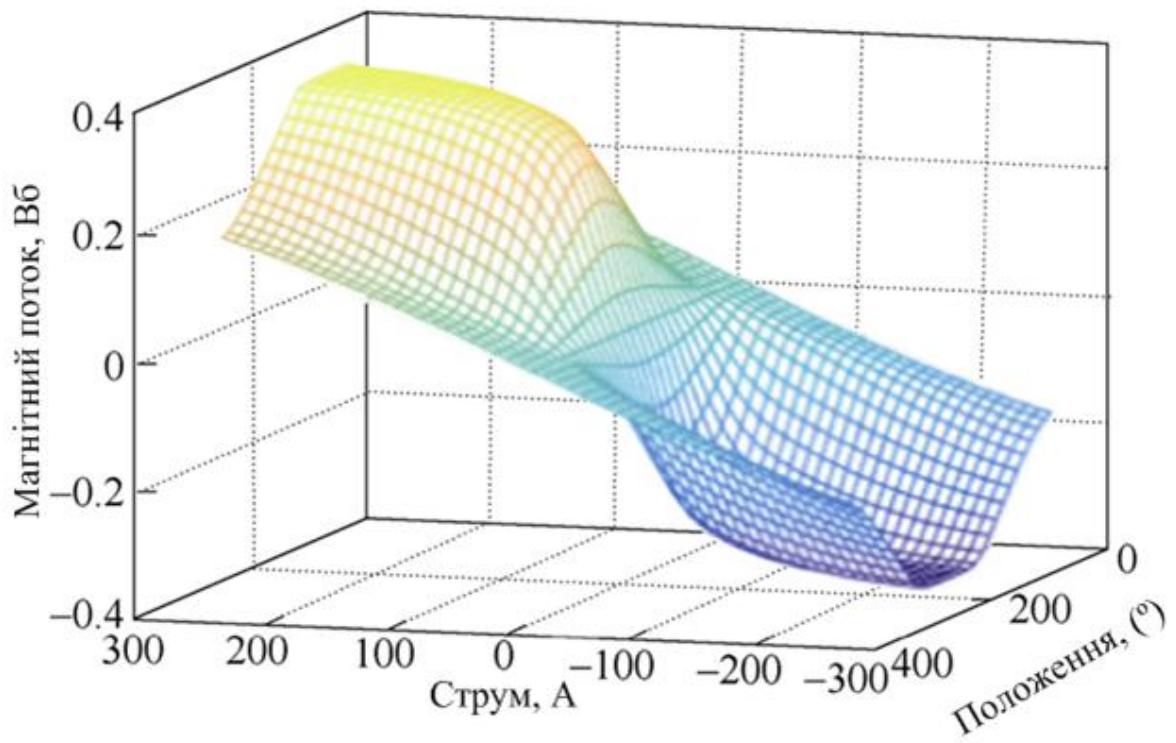


Рисунок 2.2 – Таблиця спостереження за потоком

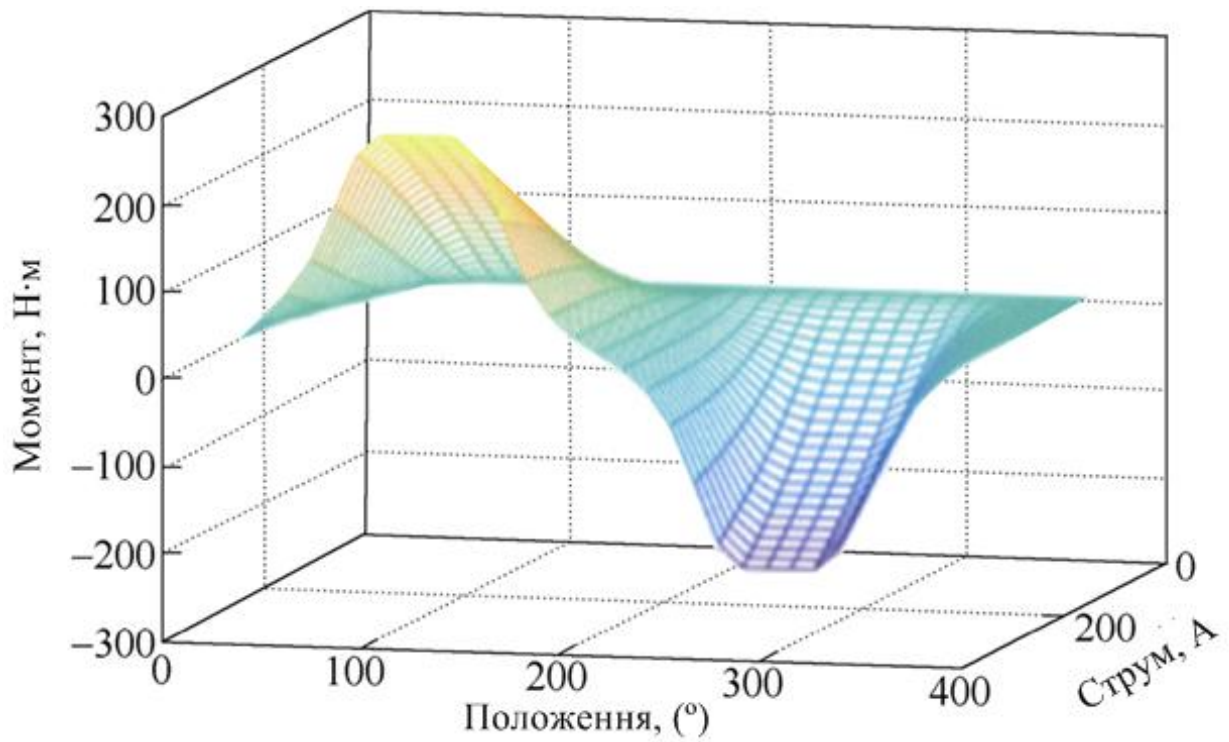


Рисунок 2.3 – Таблиця спостереження за крутним моментом

Розрахуємо вектор потокозчеплення:

$$\begin{cases} \psi_{\alpha} = \frac{2}{3}(\psi_a - \psi_b \cos 60^{\circ} - \psi_c \cos 60^{\circ}) \\ \psi_{\beta} = \frac{2}{3}(\psi_a - \psi_b \sin 60^{\circ} - \psi_c \sin 60^{\circ}) \end{cases}$$

де,  $\psi_a$ ,  $\psi_b$  та  $\psi_c$  – значення потокозчеплення.



Тоді амплітудні значення:

$$\begin{cases} |\psi_s| = \sqrt{\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2} \\ \gamma = \arctan\left(\frac{\psi_\beta}{\psi_\alpha}\right) \end{cases}$$

де  $\psi_s$  - амплітуда,

$\gamma$  - кут.

