

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 способів прямого керування крутним моментом асинхронного двигуна електроприводу з реалізацією прогнозного алгоритму у функції струму»

*КНУ.МР.141.24.776-06*

Виконав студент II курсу, групи ЕПА-23м /В`ячеслав КОМАРНИЦЬКИЙ/  
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

КОМАРНИЦЬКИЙ В`ячеслав Русланович

---

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Аналіз та дослідження способів прямого керування крутним моментом асинхронного двигуна електроприводу з реалізацією прогнозного алгоритму у функції струму

1. Термін подання студентом роботи: 09 грудня 2024 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є аналіз способів прямого керування крутним моментом асинхронного двигуна електроприводу з реалізацією прогнозного алгоритму у функції струму
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Аналіз структури електроприводу з силовими перетворювачами; II. Аналіз способів прямого керування крутним моментом асинхронного двигуна із застосуванням методів широтно-імпульсної модуляції сигналу; III. Дослідження способів прямого керування крутним моментом асинхронного двигуна електроприводу з реалізацією прогнозного алгоритму у функції струму.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Системи керування перетворювачем; II. Система керування у функції струму для інверторів; III. Широтно-імпульсна модуляція для інверторів; IV. Широтно-імпульсна модуляція для трифазних інверторів; V. Прогнозне керування; VI. Прогнозне керування у функції струму

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	Схеми перетворювачів у структурі електроприводу	10.09.24
2	Система керування перетворювачем	12.10.24
3	Класичний метод керування струмом	17.10.24
4	Просторовий метод керування	19.10.24
5	Способи прямого керування крутним моментом	24.10.24
6	Система прямого керування крутним	26.10.24
7	Система керування у функції струму	28.11.24
8	Система прогнозного керування	30.11.24
9	Алгоритм прогнозного керування у функції струму	04.12.24
10	Система керування з реалізацією прогнозного алгоритму у функції струму	07.12.24

Дата видання завдання 02.09.2024 р.

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

Комарницький В.Р.  
(ПІБ)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Осадчук Ю.Г. \_\_\_\_\_  
(ПІБ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи на тему «Аналіз та дослідження способів прямого керування крутним моментом асинхронного двигуна електроприводу з реалізацією прогнозного алгоритму у функції струму», КНУ.РМ.141.24.776-6

57 с., 23 рис., 12 літературних джерел

Мета дослідження – аналіз способів прямого керування крутним моментом асинхронного двигуна електроприводу з реалізацією прогнозного алгоритму у функції струму.

Об’єкт дослідження – перетворювач частоти асинхронного електроприводу з реалізацією прогнозного алгоритму у функції струму.

Предмет дослідження – принципи реалізації прогнозного алгоритму керування перетворювачем частоти у функції струму.

У першому розділі проведено аналіз систем керування електроприводом з перетворювачем частоти. Також розглянуто принципи керування асинхронним електроприводом. Розглянуто такі параметри як швидкодія, сталі часу та показники перетворення керуючих сигналів.

У другому розділі роботи розглянуто питання контролю струму та визначено показники які впливають на процес керування асинхронним електроприводом. Для системи векторного керування розглянуті математичні вирази для визначення показників керування. Запропоновано спосіб прямого керування крутним моментом асинхронного двигуна з реалізацією прогнозного алгоритму.

У третьому розділі роботи розроблено математичну модель асинхронного електроприводу та досліджено режими його роботи із застосуванням прямого керування крутним моментом асинхронного двигуна

та реалізацією алгоритму прогнозного керування електроприводом у функції струму.

АСИНХРОНИЙ ДВИГУН, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ, ПРОГНОЗНЕ КЕРУВАННЯ

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	8
1. Аналіз структури електроприводу з силовими перетворювачами	13
1.1. Схеми перетворювачів у структурі асинхронного електроприводу .....	14
1.2. Класифікація перетворювачів.....	16
1.3 Система керування перетворювачем .....	18
1.4 Цифрові системи керування перетворювачем .....	19
Висновок до розділу 1. ....	21
2. Аналіз способів прямого керування крутним моментом асинхронного двигуна із застосуванням методів широтно-імпульсної модуляції сигналу.....	23
2.1. Класичний метод керування струмом .....	24
2.2 Просторовий метод керування із застосуванням методів широтно-імпульсної модуляції сигналу .....	27
Висновок до розділу 2 .....	33
3. Дослідження способів прямого керування крутним моментом асинхронного двигуна електроприводу з реалізацією прогнозного алгоритму у функції струму.....	34
3.1 Способи прямого керування крутним моментом асинхронного двигуна з реалізацією прогнозного алгоритму .....	34
3.2 Система прямого керування крутним моментом асинхронного двигуна з реалізацією прогнозного алгоритму .....	36
3.3 Система прямого керування крутним моментом асинхронного двигуна у функції струму .....	37
3.4 Система прямого керування крутним моментом асинхронного двигуна з реалізацією прогнозного алгоритму у функції струму .....	43

Висновки до розділу 3 .....	52
Висновки .....	54
Список використаних джерел.....	56

## ВСТУП

Сучасні системи керування автоматизованим електроприводом покликані збільшити ефективність його функціонування.

Для цього в таких системах використовуються передові технології та досягнення сучасної науки та техніки.

Автоматизація процесу керування електричними двигунами у системах електроприводу забезпечується спеціальними пристроями та приладами, що мають забезпечити ефективне регулювання параметрів електричних двигунів у процесі виконання ними поставленої задачі, або завдання щодо відтворення вимог технологічної установки або виробничого об'єкту.

У виробництві найбільш використовуються електричні двигуни змінного струму.

Серед їх типів найбільш розповсюдженим є використання асинхронних електричних двигунів.

Доволі часто асинхронні електричні двигуни використовуються у виконанні із коротко замкненим ротором.

Так, є багато варіантів виконання асинхронних електричних двигунів з фазою обмоткою ротора, але виходячи з необхідності забезпечити такі установки додатковими заходами щодо експлуатації, а також суттєве зниження надійності використання таких систем, тому останні такі структури замінюються на більш надійні та менш примхливі системи електричного приводу у основі яких покладено використання асинхронних двигунів з коротко замкненим ротором.



Ті системи, що залишаються та містять асинхронні електричні двигуни з фазним ротором мають бути замінені на їх коротко замкнений варіант.

У переважній більшості керування автоматизованими системами електроприводу з асинхронними електричними двигунами з коротко замкненим ротором виконується при живленні останнього через перетворювач частоти.

Перетворювач частоти у таких системах відіграє роль керуючого пристрою, що здійснює зміну напруги та частоти живлення асинхронного двигуна з коротко замкненим ротором у відповідності до програми керування, або виходячи з завдання на виконання.

Більш прості системи керування налаштовуються на застосування скалярних методів створення сигналу завдання.

При цьому амплітуда а також частота напруги живлення залежатиме від типу навантаження й коригується у процесі роботи сигналами зворотного зв'язку.

Такі системи забезпечують виконання простих завдань щодо пуску та зміни частоти обертання електричного двигуна.

При виконанні більш складних виробничих операцій технологічного процесу застосовуються програмні методи формування керуючих сигналів.

Такі системи керування мають враховувати зміну параметрів електричного двигуна при виконанні технологічних операцій у часі.

При цьому необхідним є потреба визначення складових просторового представлення значень вимірюваних величин.

Такий підхід забезпечує суттєве поліпшення характеристик електричного приводу у динамічних режимах його роботи.

Для формування програмного керування використовуються методи розв'язку систем диференційних рівнянь, що складаються у відповідності до режимів роботи електроприводу та типу й параметрів використовуваного обладнання для їх реалізації.

При цьому дуже важливим є швидкість формування подібних завдань, оскільки у динамічних режимах перехідні процеси впливають на значення сигналів зворотного зв'язку та можуть внести суттєву похибку у структуру системи керування.

Сучасний підхід щодо формування програмного управління перетворювачем частоти передбачає розробку нової стратегії керування.

Останні дослідження показують, що методи що засновані на формуванні програмного керування із застосуванням досвіду налагодження параметрів та характеристик роботи системи керування протягом циклічного періоду їх роботи мають доволі суттєвий ефект у порівнянні зі стандартною формою векторного керування електроприводом.

Таким чином доволі цікавими бачаться методи, за допомогою яких можна здійснити прогнозування процесів перетворення електричних параметрів автоматизованих систем електроприводу на основі досвіду прийнятих рішень у відповідності із режимами електроспоживання та діючим навантаженням.

У подібних системах завдання керування створюється на основі прогностичних моделей, що діють на основі функцій варіаційного числення, та покликані поліпшити точність регулювання параметрів електричного двигуна.

Такі системи більш гнучкі до створюваних завад та можуть працювати при наявності процесу невизначеності або втрати сигналу завдання, забезпечивши автономність роботи системи керування на основі отриманого досвіду.

Оскільки такий підхід ще не набув на практиці суттєвого досвіду то подібні структури при розробці буде доцільним порівняти з класичними методами векторного керування.

Класичний метод широтно-імпульсного керування при формуванні сигналів завдання засновано на порівнянні лінійного сигналу із сигналами гістерезисного характеру.

Також застосовується у роботі перетворювачів частоти просторова векторна модуляція при створенні керуючого сигналу.

Ці методи є дієвими, але на практиці потребують суттєвих доробок та доопрацювань.

Тому розглянуто можливість доопрацювання класичних методів керування за допомогою створення прогностичної моделі.

Такий підхід дозволяє суттєво скоротити час формування сигналів керування.

Формування прогностичного керування здійснюється на основі розроблених алгоритмів попереднього визначення схеми перемикання керованих модулів перетворювача частоти.

Такий підхід дозволяє мінімізувати похибку у формуванні вихідного сигналу напруги, а також скоротити час на прийняття рішень.

Несуттєвим недоліком прогностичного керування перетворювачем частоти є необхідність незначного збільшення розміру комірки пам'яті

мікропроцесорного пристрою керування перетворювачем у наслідок збільшення об'єму розрахункових операцій у одному циклі перетворення.

## **1. Аналіз структури електроприводу з силовими перетворювачами**

Сучасні системи регульованого електроприводу є складними структурами та потребують достатньої уваги щодо їх розробки та впровадження у виробничі процеси.

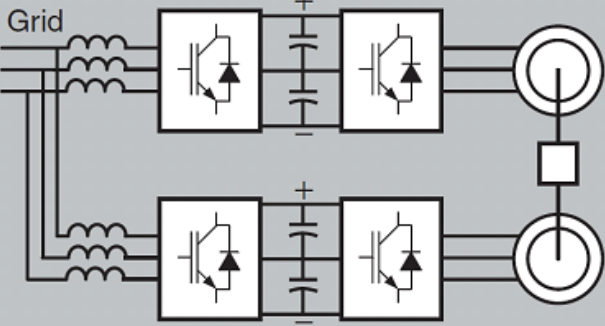
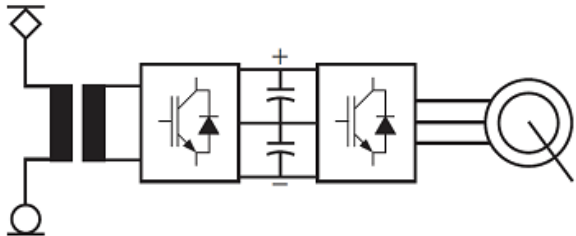
Постійний розвиток елементної бази перетворювальної техніки допомагає у досягненні нових горизонтів що до розвитку стратегії керування електроприводом.

Новітні підходи покладаються на все більше використання елементів перетворювальної техніки у структурах систем регулювання електроприводом.

Тому для відтворення процесу ефективного керування системами електроприводу необхідно постійно оновлювати елементну базу перетворювальних пристроїв, як джерела регулювання, у відповідності до досягнень наукової думки.

## 1.1. Схеми перетворювачів у структурі асинхронного електроприводу

Розглянемо приклади застосування перетворювальної техніки для здійснення регулювання параметрів електроприводу.

