

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ  
ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ  
ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НА ОСНОВІ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ  
ІДЕНТИФІКАЦІЇ СТАНУ СИСТЕМИ**

**Бакалаврська кваліфікаційна робота**

Здобувач: Михайло ГЕРМАН  
гр. СТ 2023-1у

Керівник: Сергій ЄСАУЛОВ  
доцент, к.т.н.

Харків – 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА  
імені О. М. Бекетова

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури

Кафедра електричного транспорту

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма Електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕТ

 Микола ХВОРОСТ

2026 р.

**ЗАВДАННЯ**  
до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Герман Михайло Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: **Дослідження та моделювання адаптивного керування тяговим електроприводом на основі нейромережевої ідентифікації стану системи**

кваліфікаційної роботи Єсаулов Сергій Михайлович, доцент, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом університету від 22.05.2026 №440-03

2. Строк подання бакалаврської кваліфікаційної роботи 10.06.2026 р.

3. Вихідні дані до бакалаврської роботи Матеріали переддипломної практики, дані по надійності та працездатності основних вузлів електротранспорту, літературні джерела з експлуатації, обслуговуванню та ремонту електротранспорту.

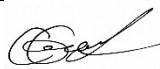
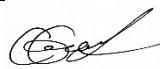




4. Зміст бакалаврської кваліфікаційної роботи :

1. Аналіз тягового електропривода та сучасних методів керування.
2. Розробка моделі адаптивного керування тяговим електроприводом.
3. Моделювання та аналіз результатів.

4. Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу: Актуальність дослідження, мета та завдання роботи. Аналіз тягового електропривода та сучасних методів керування. Розробка моделі адаптивного керування тяговим електроприводом. Структура адаптивної системи керування та нейромережевої ідентифікації. Імітаційне моделювання та перехідні процеси. Охорона праці. Висновки.

### 6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи

Розділ	Ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Сергій ЄСАУЛОВ, доцент		
Антиплагіат	Вікторія ЛЕВЧЕНКО, інженер		
Нормоконтроль	Вячеслав ШАВКУН, доцент		

7. Дата видачі завдання 11.05.2026 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Стан питання	11.05 – 23.05.2026	
2	Розділи 1, 2	18.05 – 30.05.2026	
3	Розділи 3, 4	25.05 – 06.06.2026	
4	Охорона праці та БНС	01.06 – 13.06.2026	
5	Оформлення паперового та електронного варіантів роботи	08.06 – 13.06.2026	
6	Підготовка доповіді та презентації	08.06 – 13.06.2026	

Здобувач

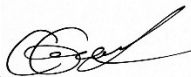


(підпис)

Михайло GERMAN

(ім'я, прізвище)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи



(підпис)

Сергій ЄСАУЛОВ

(ім'я, прізвище)

## АНОТАЦІЯ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі досліджено адаптивне керування тяговим електроприводом на основі нейромережевої ідентифікації стану системи та розроблено імітаційну модель, призначену для аналізу роботи електропривода в змінних режимах експлуатації. У першому розділі проаналізовано особливості тягового електропривода як об'єкта керування, розглянуто традиційні методи регулювання, принципи адаптивного керування, а також нейромережеві методи ідентифікації стану системи. У другому розділі обґрунтовано вибір структури тягового електропривода для моделювання, розроблено математичний опис синхронного двигуна з постійними магнітами, сформовано структуру адаптивної системи керування та нейромережевого блоку ідентифікації стану. У третьому розділі виконано моделювання режимів роботи тягового електропривода, аналіз перехідних процесів та порівняльний аналіз традиційного й адаптивного керування за показниками швидкодії, точності та стійкості до зовнішніх збурень.

У розділі з охорони праці проаналізовано небезпечні й шкідливі виробничі фактори під час дослідження та моделювання адаптивного керування тяговим електроприводом, а також розроблено організаційно-технічні заходи безпеки та виконано розрахунок автоматичного відключення живлення лабораторного стенда при пробі ізоляції на корпус.

У роботі встановлено, що застосування адаптивного керування на основі нейромережевої ідентифікації стану дозволяє покращити якість регулювання тягового електропривода, зменшити перерегулювання, скоротити тривалість перехідних процесів та підвищити стійкість системи до зміни навантаження і зовнішніх збурень.