### 2.3. Розрахунок параметрів та налаштування роботи системи керування електроприводом на базі вентиляно-реактивного двигуна та багаторівневого перетворювача

Розрахункова система складатиме алгоритм послідовностей ввімкнені, а також забезпечить необхідну вибірку значень по складовим процесу формування необхідних значень.

Розподіл таких розрахунків по зонах у площі вектору моменту дозволяє отримати необхідні зсуви для розв'язку рівнянь щодо визначення наступних значень складових вектору моменту.

Такі складові вектору моменту вентиляно-реактивної машини зручно розраховувати при їх поділі на постійні та змінні функції у часі.

Таблиця 2.1. Вибір вектора з 12 векторів на основі запропонованого способу прямого керування моментом з врахуванням зміни крутного моменту та потокозчеплення

	$T\uparrow \psi\uparrow$	$T\uparrow \psi\downarrow$	$T\downarrow \psi\uparrow$	$T\downarrow \psi\downarrow$
$N_1$	$\mathbf{v}_3$	$\mathbf{v}_5$	$\mathbf{v}_{11}$	$\mathbf{v}_9$
$N_2$	$\mathbf{v}_4$	$\mathbf{v}_6$	$\mathbf{v}_{12}$	$\mathbf{v}_{10}$
$N_3$	$\mathbf{v}_5$	$\mathbf{v}_7$	$\mathbf{v}_1$	$\mathbf{v}_{11}$
$N_4$	$\mathbf{v}_6$	$\mathbf{v}_8$	$\mathbf{v}_2$	$\mathbf{v}_{12}$
$N_5$	$\mathbf{v}_7$	$\mathbf{v}_9$	$\mathbf{v}_3$	$\mathbf{v}_1$
$N_6$	$\mathbf{v}_8$	$\mathbf{v}_{10}$	$\mathbf{v}_4$	$\mathbf{v}_2$
$N_7$	$\mathbf{v}_9$	$\mathbf{v}_{11}$	$\mathbf{v}_5$	$\mathbf{v}_3$
$N_8$	$\mathbf{v}_{10}$	$\mathbf{v}_{12}$	$\mathbf{v}_6$	$\mathbf{v}_4$
$N_9$	$\mathbf{v}_{11}$	$\mathbf{v}_1$	$\mathbf{v}_7$	$\mathbf{v}_5$
$N_{10}$	$\mathbf{v}_{12}$	$\mathbf{v}_2$	$\mathbf{v}_8$	$\mathbf{v}_6$
$N_{11}$	$\mathbf{v}_1$	$\mathbf{v}_3$	$\mathbf{v}_9$	$\mathbf{v}_7$
$N_{12}$	$\mathbf{v}_2$	$\mathbf{v}_4$	$\mathbf{v}_{10}$	$\mathbf{v}_8$

Розрахуємо часові значення:

$$t_b = \begin{cases} 0,6T_s & \Delta T > 20, \quad \Delta T < -20 \\ (0,3/20\Delta T + 0,3)T_s & 20 \geq \Delta T > 0 \\ (-0,3/20\Delta T + 0,3)T_s & -20 < \Delta T \leq 0 \end{cases}$$

$$t_0 = T_s - t_b, \quad \Delta T = T_{ref} - T$$

де  $T_s$  – період,

$T$  – миттєве значення,

$T_{ref}$  – еталонне значення.

### 3. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НА БАЗІ ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГУНА ТА БАГАТОРІВНЕВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

3.1. Вибір обладнання та розрахунок параметрів імітаційної моделі системи електроприводу на базі вентильно-реактивного двигуна та багаторівневого перетворювача

При розгляді моделі визначення складових векторів потокозчеплення та струму можна скористатись програмними методами розрахунків.

Завдяки використуванню програмних алгоритмів можна суттєво впливати на швидкість визначення необхідних складових щодо формування вектору моменту вентильно-реактивного двигуна.

Таблиця 3.1. Параметри розробленої системи керування.

Параметри	Значення
Кількість фаз	3
Номінальна потужність / кВт	25
Пікова потужність / кВт	60
Номінальна напруга / В	336
Номінальна швидкість / (об / хв)	3000
Кількість полюсів статора / ротора	12/8

### 3.2. Результати моделювання системи електроприводу на базі вентиляно-реактивного двигуна та багаторівневого перетворювача

При використанні перетворювача для можливості регулювання параметрів електроприводу на основі вентиляно-реактивного двигуна важливим є формування необхідних значень керуючих функцій струму та потокозчеплення машини.

Таке формування у програмному середовищі може бути представлено завдяки аналітичним виразам.

Це створює додаткові можливості щодо пошуку необхідних значень за допомогою розроблення алгоритмів та програм функціонування перетворювачів цих пристроїв для потреб регулювання параметрів вентиляно-реактивної машини.