Сектор	Застосування приклади	Схема системи*
Промисловий	Насоси Вболівальники конвеєри <sup>+</sup> Лопати Випрямлячі	
Перевезення	Електричні транспортні засоби Гібридні транспортні засоби Потяги <sup>+</sup> Кораблі Літак	

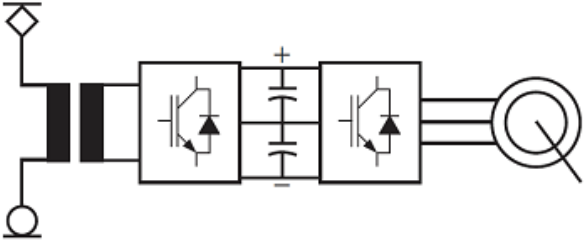
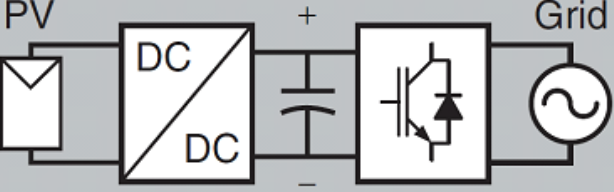
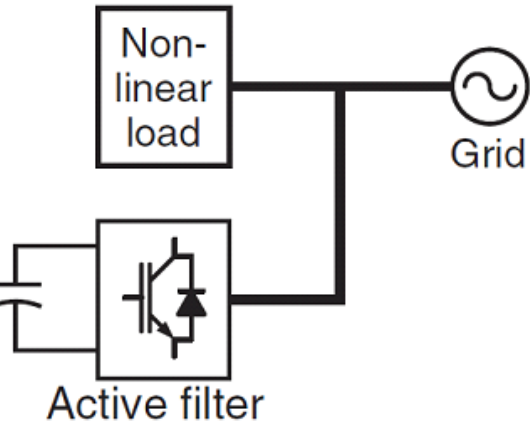
<p>Перевезення</p>	<p>Електричні транспортні засоби</p> <p>Гібридні транспортні засоби</p> <p>Потяги<sup>†</sup></p> <p>Кораблі</p> <p>Літак</p>	
<p>Поновлюваній енергії</p>	<p>Енергія вітру</p> <p>Фотоелектрична енергія<sup>†</sup></p>	
<p>Потужність</p>	<p>Активні фільтри<sup>†</sup></p> <p>Розподілена генерація</p> <p>Зберігання енергії</p> <p>СТАТКОМ</p>	

Рисунок 1.1. Приклади застосування перетворювальної техніки для здійснення регулювання параметрів електроприводу

## *1.2. Класифікація перетворювачів*

Згідно прикладами застосування перетворювальної техніки для здійснення регулювання параметрів електроприводу можна виділити перетворювачі що здійснюють безпосереднє регулювання параметрів електроприводу, а також ті що здійснюють регулювання параметрів електроприводу при використанні ними додаткового виробничого обладнання.

Останні більш використовуються для систем керування технологічними процесами.

Тому на практиці для застосування перетворювальної техніки для здійснення регулювання параметрів електроприводу використовуються безпосередні перетворювачі.

Представимо структуру електроприводу з безпосереднім перетворювачем.



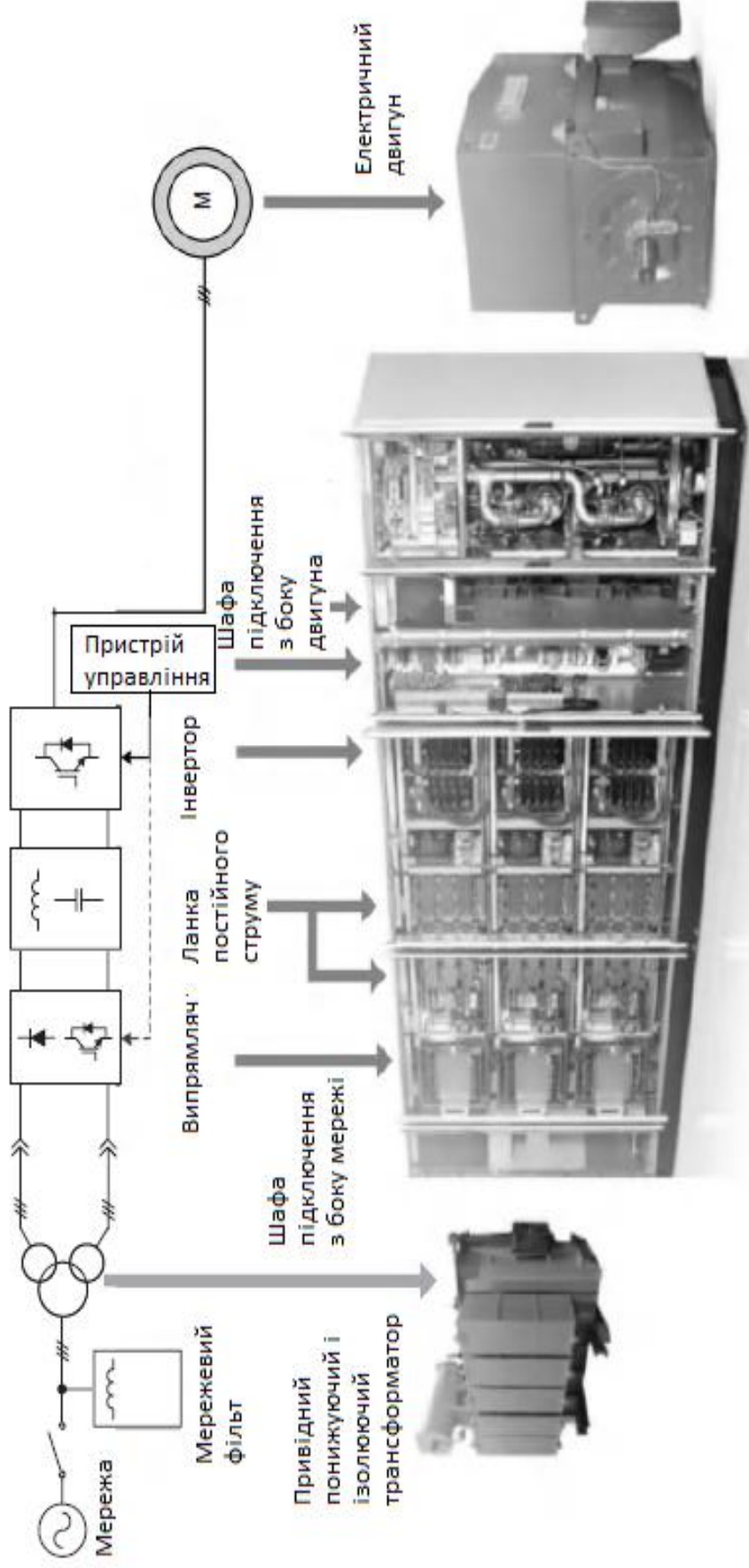


Рисунок 1.2 - Структура електроприводу з безпосереднім перетворювачем

### 1.3 Система керування перетворювачем

При розгляді систем керування є багато топологій, які враховують ті чи інші особливості.

Можна виділити такі особливості як лінійність чи залежність управління.

Також розглядається векторна чи польова модель керування перетворювачем.

Основний розподіл щодо особливостей системи керування перетворювачем представимо на рисунку.

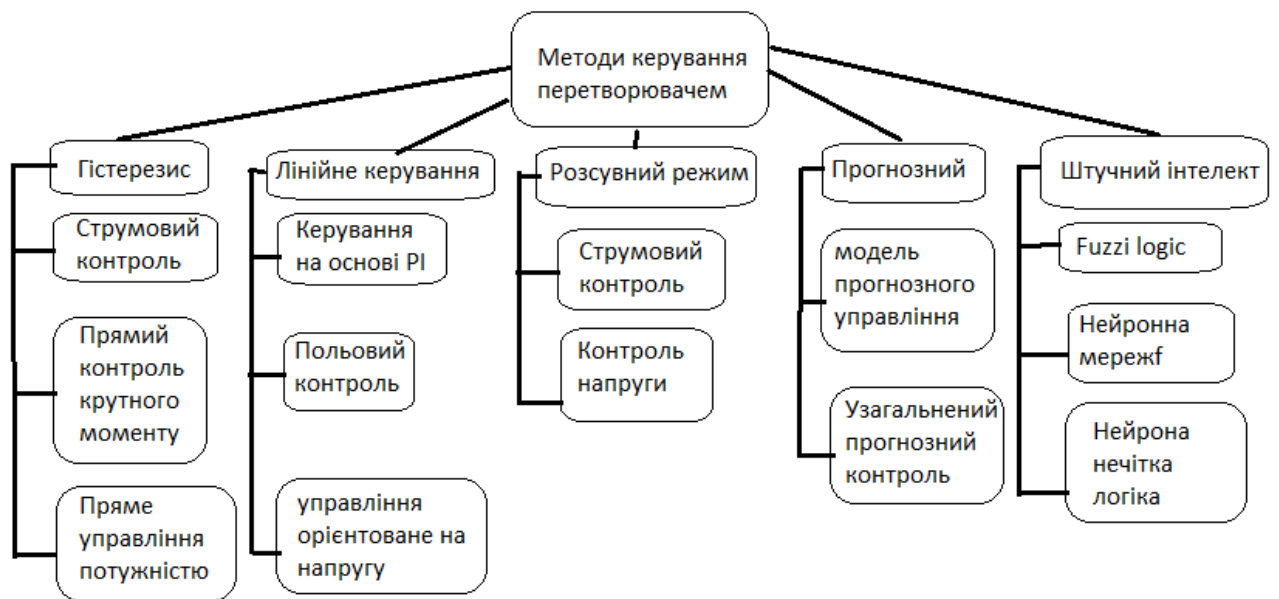


Рисунок 1.3 - Основний розподіл щодо особливостей системи керування перетворювачем

### *1.4 Цифрові системи керування перетворювачем*

Серед перелічених систем особливе місце займають цифрові системи керування.

Наведемо приклад застосування цифрових систем керування перетворювачами на практиці.

Таблиця 1.1

Приклад застосування цифрових систем керування перетворювачами на практиці

TMS320F2812	TMS320C6713	DS1104–DS1103	XC3S400
150МГц	225МГц	350МГц–1 ГГц	50МГц
150 МВС	1800 МВС	662–2500 МВС	-

Наведемо особливості розподілу щодо зростання продуктивності системи керування перетворювачем.