**Результати апробовано:** Герман М. Ю. АДАПТИВНІ НЕЙРОМЕРЕЖНІ МЕТОДИ НАЛАШТУВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРІВ У СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ // [Матеріали ХІХ Всеукраїнської науково-технічної конференції здобувачів вищої освіти «Сталий розвиток міст: поствоєнний період»](#) (91-ї науково-технічної конференції ХНУМГ ім. О. М. Бекетова) : в 5-и ч. / Ч. 2. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026. С. 7-9

**Ключові слова:** тяговий електропривод, адаптивне керування, нейромережева ідентифікація, синхронний двигун з постійними магнітами, імітаційне моделювання, Simulink, перехідні процеси, електробезпека.

**Пояснювальна записка містить:**  
сторінок – 58, таблиць – 3, рисунків – 15, графічна частина складається з 12 аркушів презентаційного матеріалу.

## ЗМІСТ

Стор.

ВСТУП.....	7
<b>1 АНАЛІЗ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТА СУЧАСНИХ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ .....</b>	<b>10</b>
1.1 Особливості тягового електропривода як об'єкта керування.....	10
1.2 Традиційні системи керування тяговим електроприводом.....	12
1.3 Адаптивне керування в електроприводах.....	14
1.4 Нейромережеві методи ідентифікації стану системи.....	17
Висновки до розділу 1.....	20
<b>2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ.....</b>	<b>21</b>
2.1 Вибір структури тягового електропривода для моделювання.....	21
2.2 Математичний опис тягового електропривода .....	24
2.3 Структура адаптивної системи керування.....	26
2.4 Нейромережевий блок ідентифікації стану.....	28
2.5 Функціональна схема моделі .....	31
Висновки до розділу 2.....	33
<b>3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ .....</b>	<b>34</b>
3.1 Побудова імітаційної моделі системи .....	34
3.2 Дослідження роботи системи в різних режимах .....	36
3.3 Аналіз перехідних процесів.....	38
3.4 Порівняння адаптивного та традиційного керування .....	41
3.5 Оцінка ефективності запропонованого підходу .....	43
Висновки до розділу 3.....	45
<b>4 ОХОРОНА ПРАЦІ .....</b>	<b>46</b>
4.1 Вступ .....	46
4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів .....	46
4.3 Організаційно-технічні заходи щодо забезпечення безпеки .....	47

4.4 Розрахунок заземлення потужності зарядної станції.....	51
Висновки до розділу 4.....	52
ВИСНОВКИ.....	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	56

## ВСТУП

Сучасний розвиток електричного транспорту супроводжується підвищенням вимог до енергоефективності, надійності, динамічних характеристик і точності керування тяговими електроприводами. Саме тяговий електропривод визначає тягово-енергетичні показники транспортного засобу, його здатність працювати в змінних режимах руху, відпрацьовувати пуск, розгін, гальмування та зміну навантаження. У реальних умовах експлуатації параметри електропривода не залишаються сталими: на його роботу впливають коливання навантаження, температурні зміни, режими живлення, зовнішні збурення та нелінійний характер електромеханічних процесів. За таких умов застосування лише традиційних систем керування не завжди забезпечує необхідну якість регулювання.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності тягових електроприводів є використання адаптивного керування, яке дає змогу змінювати параметри регулятора відповідно до поточного стану системи. Особливу зацікавленість викликає поєднання адаптивних алгоритмів із нейромережевими методами ідентифікації стану. На відміну від класичних підходів, що значною мірою спираються на точну математичну модель об'єкта, нейромережеві методи дозволяють оцінювати внутрішні змінні системи та виявляти зміну режиму роботи за сукупністю вимірюваних сигналів. Це відкриває можливість більш гнучкого та точного керування тяговим електроприводом, особливо в умовах параметричної невизначеності та змінного навантаження.

Для сучасних систем електричного транспорту така задача є не лише теоретично цікавою, а й практично значущою. Підвищення якості керування тяговим електроприводом дає змогу зменшити перерегулювання, скоротити тривалість перехідних процесів, підвищити стійкість до збурень і знизити енергетичні втрати. Саме тому дослідження адаптивного керування на основі нейромережевої ідентифікації стану є актуальним напрямом у галузі електромеханічних систем та електричного транспорту.

У роботі розглянуто особливості тягового електропривода як об'єкта керування, проаналізовано традиційні та адаптивні методи регулювання, сформовано математичну модель електропривода, розроблено структуру адаптивної системи керування з нейромережевим блоком оцінювання стану та проведено імітаційне моделювання в різних режимах роботи. Окрему увагу приділено аналізу перехідних процесів і порівнянню традиційного та адаптивного керування, що дозволяє оцінити доцільність використання запропонованого підходу в системах керування тяговими електроприводами.