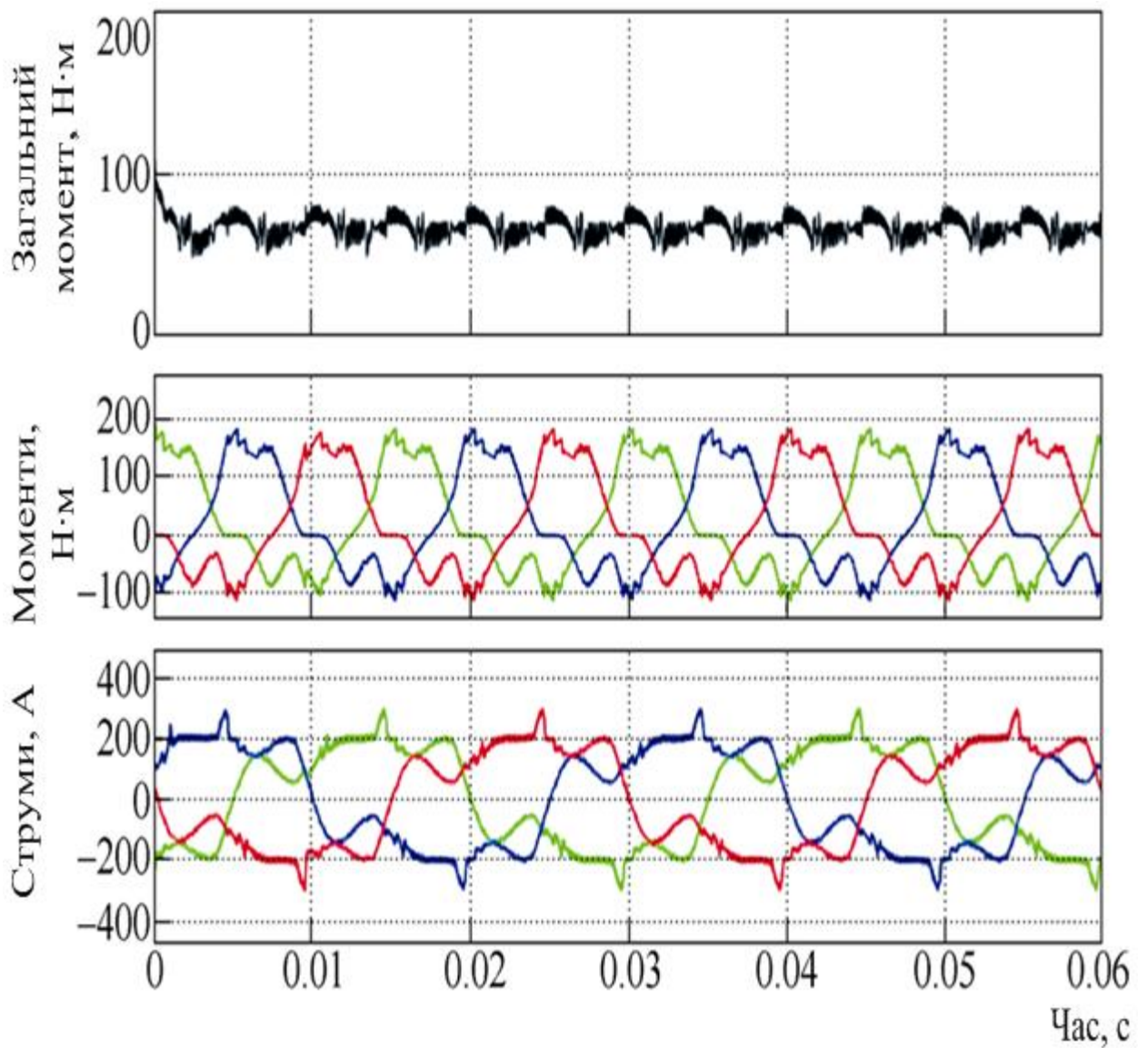


Рисунок 3.1 – Результати моделювання при використанні дванадцяти векторів на основі запропонованого методу прямого керування крутним моментом при 500 об / хв.

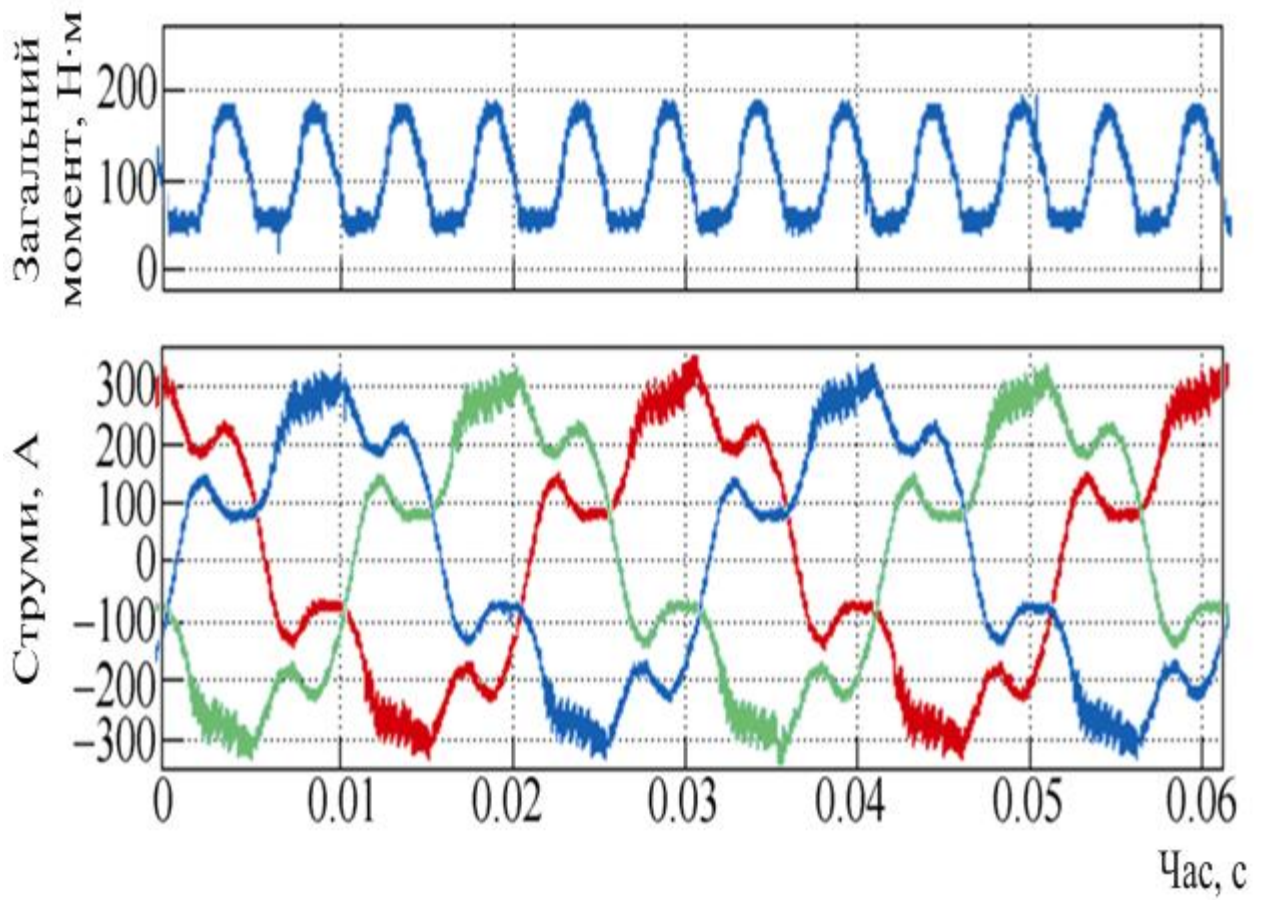


Рисунок 3.2 – Результати моделювання при використанні дванадцяти векторів на основі запропонованого методу прямого керування крутним моментом при 500 об / хв.