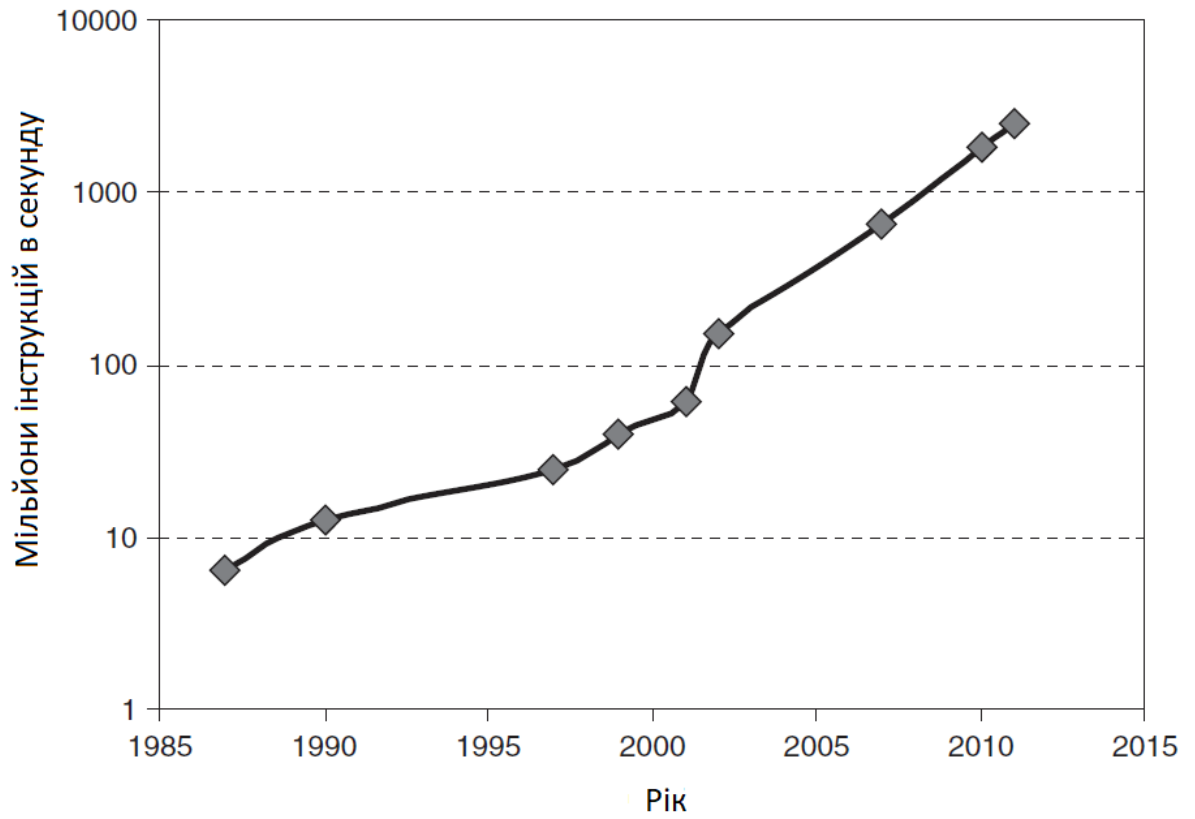


Рисунок 1.4 - Особливості розподілу щодо зростання продуктивності системи керування перетворювачем

### *Висновок до розділу 1.*

Автоматизація процесу керування електричними двигунами у системах електроприводу забезпечується спеціальними пристроями та приладами, що мають забезпечити ефективне регулювання параметрів електричних двигунів у процесі виконання ними поставленої задачі, або завдання щодо відтворення вимог технологічної установки або виробничого об'єкту.

У переважній більшості керування автоматизованими системами електроприводу з асинхронними електричними двигунами з коротко замкненим ротором виконується при живленні останнього через перетворювач частоти.

Перетворювач частоти у таких системах відіграє роль керуючого пристрою, що здійснює зміну напруги та частоти живлення асинхронного двигуна з коротко замкненим ротором у відповідності до програми керування, або виходячи з завдання на виконання.

Більш прості системи керування налаштовуються на застосування скалярних методів створення сигналу завдання.

При цьому амплітуда а також частота напруги живлення залежатиме від типу навантаження й коригується у процесі роботи сигналами зворотного зв'язку.

Такі системи забезпечують виконання простих завдань щодо пуску та зміни частоти обертання електричного двигуна.

При виконанні більш складних виробничих операцій технологічного процесу застосовуються програмні методи формування керуючих сигналів.

Такі системи керування мають враховувати зміну параметрів електричного двигуна при виконанні технологічних операцій у часі.

При цьому необхідним є потреба визначення складових просторового представлення значень вимірюваних величин.

Такий підхід забезпечує суттєве поліпшення характеристик електричного приводу у динамічних режимах його роботи.

## **2. Аналіз способів прямого керування крутним моментом асинхронного двигуна із застосуванням методів широтно-імпульсної модуляції сигналу**

Нелінійне керування перетворювачем що здійснює регулювання параметрів електроприводу є доволі ефективним методом керування що застосовується у практиці сучасного підходу щодо прийняття управлінських рішень.

Для цього методу управління використовується нелінійна ділянка петлі гістерезису у контурі магнітного потоку електричної машини у структурі електроприводу.

Таке регулювання зручно здійснювати на основі методу широтно-імпульсної модуляції.

Наявність циклічності у структурі керування дозволяє застосовувати особливості повторювального алгоритму для поліпшення показників якості перетворення електричної енергії.

Тому набули розвитку системи керування вихідною потужністю перетворювача.

Подібна концепція дозволяє застосувати прогнозні моделі для вирішення цілого ряду питань.

## 2.1. Класичний метод керування струмом

З огляду класичного підходу щодо розгляду системи керування перетворювачем можна зазначити системи керування струмом та системи керування вихідною напругою перетворювача.

Розглянемо систему керування струмом перетворювача.

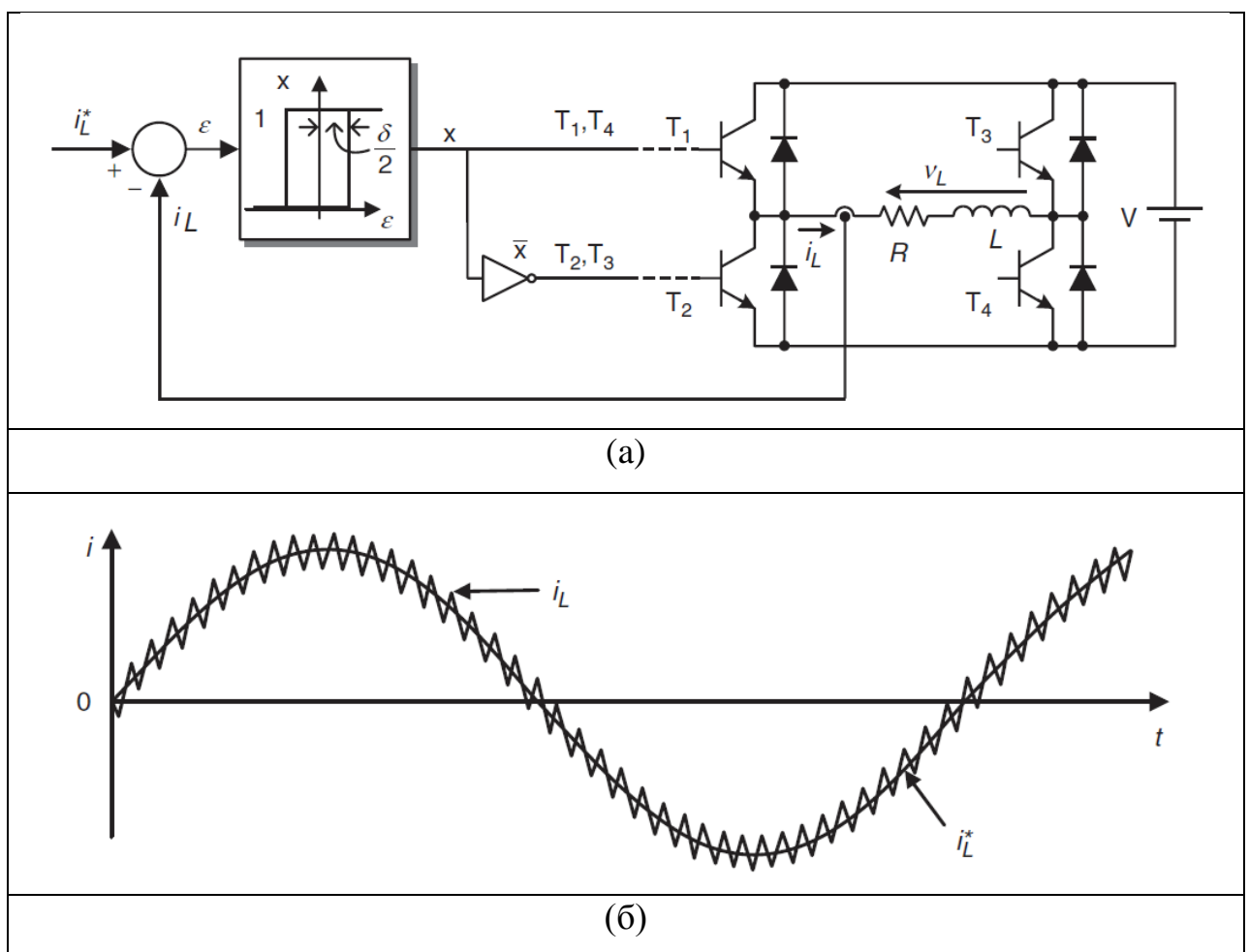
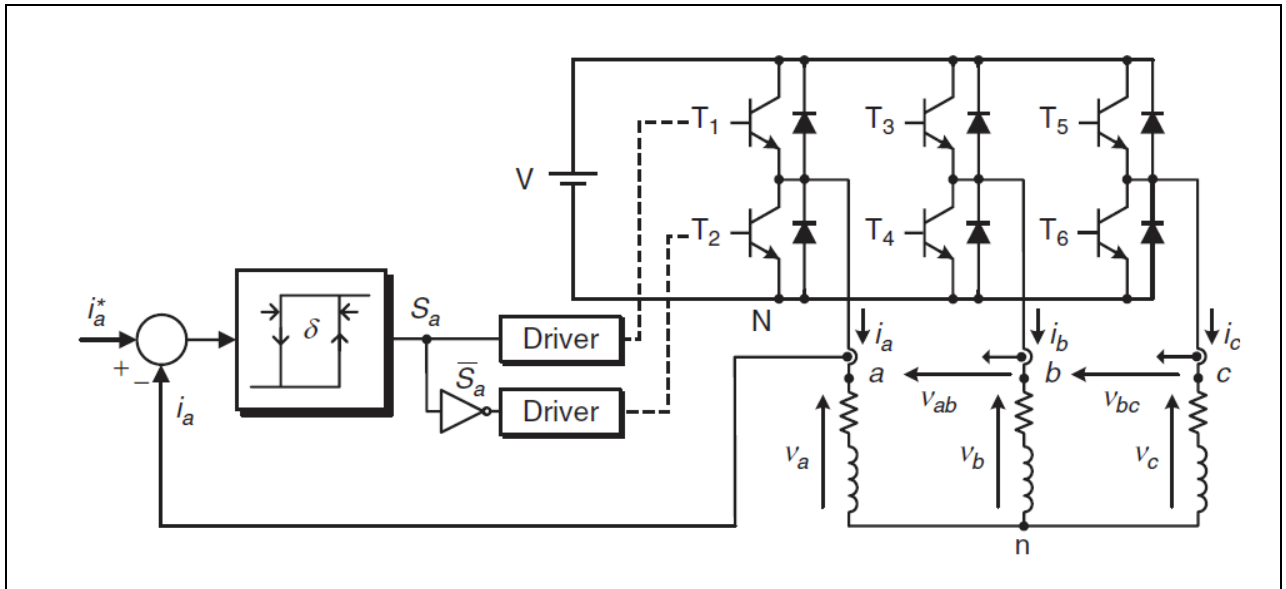


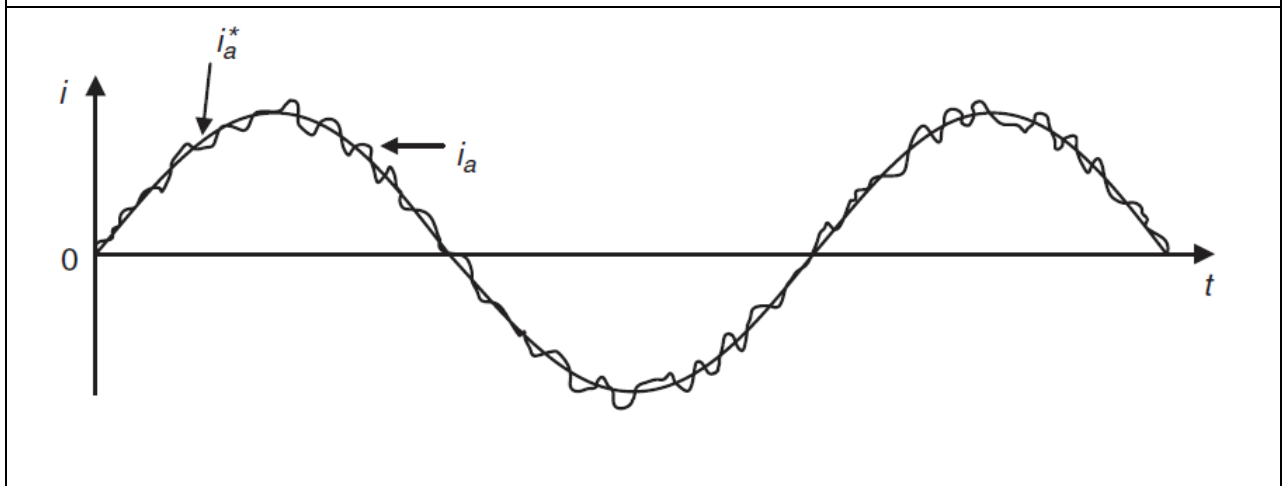
Рисунок 2.1 Система керування струмом перетворювача.