### **Актуальність теми**

Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення ефективності та якості керування тяговими електроприводами сучасного електричного транспорту в умовах змінного навантаження, зовнішніх збурень і параметричної невизначеності. Традиційні системи керування не завжди забезпечують достатню точність і стійкість у всьому діапазоні режимів роботи. Використання адаптивного керування у поєднанні з нейромережевою ідентифікацією стану дозволяє підвищити швидкодію, зменшити похибку регулювання та покращити динамічні характеристики електропривода, що робить цей напрям дослідження актуальним як з наукової, так і з практичної точки зору.

**Метою** бакалаврської кваліфікаційної роботи є дослідження та моделювання адаптивного керування тяговим електроприводом на основі нейромережевої ідентифікації стану системи з метою підвищення якості регулювання в умовах змінних режимів роботи.

**Об'єктом дослідження** є процеси керування тяговим електроприводом у змінних режимах експлуатації.

**Предметом дослідження** є методи адаптивного керування тяговим електроприводом та нейромережевої ідентифікації стану системи.

**Практична значущість роботи** полягає у розробленні імітаційної моделі адаптивної системи керування тяговим електроприводом, яка може бути використана для дослідження динамічних режимів, оцінювання якості регулювання та подальшого вдосконалення алгоритмів керування електричним

транспорт. Отримані результати можуть бути використані в навчальному процесі, при виконанні подальших наукових досліджень, а також як основа для розроблення більш ефективних систем керування сучасними тяговими електроприводами.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Проаналізувати особливості тягового електропривода як об'єкта керування та визначити основні чинники, що впливають на якість його роботи.
2. Розглянути традиційні та сучасні методи керування тяговими електроприводами, визначити їх переваги, недоліки та обмеження в умовах змінного навантаження.
3. Дослідити принципи адаптивного керування електроприводами та можливості використання нейромережевих методів для ідентифікації стану системи.
4. Обрати структуру тягового електропривода для моделювання та сформулювати його математичний опис.
5. Розробити структуру адаптивної системи керування тяговим електроприводом із нейромережевим блоком ідентифікації стану.
6. Побудувати імітаційну модель системи в середовищі MATLAB Online / Simulink.
7. Провести дослідження роботи системи в режимах пуску, зміни задавального сигналу, зміни навантаження та дії зовнішніх збурень.
8. Виконати аналіз перехідних процесів за швидкістю ротора, електромагнітним моментом і струмами статора.
9. Порівняти показники якості традиційного та адаптивного керування та оцінити ефективність запропонованого підходу.
10. Розробити заходи з охорони праці під час дослідження та моделювання тягового електропривода.

# 1 АНАЛІЗ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТА СУЧАСНИХ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ

## 1.1 Особливості тягового електропривода як об'єкта керування

Тяговий електропривод є ключовою функціональною частиною сучасного електричного транспорту, оскільки саме він забезпечує перетворення електричної енергії на механічну енергію руху, формує тягове зусилля транспортного засобу та істотно впливає на його динамічні, енергетичні й експлуатаційні характеристики [1–3]. У сучасних електромобілях, електробусах, трамваях, тролейбусах і рейковому транспорті тяговий електропривод вже не розглядається як окремий двигун із простим регулятором. Він є складною електромеханічною системою, до якої входять тяговий двигун, силовий перетворювач, джерело живлення, система керування, датчики та допоміжні вузли, що функціонують у режимі постійної взаємодії [1, 2]. Таке ускладнення структури безпосередньо пов'язане з підвищенням вимог до енергоефективності, екологічності, безпеки та надійності сучасного транспорту.