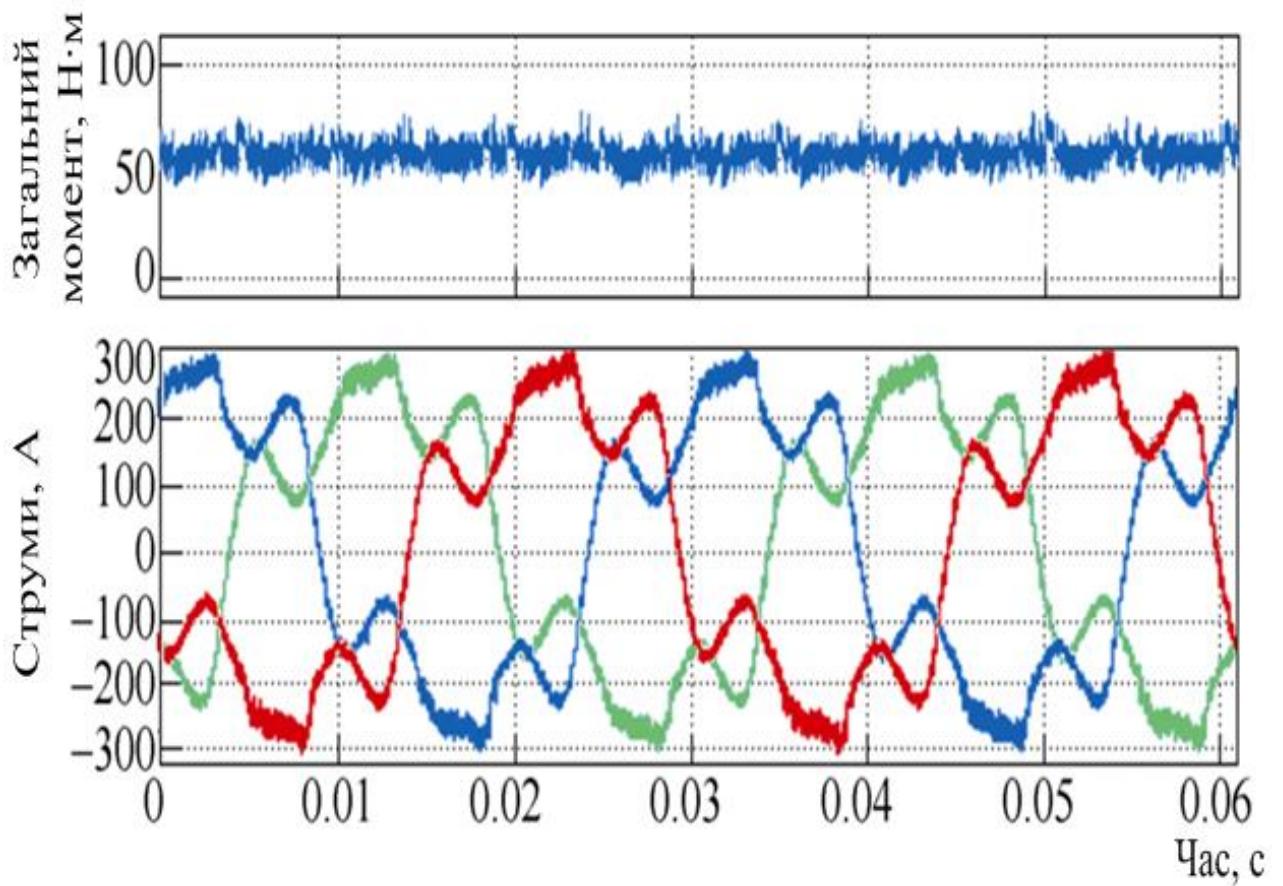


Рисунок 3.3 – Результати моделювання при використанні дванадцяти векторів на основі запропонованого методу прямого керування крутним моментом при 500 об / хв.

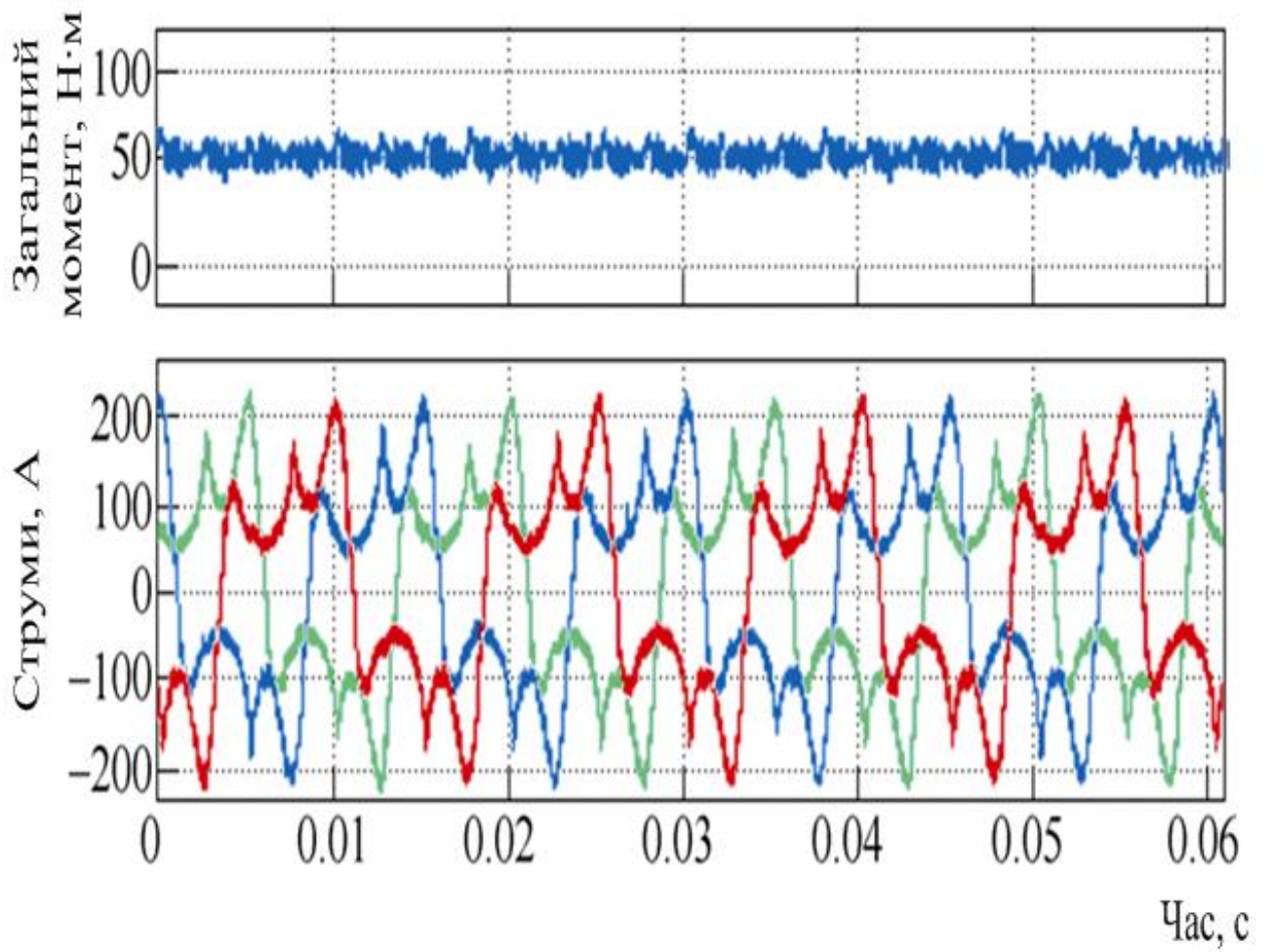


Рисунок 3.4 – Результати моделювання при використанні дванадцяти векторів на основі запропонованого методу прямого керування крутним моментом при 1000 об / хв.