(а) Схема. (б) Струм.

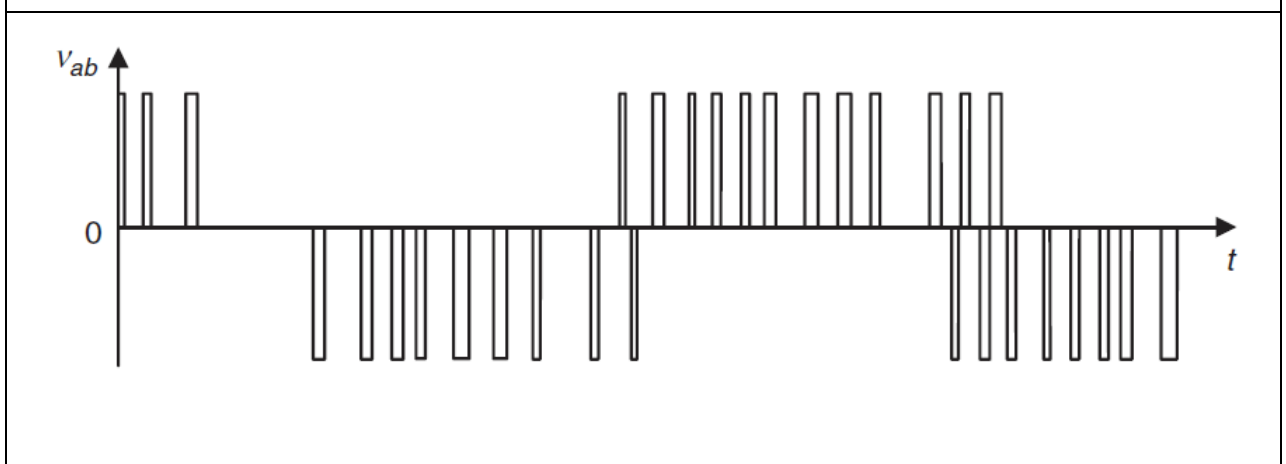




(a)



(b)



(B)

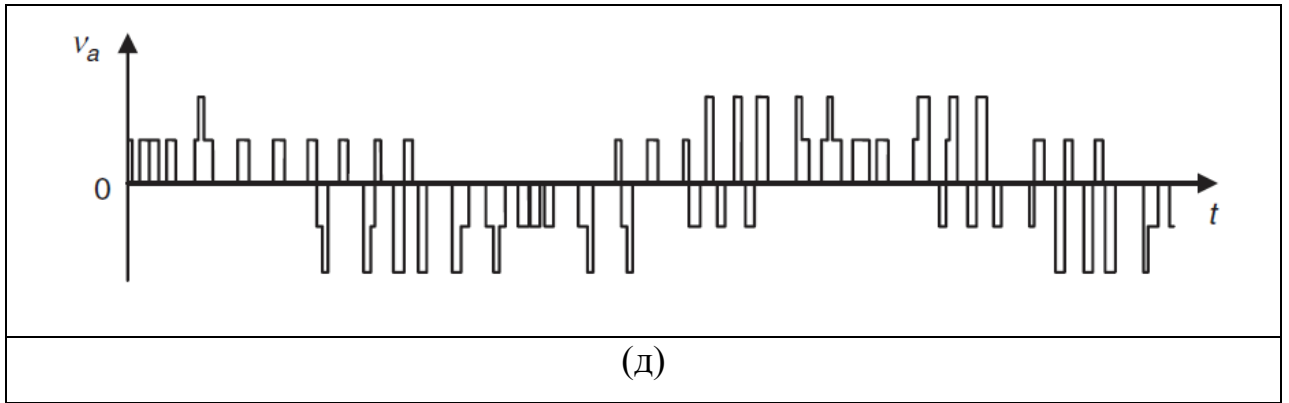


Рисунок 2.2 - Система керування струмом перетворювача

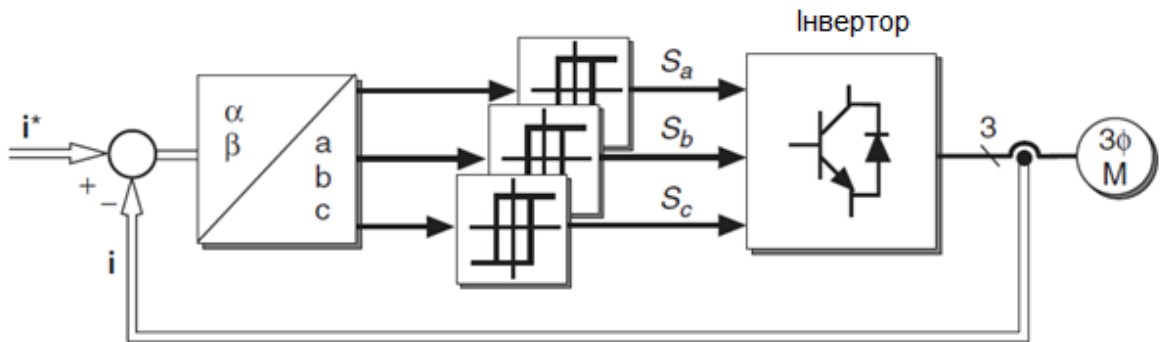


Рисунок 2.3 - Схема керування струмом перетворювача

## 2.2 Просторовий метод керування із застосуванням методів широтно-імпульсної модуляції сигналу

Розглянемо математичні засади щодо створення лінійної системи керування перетворювачем.

$$\mathbf{v} = \frac{2}{3}(v_{aN} + \mathbf{a}v_{bN} + \mathbf{a}^2v_{cN}) \quad (2.1)$$

де  $v_{aN}$ ,  $v_{bN}$  і  $v_{cN}$  - напруга інвертору та  $\mathbf{a} = e^{j 2[\pi]/3}$ .

Стан функції перемикання залежить від струму,

$$v_{xN} = S_x V_{dc}, \text{ де } x = \{a, b, c\}.$$

На основі складеного рівняння напруги керування перетворювачем розробимо та представимо структуру контуру керування струмом перетворювача та графіки зміни параметрів керування.

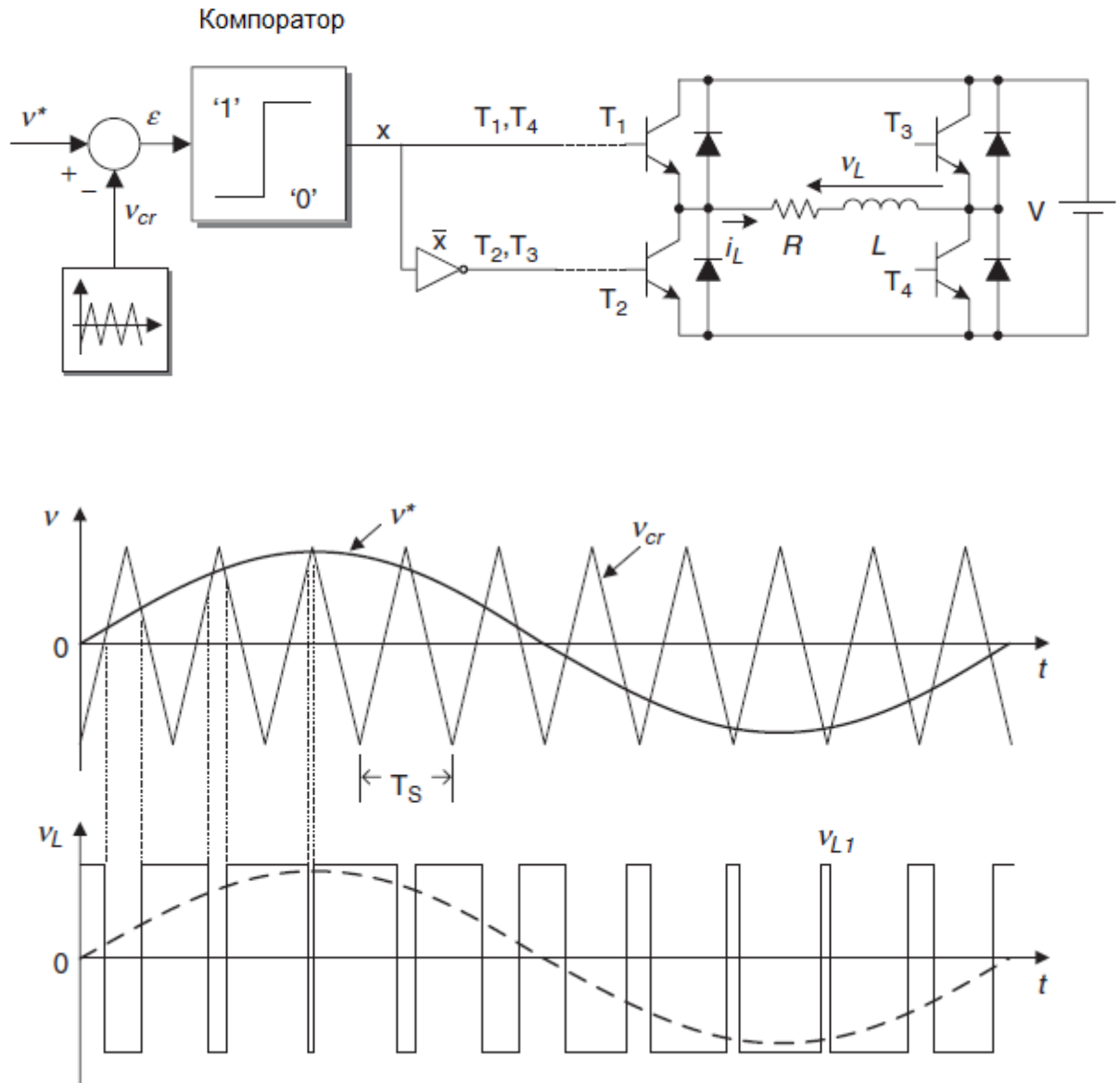


Рисунок 2.4 Структура контуру керування струмом перетворювача та графіки зміни параметрів керування

$v^*$ , відповідно до сектору  $k$ , синтезовано за виразом  $V_k, V_{k+1}$  і  $V_0$ , відповідно до часу  $t_k, t_{k+1}$  і  $t_0$ .

Запишемо наступну систему рівнянь.

$$\mathbf{v}^* = \frac{1}{T}(\mathbf{V}_k t_k + \mathbf{V}_{k+1} t_{k+1} + \mathbf{V}_0 t_0) \quad (2.2)$$

$$T = t_k + t_{k+1} + t_0 \quad (2.3)$$

де  $T$  – період часу,

а  $t_k/T$ ,  $t_{k+1}/T$  і  $t_0/T$  – цикл роботи.

$$t_k = \frac{3T|\mathbf{v}^*|}{2V_{dc}} \left( \cos(\theta - \theta_k) - \frac{\sin(\theta - \theta_k)}{\sqrt{3}} \right) \quad (2.4)$$

$$t_{k+1} = \frac{3T|\mathbf{v}^*|}{V_{dc}} \frac{\sin(\theta - \theta_k)}{\sqrt{3}} \quad (2.5)$$

$$t_0 = T - t_k - t_{k+1} \quad (2.6)$$

де  $\theta$  – кут вектору  $\mathbf{v}^*$ ,

$\theta_k$  – кут вектору  $\mathbf{V}_k$ .