## ВИСНОВКИ

У роботі було досліджена система векторного керування вентильно-реактивним двигуном.

Також розглянуто методи зниження пульсацій крутного моменту у системі векторного керування вентильно-реактивним двигуном.

Зазначено причини виникнення пульсацій крутного моменту у системі електроприводу вентильно-реактивним двигуном та багаторівневим перетворювачем.

Також було проаналізовано ефективність методів зниження пульсацій крутного моменту у системі векторного керування вентильно-реактивним двигуном у структурі з багаторівневим перетворювачем.

Зазначено що звичайні шестимодульовані вектори напруги є причиною підвищення рівню пульсацій крутного моменту у системі векторного керування вентильно-реактивним двигуном у структурі з багаторівневим перетворювачем.

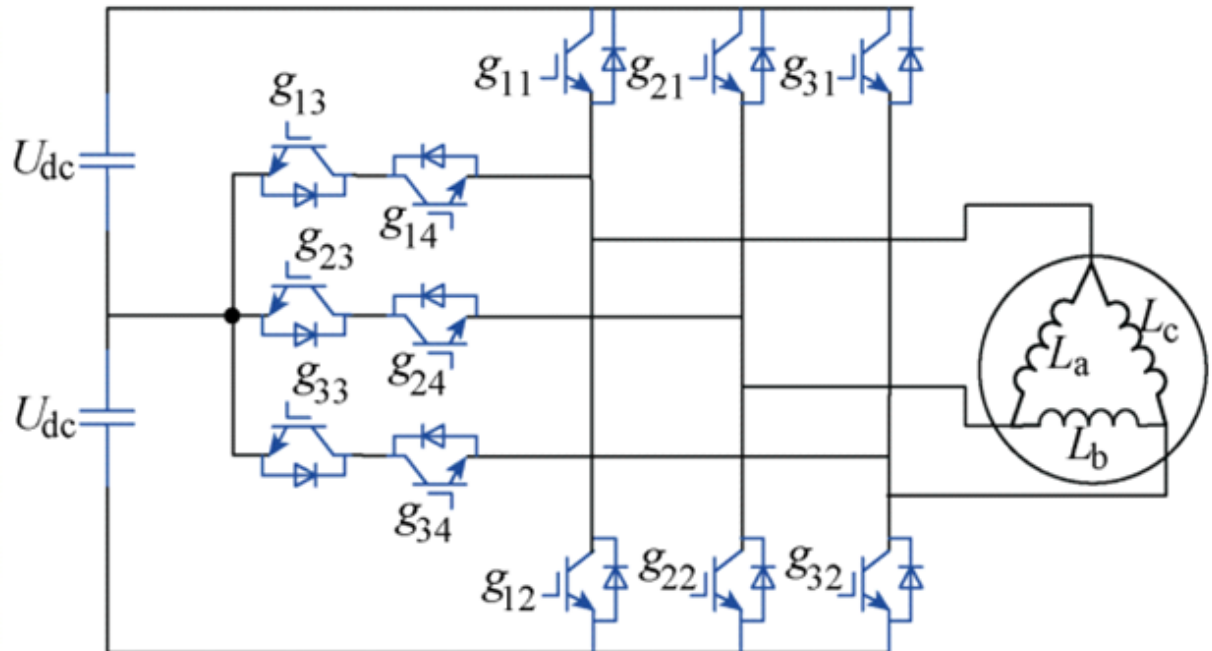
Тому ефективним є перехід від звичайної на дванадцятимодульовану структуру.

## ЛИТЕРАТУРА

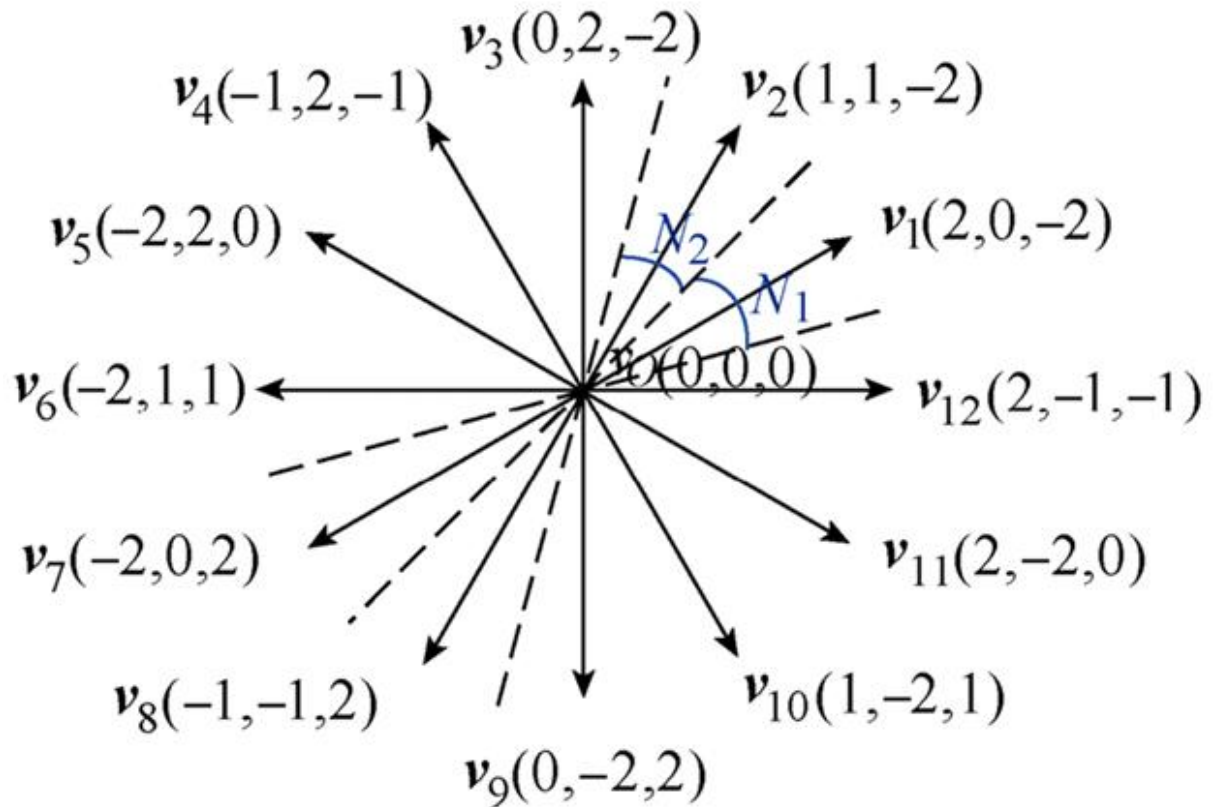
1. J S Turner. New directions in communications. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 1995, 13(1): 11-23.
2. C R Neuhaus, N H Fuengwarodsakul, R W De Doncker. Predictive PWM-based direct instantaneous torque control of switched reluctance drives. 2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, Jeju, 2006: 1-7.
3. D Xuanju, X Peng, Y Haoming, et al. Phase plane-based variable structure control for switched reluctance motor direct torque control. 2012 12th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV), Guangzhou, 2012: 775-781.
4. N Yan, X Cao, Z Deng. Direct torque control for switched reluctance motor to obtain high torque–ampere ratio. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(7): 5144-5152.
5. H Abdelghani, A B Ben Abdelghani, I Slama-Belkhodja. Three level fault tolerant DTC control for induction machine drives. International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices, Chemnitz, 2012: 1-6.
6. M Elamin, Y Yasa, A Elrayyah, et al. Performance improvement of the delta-connected SRM driven by a standard three phase inverter. 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), Miami, FL, 2017: 1-7.
7. X Ai-de, Z Xianchao, H Kunlun, et al. Torque-ripple reduction of SRM using optimised voltage vector in DTC. *IET Electrical Systems in Transportation*, 2018, 8(1): 35-43.
8. X Zhao, A Xu, W Zhang. Research on DTC system with variable flux for switched reluctance motor. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, 2017, 1(2): 199-206.