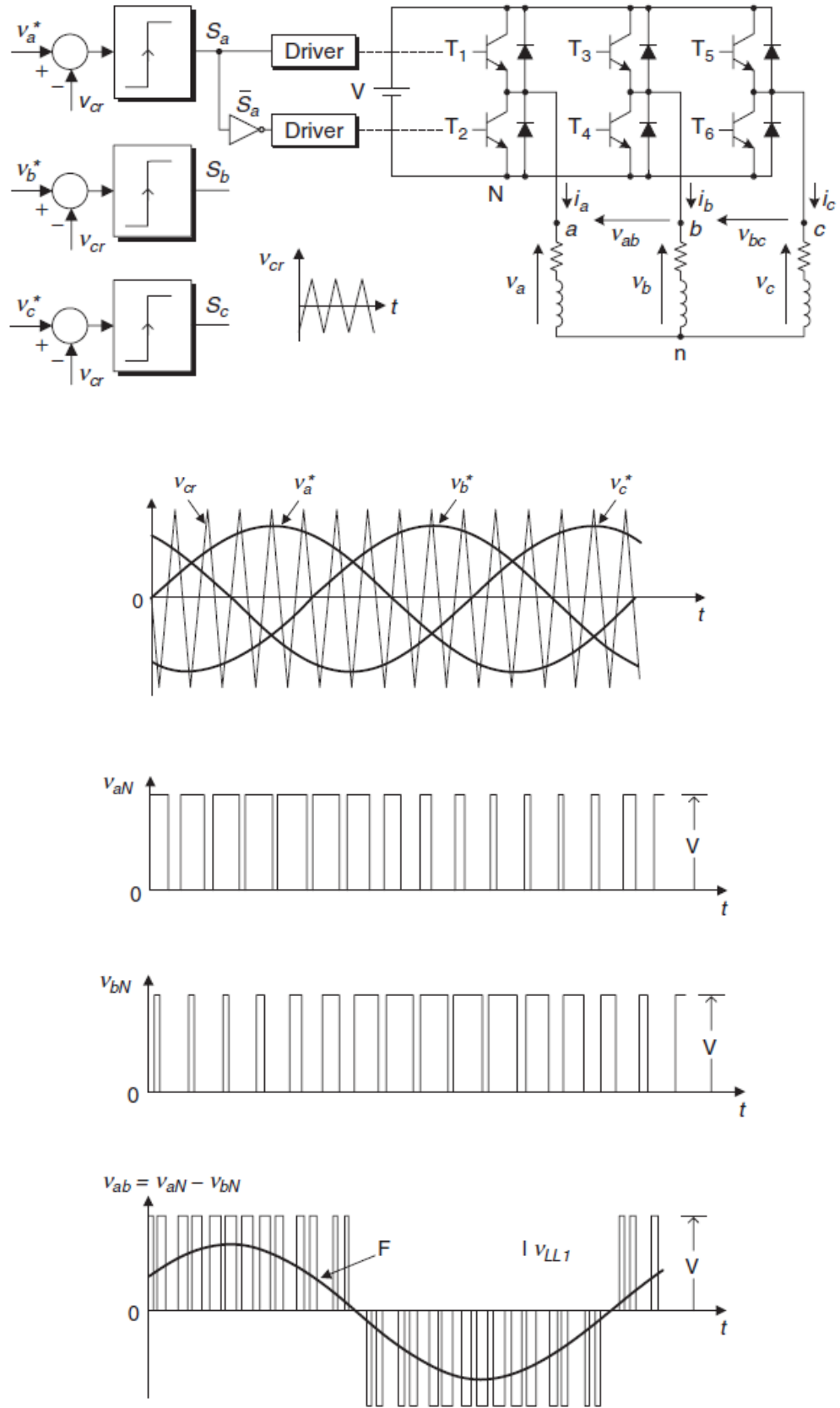


Рисунок 2.5 Структура контуру керування струмом перетворювача та графіки зміни параметрів керування для трифазної системи

Комбінацію ввімкнення ключових елементів та відповідні значення вихідної напруги перетворювача зручно представляти у вигляді таблиці станів.

Таблиця 2.1

Комбінації ввімкнення ключових елементів  
та відповідні значення вихідної напруги  
перетворювача у вигляді таблиці станів

Sa	Sb	Sc	Вектор напруги $\vec{V}$
0	0	0	$V_0 = 0$
1	0	0	$V_1 = \frac{2}{3}V_{dc}$
1	1	0	$V_2 = \frac{1}{3}V_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
0	1	0	$V_3 = -\frac{1}{3}V_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
0	1	1	$V_4 = -\frac{2}{3}V_{dc}$
0	0	1	$V_5 = -\frac{1}{3}V_{dc} - j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
1	0	1	$V_6 = \frac{1}{3}V_{dc} - j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
1	1	1	$V_7 = 0$

Відповідно до таблиці станів наведемо структурну схему керування модуляцією сигналів.

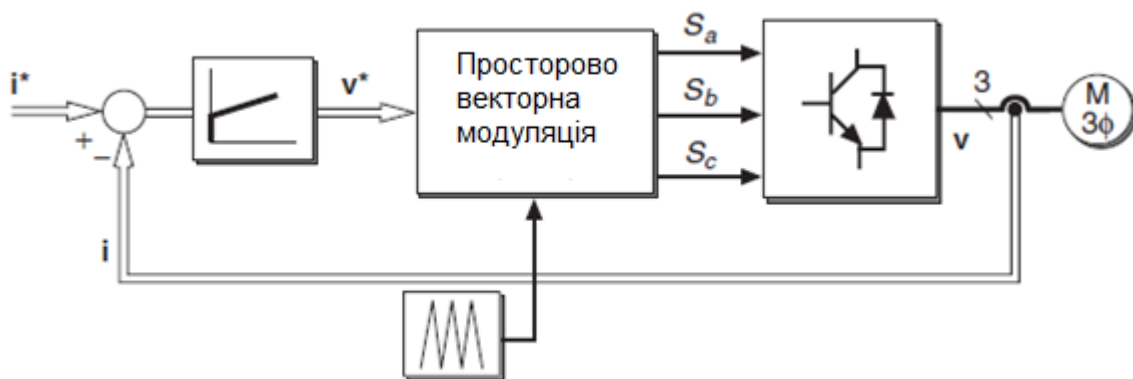


Рисунок 2.6 Структурна схему керування модуляцією сигналів

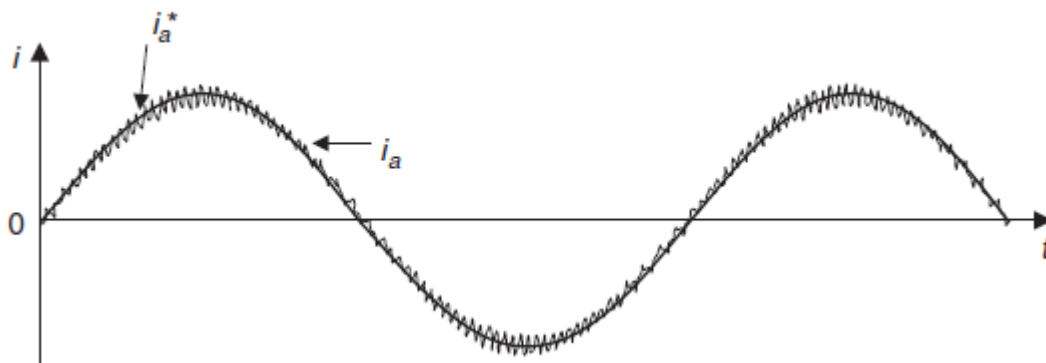


Рисунок 2.7 Форма струму вектору модуляції сигналу



## ***Висновок до розділу 2***

Класичний метод широтно-імпульсного керування при формуванні сигналів завдання засновано на порівнянні лінійного сигналу із сигналами гістерезисного характеру.

Також застосовується у роботі перетворювачів частоти просторова векторна модуляція при створенні керуючого сигналу.

Ці методи є дієвими, але на практиці потребують суттєвих доробок та доопрацювань.

Тому розглянуто можливість доопрацювання класичних методів керування за допомогою створення прогностичної моделі.

Такий підхід дозволяє суттєво скоротити час формування сигналів керування.

### **3. Дослідження способів прямого керування крутним моментом асинхронного двигуна електроприводу з реалізацією прогнозного алгоритму у функції струму**

#### ***3.1 Способи прямого керування крутним моментом асинхронного двигуна з реалізацією прогнозного алгоритму***

Для формування прогностичного керування слід застосовувати варіаційні моделі, що засновані на послідовному визначенні законів керування на основі ймовірнісного підходу та статистичних рівняннях щодо їх розрахунку.

Складемо стохастичне рівняння щодо розрахунку для визначення ймовірнісного стану форми векторів керування.

$$\mathbf{x}(k + 1) = A\mathbf{x}(k) + B\mathbf{u}(k) \quad (3.1)$$

$$\mathbf{y}(k) = C\mathbf{x}(k) + D\mathbf{u}(k) \quad (3.2)$$

Розглянемо узагальнену ймовірнісну функцію прогноз станів векторів керування.

$$J = f(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \dots, \mathbf{u}(k + N)) \quad (3.3)$$

На основі представлених рівнянь наведемо приклад їх застосування щодо формування прогнозного керування використовуючи узагальнюючу функцію.

$$\mathbf{u}(k) = [1 \ 0 \ \dots \ 0] \arg \min_{\mathbf{u}} J \quad (3.4)$$

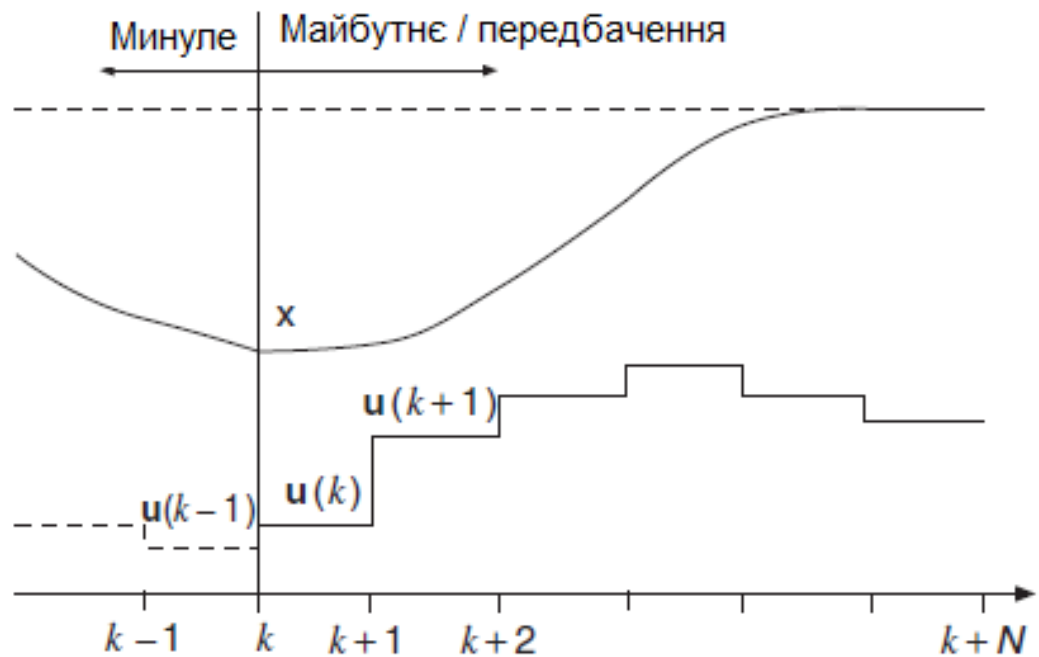


Рисунок 3.2 Приклад застосування стохастичних ймовірнісних рівнянь щодо формування прогнозного керування використовуючи узагальнюючу функцію

### 3.2 Система прямого керування крутним моментом асинхронного двигуна з реалізацією прогнозного алгоритму

Для системи регульованого електроприводу, принципи керування якого засновано на використанні прогнозного керування складено функціональну схему.

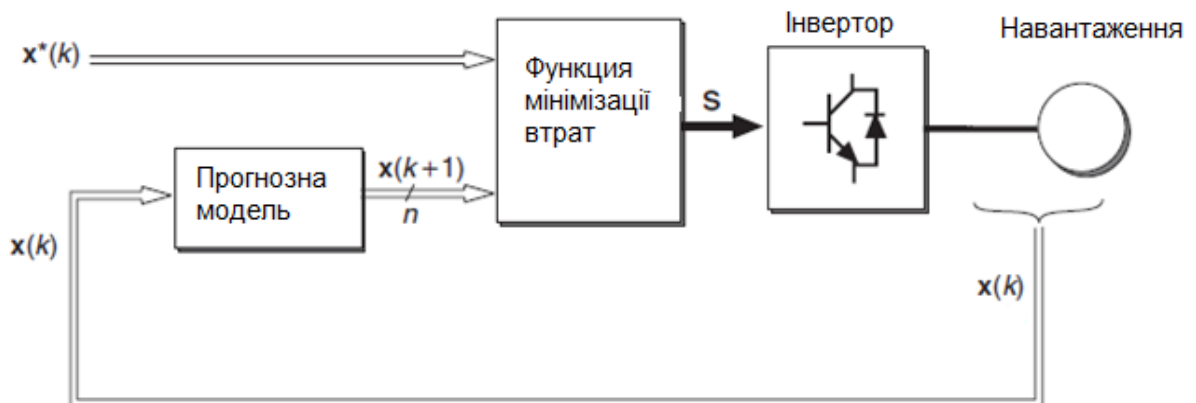


Рисунок 3.4 Функціональна схема системи регульованого електроприводу принципи керування якого засновано на використанні прогнозного керування

### 3.3 Система прямого керування крутним моментом асинхронного двигуна у функції струму

Для системи регульованого електроприводу, принципи керування якого засновано на використанні прогнозного керування складемо функціональну схему системи керування.

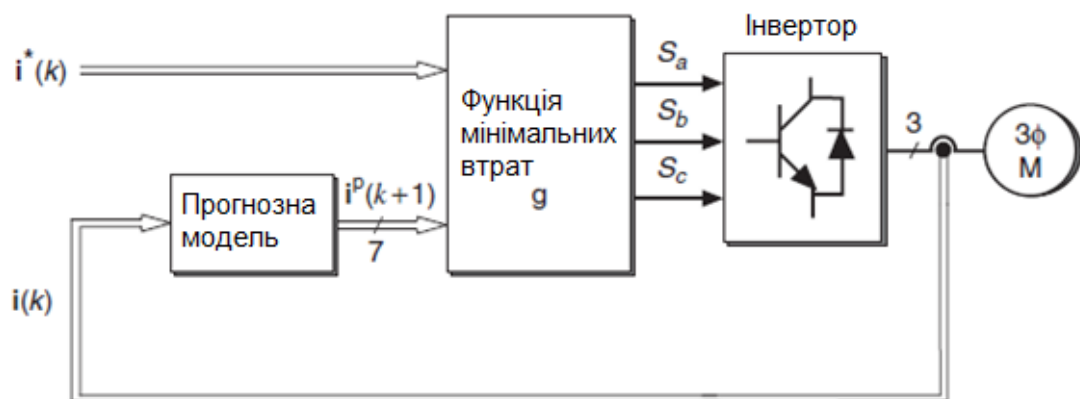


Рисунок 3.5 Функціональна схема системи керування регульованим електроприводом принципи керування якого засновано на використанні прогнозного керування

Представимо комбінацію ввімкнення ключових елементів та відповідні значення вихідної напруги перетворювача у вигляді таблиці станів при здійсненні прогнозного керування.

Таблиця 3.1

Комбінація ввімкнення ключових елементів  
та відповідні значення вихідної напруги перетворювача  
у вигляді таблиці станів  
при здійсненні прогнозного керування

Sa	Sb	Sc	Вектор напруги V
0	0	0	$V_0 = 0$
1	0	0	$V_1 = \frac{2}{3}V_{dc}$
1	1	0	$V_2 = \frac{1}{3}V_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
0	1	0	$V_3 = -\frac{1}{3}V_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
0	1	1	$V_4 = -\frac{2}{3}V_{dc}$
0	0	1	$V_5 = -\frac{1}{3}V_{dc} - j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
1	0	1	$V_6 = \frac{1}{3}V_{dc} - j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
1	1	1	$V_7 = 0$

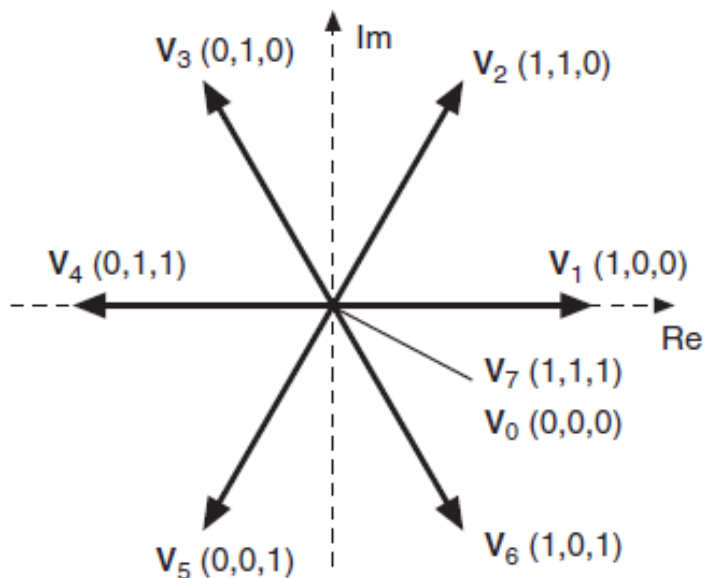


Рисунок 3.6 Комбінація векторів напруги на ключових елементах перетворювача у вигляді станів при здійсненні прогнозного керування

Розглянемо систему рівнянь у контурі струму при здійсненні прогнозного керування.

$$v_{aN} = L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + e_a + v_{nN} \quad (3.5)$$

$$v_{bN} = L \frac{di_b}{dt} + Ri_b + e_b + v_{nN} \quad (3.6)$$

$$v_{cN} = L \frac{di_c}{dt} + Ri_c + e_c + v_{nN} \quad (3.7)$$

де  $R$  - опір,

$L$  - індуктивність.

Тоді у векторній формі:

$$\begin{aligned} \mathbf{v} = L \frac{d}{dt} \left( \frac{2}{3} (i_a + \mathbf{a}i_b + \mathbf{a}^2 i_c) \right) + R \left( \frac{2}{3} (i_a + \mathbf{a}i_b + \mathbf{a}^2 i_c) \right) \\ + \frac{2}{3} (e_a + \mathbf{a}e_b + \mathbf{a}^2 e_c) + \frac{2}{3} (v_{nN} + \mathbf{a}v_{nN} + \mathbf{a}^2 v_{nN}) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Представимо вектори у вигляді:

$$\mathbf{i} = \frac{2}{3} (i_a + \mathbf{a}i_b + \mathbf{a}^2 i_c) \quad (3.9)$$

$$\mathbf{e} = \frac{2}{3} (e_a + \mathbf{a}e_b + \mathbf{a}^2 e_c) \quad (3.10)$$

Тоді:

$$\frac{2}{3} (v_{nN} + \mathbf{a}v_{nN} + \mathbf{a}^2 v_{nN}) = v_{nN} \frac{2}{3} (1 + \mathbf{a} + \mathbf{a}^2) = 0 \quad (3.11)$$

За струмом:

$$\mathbf{v} = R\mathbf{i} + L \frac{d\mathbf{i}}{dt} + \mathbf{e} \quad (3.12)$$



де  $\mathbf{v}$  - вектор напруги інвертору,

$\mathbf{i}$  - вектор струму інвертору,

$\mathbf{e}$  - вектор ЕРС.

Тоді для дискретної системи можна записати наступну систему рівнянь.

$$\frac{d\mathbf{i}}{dt} \approx \frac{\mathbf{i}(k+1) - \mathbf{i}(k)}{T_s} \quad (3.13)$$

Тоді для наступного інтервалу:

$$\mathbf{i}^p(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) \mathbf{i}(k) + \frac{T_s}{L} (\mathbf{v}(k) - \hat{\mathbf{e}}(k)) \quad (3.14)$$

де  $\hat{\mathbf{e}}(k)$  зворотна ЕРС,

$p$  – прогноз зміни.

Запишемо рівняння напруги для контуру струму при здійсненні прогнозного керування.

$$\hat{\mathbf{e}}(k-1) = \mathbf{v}(k-1) - \frac{L}{T_s} \mathbf{i}(k) - \left(R - \frac{L}{T_s}\right) \mathbf{i}(k-1) \quad (3.15)$$

де  $\epsilon(k+1)$  — розрахункове значення  $\epsilon(k+1)$ .

### 3.4 Система прямого керування крутним моментом асинхронного двигуна з реалізацією прогнозного алгоритму у функції струму

Представимо реалізацію стратегії прогнозного керування на прикладі порівняння базового значення струму та значення що отримані у вигляді прогнозу керування.

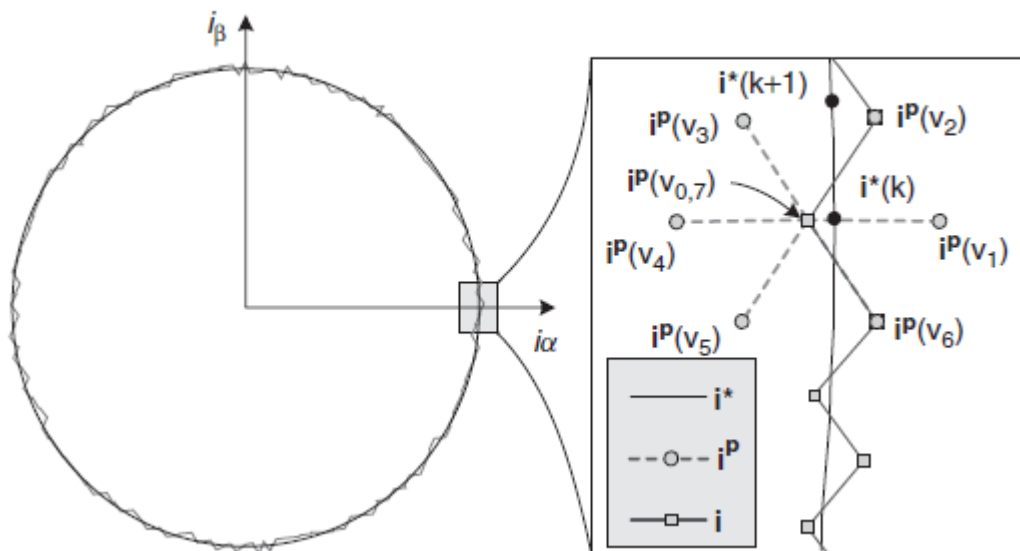
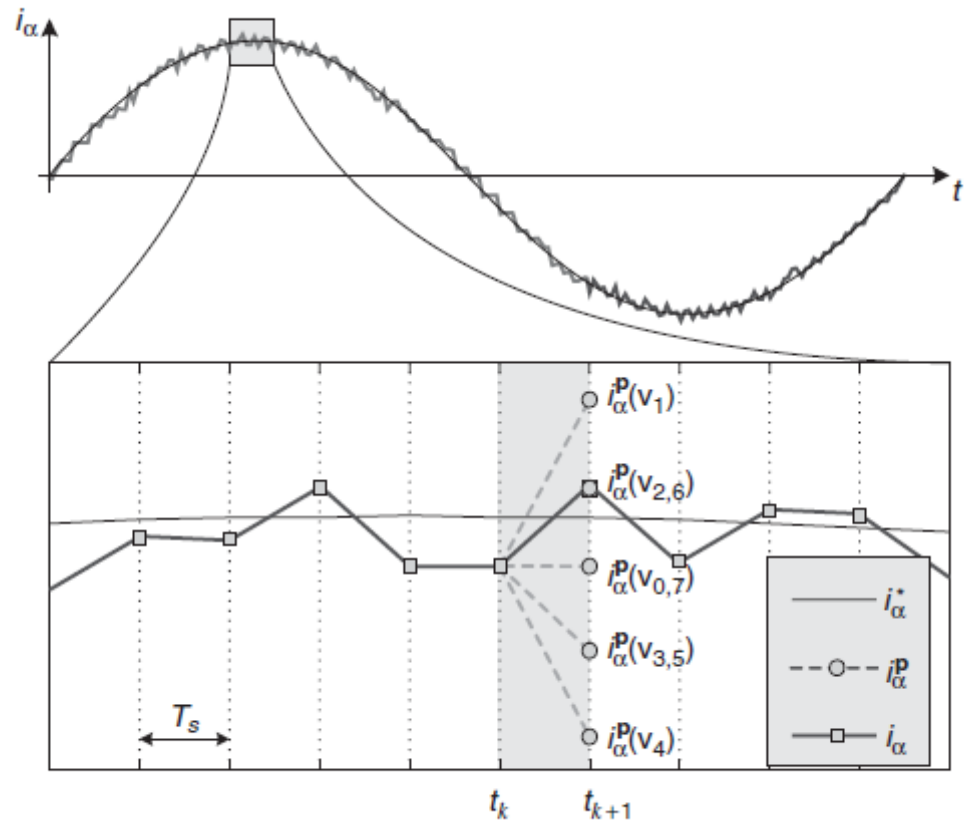