9. S Sau, R Vandana, B G Fernandes. A new direct torque control method for switched reluctance motor with high torque/ampere. IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vienna, 2013: 2518-2523.
10. W Ding, Y Hu, L Wu. Comparative evaluation of voltage space vector control and direct instantaneous torque control for switched reluctance motor drives. 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Hangzhou, 2014: 1808-1812.
11. D Xuanju, X Peng, Y Haoming, et al. Phase plane-based variable structure control for switched reluctance motor direct torque control. 2012 12th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV), Guangzhou, 2012: 775-781.
12. M Abassi, A Khlaief, O Saadaoui, et al. Performance analysis of PMSM DTC drives under inverter fault. 2017 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC\_ASET), Hammamet, 2017: 244-249.
13. O M Abassi, I Saadaoui, A Tlili, et al. PMSM DTC drive system fed by fault-tolerant inverter connected to a photovoltaic source. 2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC), Hammamet, 2018: 1-5.
14. J Zhang, L Li, D Dorrell, et al. Direct torque control with a modified switching table for a direct matrix converter Mingyao Ma et al.: Vector Control Strategy of a T-type Three-level Converter Driving a Switched Reluctance Motor 21 based AC motor drive system. 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Sydney, NSW, 2017: 1-6.
15. A Ghaderi, M Sugai, T Umeno, et al. A new direct torque control for AC motors with over modulation ability. 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), Niagara Falls, ON, 2011: 1247-1252.

## Трирівневий перетворювач Т-типу



Сектори вектора напруги та алгоритм вибору вектора з 12 векторів напруги в секторі  $N_l$  відповідно до зміни крутного моменту та потокозчеплення



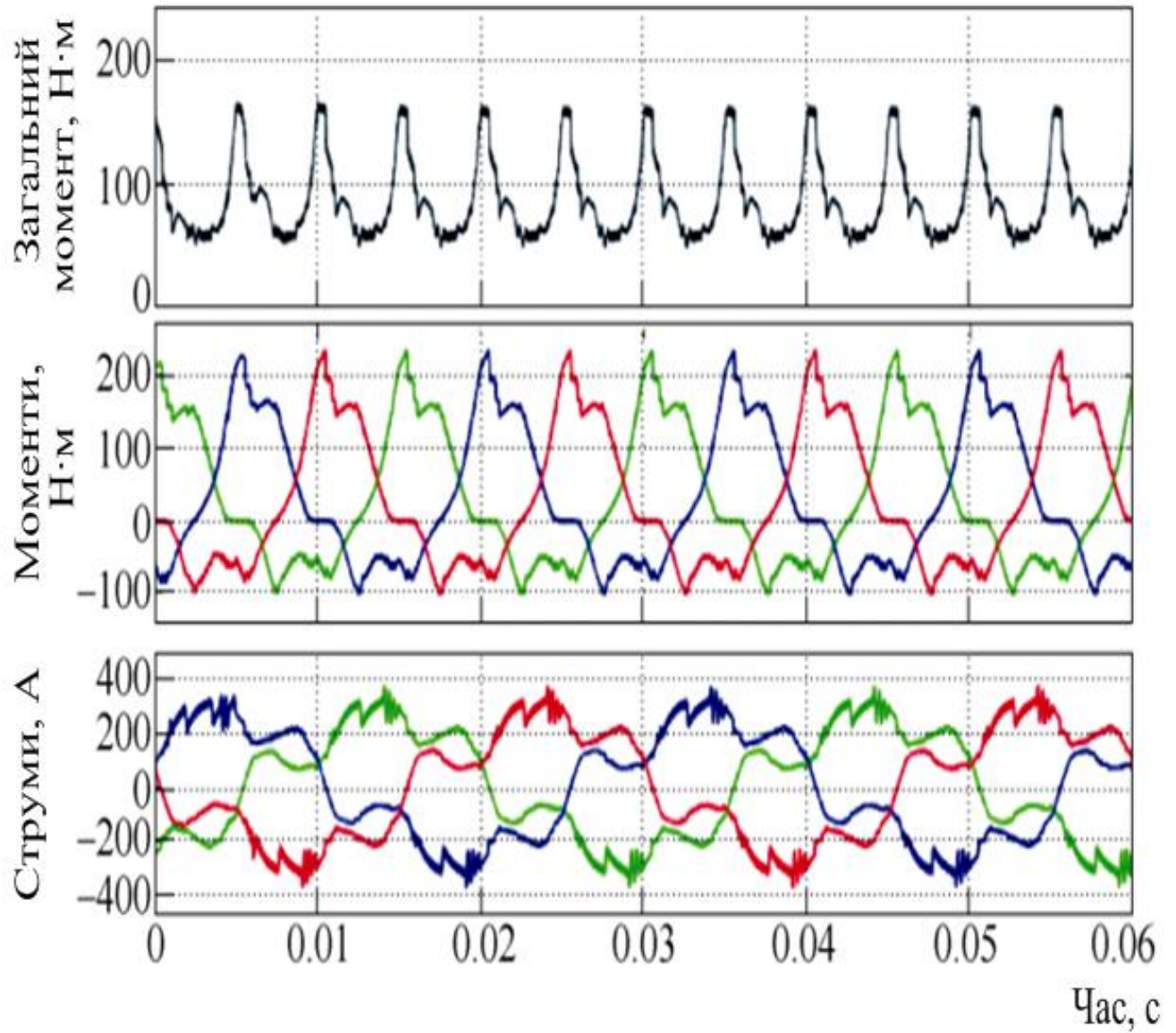
$T \uparrow \psi \uparrow$	$T \uparrow \psi \downarrow$	$T \downarrow \psi \uparrow$	$T \downarrow \psi \downarrow$
$\mathbf{v}_3$	$\mathbf{v}_5$	$\mathbf{v}_{11}$	$\mathbf{v}_9$
$\mathbf{v}_2$	$\mathbf{v}_6$	$\mathbf{v}_{12}$	$\mathbf{v}_8$