Рисунок 3.7 Принцип реалізації стратегії прогнозного керування на прикладі порівняння базового значення струму та значення що отримані у вигляді прогнозу керування



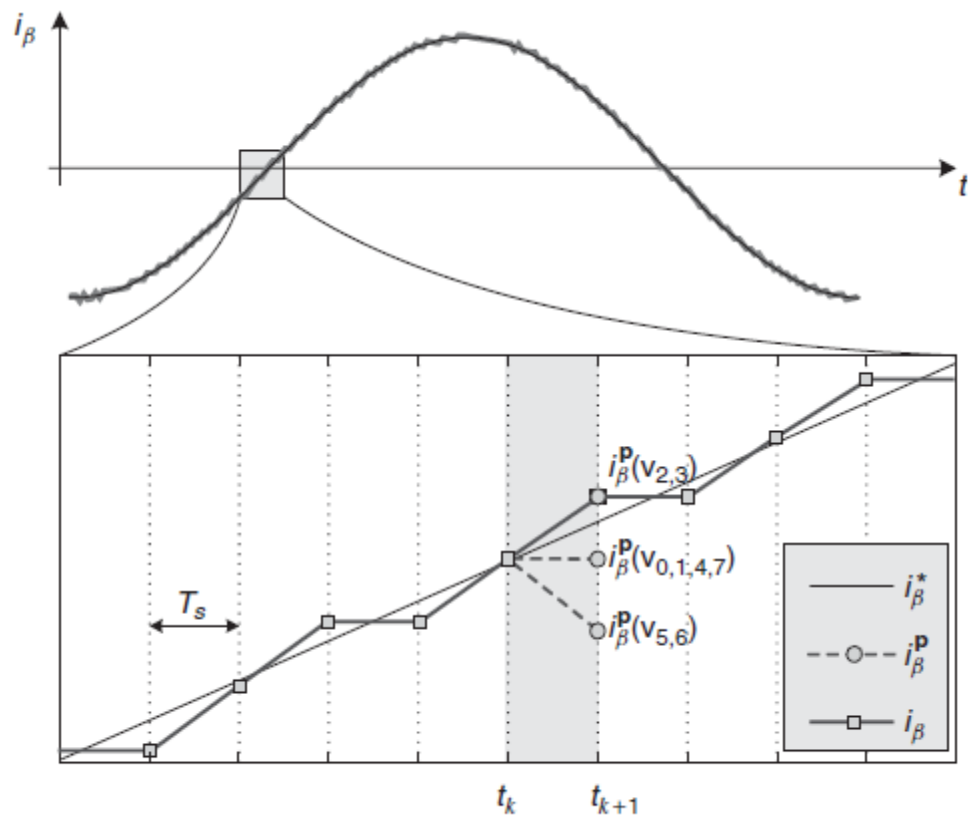


Рисунок 3.8 Принцип реалізації стратегії прогнозного керування на прикладі порівняння базового значення струму та значення що отримані у вигляді прогнозу керування

Наведемо програму розрахунку.

```

ek = v(xop_1) - L/Ts*ik - (R-L/Ts)*ik_1;
g_opt = inf;
for i=1:7
    ik1 = (1-R*Ts/L)*ik + Ts/L*(v(i)-ek);
    g = abs(real(ik_ref-ik1)) + abs(imag(ik_ref-ik1));
    if (g<g_opt)
        g_opt = g;
        x_opt = i;
    end
end
xop_1=xop;
xop=x_opt;

```

де  $i_k = i(k)$ ,  $i_{k+1} = i(k+1)$ ,  $i_{k-1} = i(k-1)$  та  $e_k = e(k)$ .

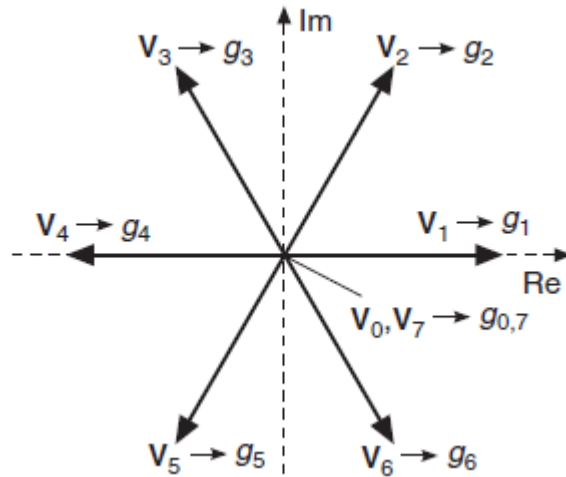


Рисунок 3.9 Принцип реалізації стратегії прогнозного керування на прикладі порівняння векторів керування за базовим значеннями струму та значеннями що отримані у вигляді прогнозу керування

Представимо комбінацію ввімкнення ключових елементів та відповідні значення функції витрат у вигляді таблиці станів при здійсненні прогнозного керування.

Вектор напруги	Функція витрат
V0,V7	$g_{0,7} = 0.60$
V1	$g_1 = 0.82$
V2	$g_2 = 0.24 < \text{оптимальна}$
V3	$g_3 = 0.42$
V4	$g_4 = 0.96$
V5	$g_5 = 1.24$
V6	$g_6 = 1.19$

На основі представленої комбінації ввімкнення ключових елементів та відповідних значень функції витрат у вигляді таблиці станів при здійсненні прогностного керування складемо алгоритм прогностного керування.

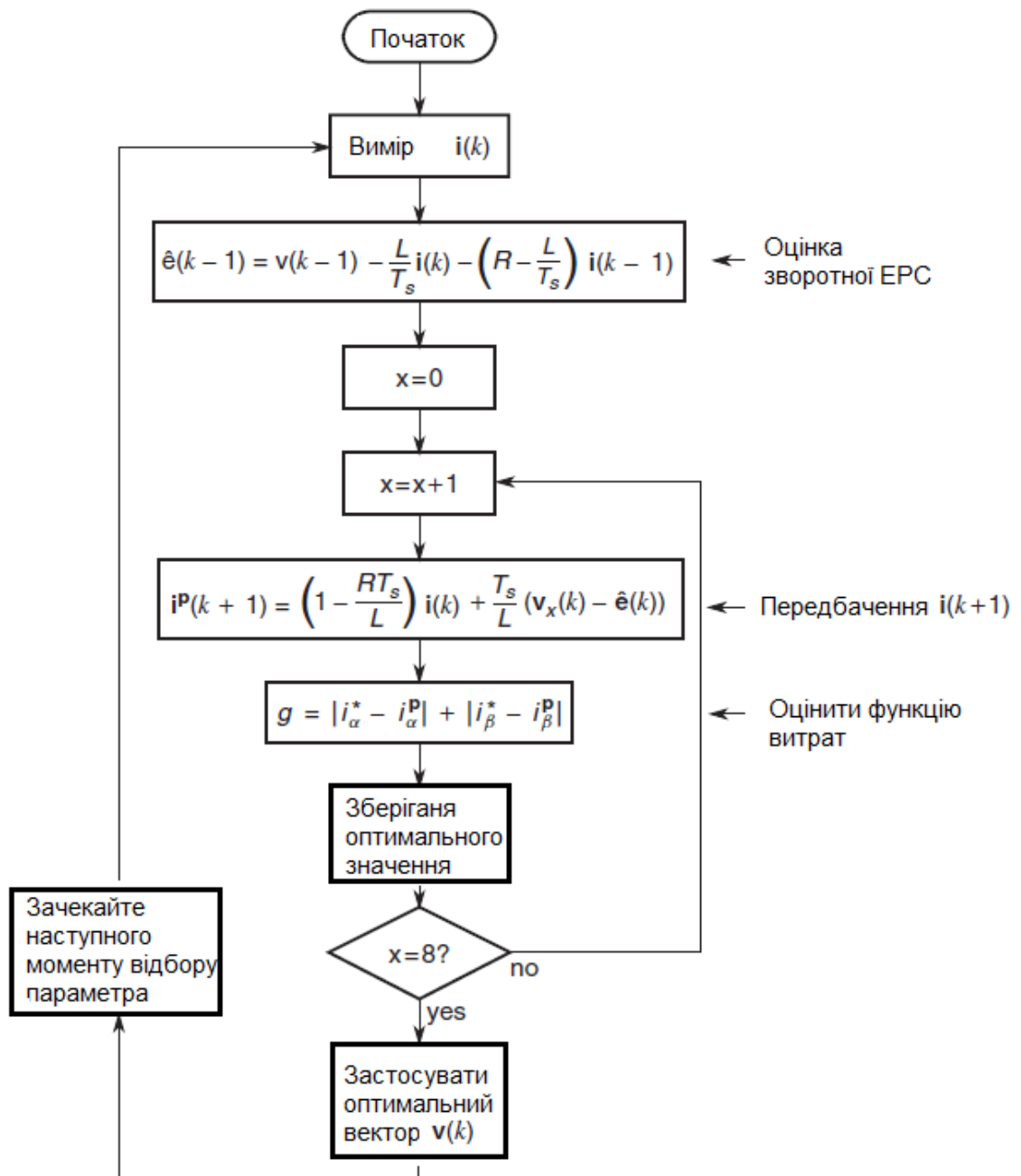


Рисунок 3.10 Алгоритм прогнозного керування на основі представленої комбінації ввімкнення ключових елементів та відповідних значень функції витрат у вигляді таблиці станів при здійсненні прогнозного керування



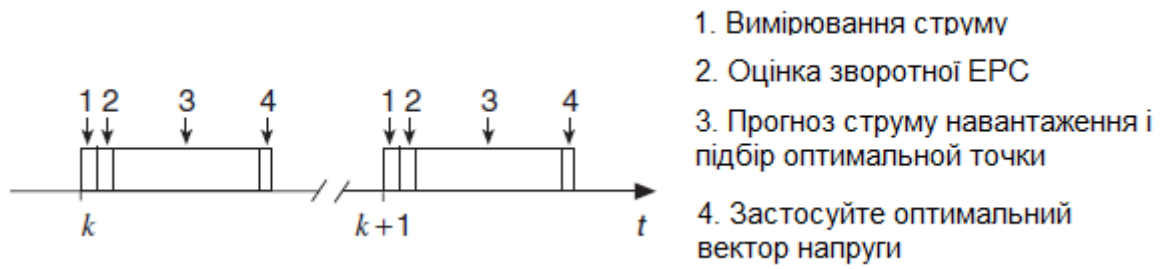


Рисунок 3.11 Приклад роботи у часовому проміжку алгоритму прогнозного керування на основі представленої комбінації ввімкнення ключових елементів та відповідних значень функції витрат у вигляді таблиці станів при здійсненні прогнозного керування

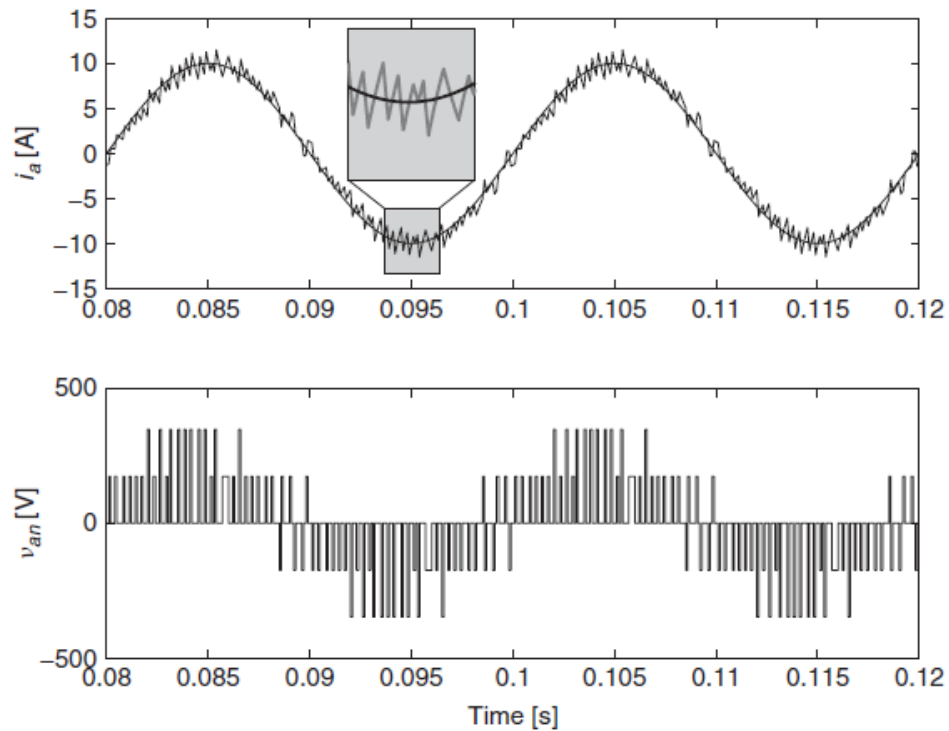


Рисунок 3.12 Графіки струму та напруги перетворювача при застосуванні алгоритму прогнозного керування на основі представленої комбінації ввімкнення ключових елементів та відповідних значень функції витрат у вигляді таблиці станів при здійсненні прогнозного керування (дискретизація  $T_s = 100$  мкс)

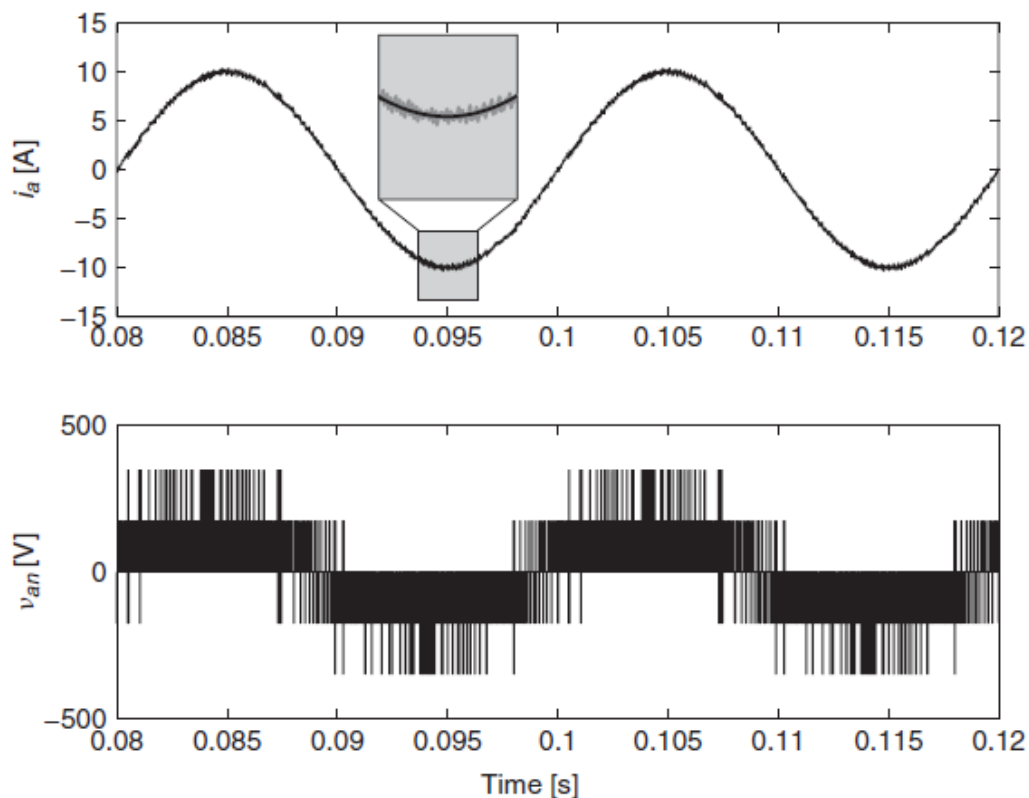


Рисунок 3.13 Графіки струму та напруги перетворювача при застосуванні алгоритму прогнозного керування на основі представленої комбінації ввімкнення ключових елементів та відповідних значень функції витрат у вигляді таблиці станів при здійсненні прогнозного керування (дискретизація  $T_s = 25$  мкс)

### *Висновки до розділу 3*

Сучасний підхід щодо формування програмного управління перетворювачем частоти передбачає розробку нової стратегії керування.

Останні дослідження показують, що методи що засновані на формуванні програмного керування із застосуванням досвіду налагодження параметрів та характеристик роботи системи керування протягом циклічного періоду їх роботи мають доволі суттєвий ефект у порівнянні зі стандартною формою векторного керування електроприводом.

Таким чином доволі цікавими бачаться методи, за допомогою яких можна здійснити прогнозування процесів перетворення електричних параметрів автоматизованих систем електроприводу на основі досвіду прийнятих рішень у відповідності із режимами електроспоживання та діючим навантаженням.

У подібних системах завдання керування створюється на основі прогностичних моделей, що діють на основі функцій варіаційного числення, та покликані поліпшити точність регулювання параметрів електричного двигуна.

Такі системи більш гнучкі до створюваних завад та можуть працювати при наявності процесу невизначеності або втрати сигналу завдання, забезпечивши автономність роботи системи керування на основі отриманого досвіду.

Оскільки такий підхід ще не набув на практиці суттєвого досвіду то подібні структури при розробці буде доцільним порівняти з класичними методами векторного керування.

Формування прогностичного керування здійснюється на основі розроблених алгоритмів попереднього визначення схеми перемикання керованих модулів перетворювача частоти.

Такий підхід дозволяє мінімізувати похибку у формуванні вихідного сигналу напруги, а також скоротити час на прийняття рішень.

Несуттєвим недоліком прогностичного керування перетворювачем частоти є необхідність незначного збільшення розміру комірки пам'яті мікропроцесорного пристрою керування перетворювачем у наслідок збільшення об'єму розрахункових операцій у одному циклі перетворення.

## Висновки

Метою роботи був аналіз способів прямого керування крутним моментом асинхронного двигуна електроприводу з реалізацією прогнозного алгоритму у функції струму.

Об'єктом дослідження був перетворювач частоти асинхронного електроприводу з реалізацією прогнозного алгоритму у функції струму.

Предметом дослідження були принципи реалізації прогнозного алгоритму керування перетворювачем частоти у функції струму.

У першому розділі проведено аналіз систем керування електроприводом з перетворювачем частоти.

Також розглянуто принципи керування асинхронним електроприводом.

Розглянуто такі параметри як швидкодія, сталі часу та показники перетворення керуючих сигналів.

У другому розділі роботи розглянуто питання контролю струму та визначено показники які впливають на процес керування асинхронним електроприводом.

Для системи векторного керування розглянуті математичні вирази для визначення показників керування.

Запропоновано спосіб прямого керування крутним моментом асинхронного двигуна з реалізацією прогнозного алгоритму.

У третьому розділі роботи розроблено математичну модель асинхронного електроприводу та досліджено режими його роботи із

застосуванням прямого керування крутним моментом асинхронного двигуна та реалізацією алгоритму прогнозного керування електроприводом у функції струму.

## Список використаних джерел

1. Чорний О. П. Особливості дослідження моделей електроприводів з асинхронними двигунами при живленні їх від перетворювачів з широтно-імпульсною модуляцією вихідної напруги [Електронний ресурс] / О. П. Чорний, В. К. Титюк // Інженерні та освітні технології в електротехнічних і комп'ютерних системах. - 2013. - № 3. - С. 41-55. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/itot\\_2013\\_3\\_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/itot_2013_3_5)
2. Заровський Р. В. Синтез регулятора для систем із широтно-імпульсною модуляцією під час врахування постійної складової вихідної напруги перетворювача [Електронний ресурс] / Р. В. Заровський // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. - 2013. - № 1. - С. 161-167. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vcndtn\\_2013\\_1\\_26](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vcndtn_2013_1_26)
3. Павлов Г. В. Математична модель перетворювача частоти на основі резонансного інвертора з часо імпульсним керуванням [Електронний ресурс] / Г. В. Павлов, І. Л. Вінниченко // Мікросистеми, Електроніка та Акустика. - 2018. - Т. 23, № 2. - С. 30-36. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/eisv\\_2018\\_23\\_2\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/eisv_2018_23_2_7)
4. Голодний І. М. Аналіз спектрального складу вихідної напруги перетворювача з широтно-імпульсним керуванням [Електронний ресурс] / І. М. Голодний, О. В. Санченко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Техніка та енергетика АПК. - 2012. - Вип. 174(2). - С. 99-105. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau\\_tech\\_2012\\_174\(2\)\\_18](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2012_174(2)_18)
5. Голодний І. М. Комп'ютерна модель трифазного регульованого асинхронного електропривода із широтно-імпульсним перетворювачем [Електронний ресурс] / І. М. Голодний, О. В. Санченко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України.



Серія : Техніка та енергетика АПК. - 2016. - Вип. 242. - С. 97-100. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau\\_tech\\_2016\\_242\\_17](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2016_242_17)

6. Мокренко П. В. Дослідження моделі квантового перетворювача "струм-частота" з імпульсним збудженням [Електронний ресурс] / П. В. Мокренко, І. Т. Стрепко // Комп'ютерні технології друкарства. - 2016. - № 1. - С. 64-78. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ktd\\_2016\\_1\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ktd_2016_1_10)

7. E. F. Camacho and C. Bordons, Model Predictive Control Springer Verlag, 1999.

8. M. P. Kazmierkowski, R. Krishnan, and F. Blaabjerg, Control in power electronics. Academic Press, 2002.

9. N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, Power electronics, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2003.

10. A. Linder, R. Kanchan, P. Stolze, and R. Kennel, Model-Based Predictive Control of Electric Drives. Cuvillier Verlag, 2010.

11. G. C. Goodwin, M. M. Seron, and J. A. D. Dona, Constrained Control and Estimation – An Optimization Perspective. Springer Verlag, 2005.

12. J. M. Maciejowski, Predictive Control with Constraints. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2002.