Вибір векторів шестимодульованого сигналу напруги багаторівневого перетворювача при формуванні постійної складової при зміні параметрів системи електроприводу

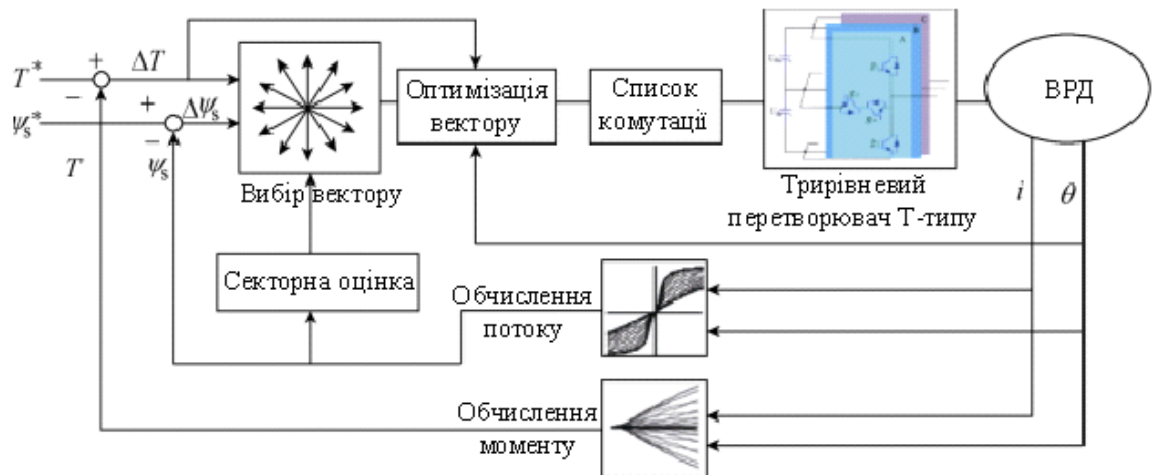
	$T\uparrow \psi\uparrow$	$T\uparrow \psi\downarrow$	$T\downarrow \psi\uparrow$	$T\downarrow \psi\downarrow$
$N_1$	$\nu_3$	$\nu_5$	$\nu_{11}$	$\nu_9$
$N_2$	$\nu_3$	$\nu_7$	$\nu_1$	$\nu_9$
$N_3$	$\nu_5$	$\nu_7$	$\nu_1$	$\nu_{11}$
$N_4$	$\nu_5$	$\nu_9$	$\nu_3$	$\nu_{11}$
$N_5$	$\nu_7$	$\nu_9$	$\nu_3$	$\nu_1$
$N_6$	$\nu_7$	$\nu_{11}$	$\nu_5$	$\nu_1$
$N_7$	$\nu_9$	$\nu_{11}$	$\nu_5$	$\nu_3$
$N_8$	$\nu_9$	$\nu_1$	$\nu_7$	$\nu_3$
$N_9$	$\nu_{11}$	$\nu_1$	$\nu_7$	$\nu_5$
$N_{10}$	$\nu_{11}$	$\nu_3$	$\nu_9$	$\nu_5$
$N_{11}$	$\nu_1$	$\nu_3$	$\nu_9$	$\nu_7$
$N_{12}$	$\nu_1$	$\nu_5$	$\nu_{11}$	$\nu_7$



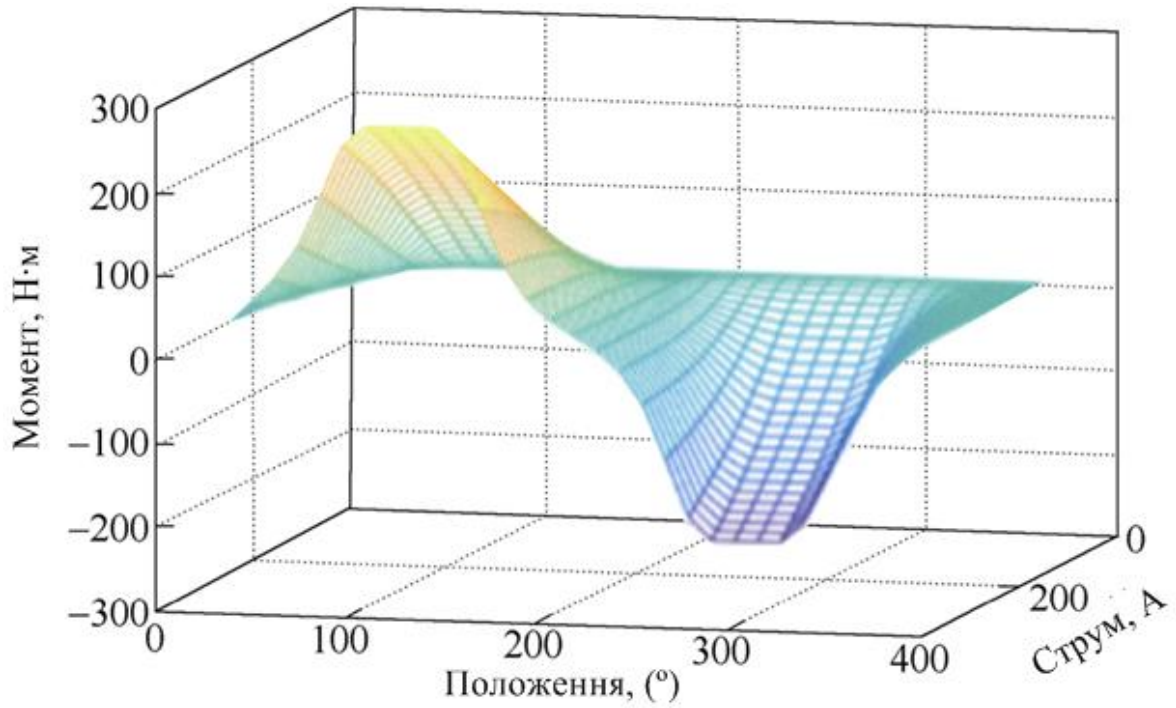
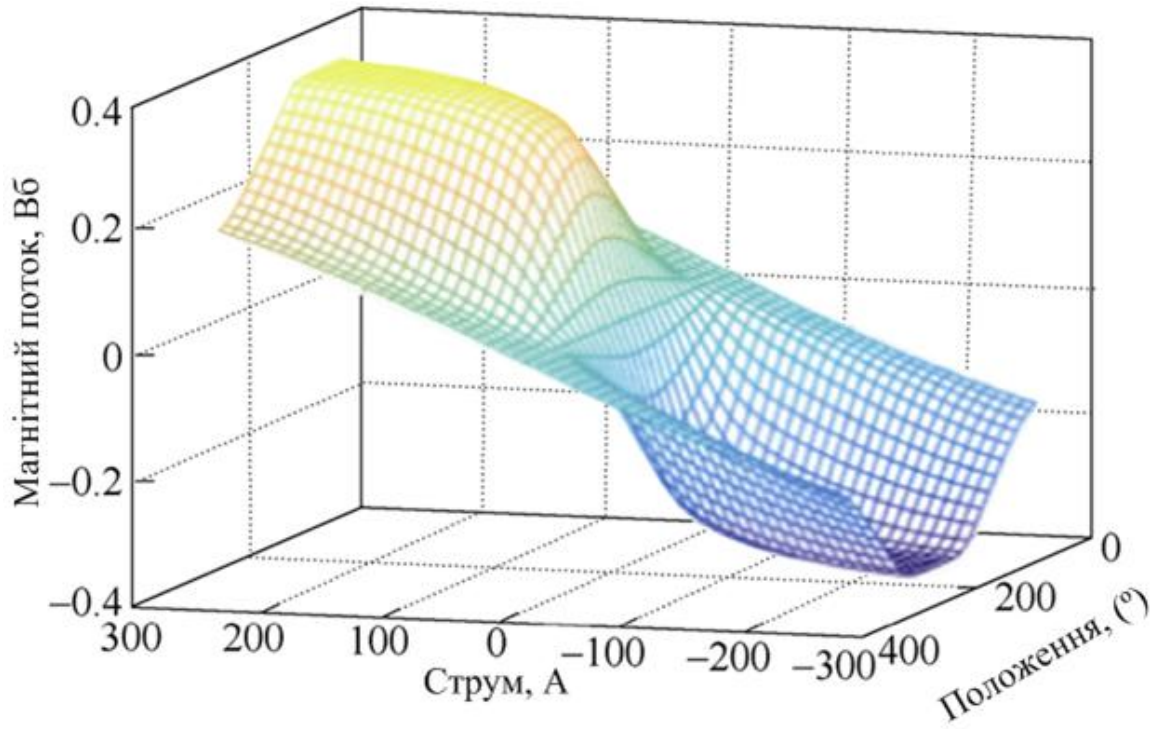
Результати моделювання шести непарних векторів нижнього індексу, заснованих на традиційній теорії виділення постійної складової при 500 об / хв



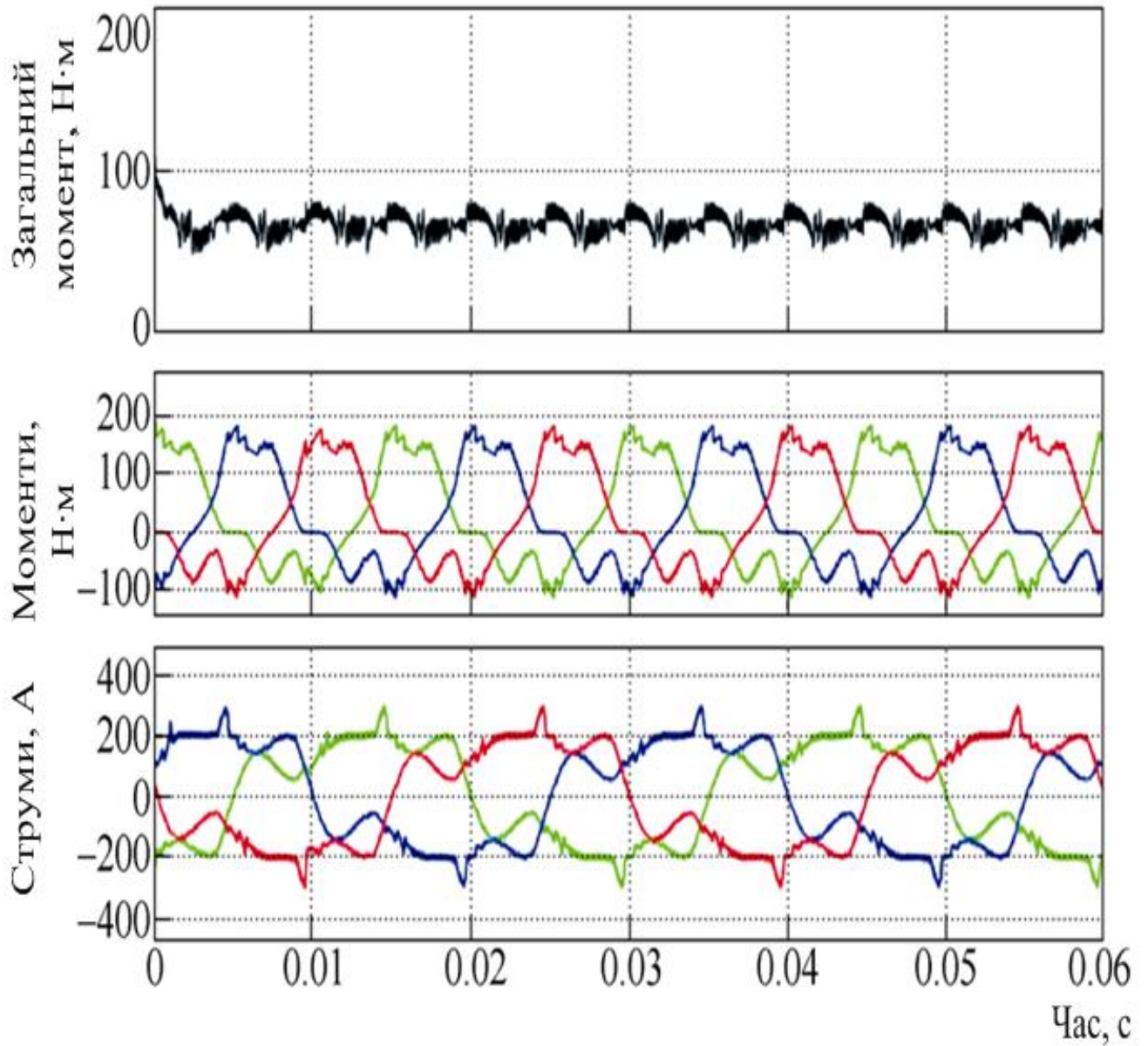
Структурна схема інформації про систему приводу з прямим керуванням моменту.



Таблиці спостереження за потоком та моментом



Результати моделювання при використанні дванадцяти векторів на основі запропонованого методу прямого керування крутним моментом при 500 об / хв.





Результати моделювання при використанні дванадцяти векторів на основі запропонованого методу прямого керування крутним моментом при 500 об / хв.