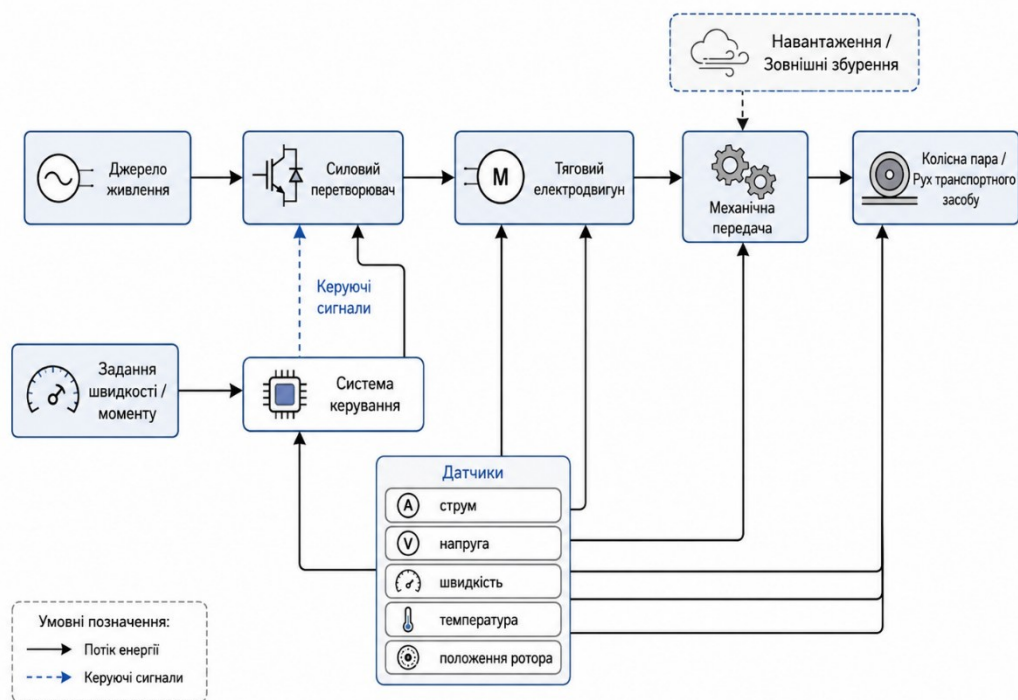


Рисунок 1.1 – Структурна схема тягового електропривода як об'єкта керування

Однією з головних особливостей тягового електропривода як об'єкта керування є його робота в широкому діапазоні режимів. У процесі експлуатації система повинна забезпечувати рушання з місця, розгін, стабілізацію швидкості, рух зі змінним навантаженням, рекуперативне та електродинамічне гальмування, а також роботу в умовах зміни профілю шляху, маси транспортного засобу, коефіцієнта зчеплення та параметрів живлення [2, 3]. Усе це означає, що тяговий електропривод функціонує не в стаціонарному, а в постійно змінному середовищі. Саме тому для нього недостатньо систем керування, орієнтованих лише на один номінальний режим. Транспортний режим завжди поєднує електромеханічну динаміку двигуна з динамікою руху самого транспортного засобу, а отже об'єкт керування стає багатофакторним і суттєво нелінійним [3].

Сучасні дослідження показують, що в електротранспорті найбільш поширеними є асинхронні тягові двигуни та синхронні машини з постійними магнітами. Перші вирізняються конструктивною простотою, надійністю та відносно нижчою вартістю, тоді як другі забезпечують вищу питому потужність, кращу енергоефективність і кращі масогабаритні показники [1, 2]. Однак незалежно від типу двигуна для транспортного застосування критичними залишаються не лише статичні характеристики, а й здатність системи зберігати точність і стійкість під дією збурень. У цьому сенсі тяговий електропривод не можна вважати об'єктом із фіксованими параметрами, такими як температура обмоток, коливання напруги, зміни навантаження, асиметрії живлення та механічні збурення змінюють його поведінку в часі [2, 4]. Саме ця обставина ускладнює побудову ефективного регулятора.

Оглядові праці, присвячені тяговим приводам, переконливо демонструють, що їхній розвиток сьогодні відбувається у напрямі інтеграції з більш складною енергетичною інфраструктурою, включно з акумуляторними системами, гібридними джерелами живлення та сучасною силовою електронікою [1, 2]. Водночас навіть ґрунтовні огляди переважно фокусуються на архітектурі систем, типах машин і силових перетворювачів, але не розв'язують повністю задачу

оперативного оцінювання поточного стану привода для корекції керування в реальному часі [1, 2]. Отже, уже на рівні аналізу об'єкта виявляється головна суперечність, зокрема, що транспортна тяга вимагає гнучкого, стійкого й точного керування в умовах змінності параметрів, проте класична модель об'єкта не завжди достатньо точно відображає його поточний стан.

Таким чином, тяговий електропривод доцільно розглядати як складний нелінійний об'єкт керування, для якого характерні багаторежимність, параметрична невизначеність, чутливість до зовнішніх збурень і високі вимоги до точності регулювання. Це безпосередньо підводить до необхідності аналізу традиційних систем керування та пошуку більш гнучких підходів, зокрема адаптивних і нейромережових [1–4].

## **1.2 Традиційні системи керування тяговим електроприводом**

Історичний розвиток систем керування тяговими електроприводами відбувався від відносно простих схем до високоточних цифрових алгоритмів. На ранніх етапах поширення асинхронного електропривода найчастіше застосовувалося скалярне керування, засноване на підтриманні співвідношення між напругою і частотою живлення. Його головною перевагою є простота реалізації та невисокі вимоги до обчислювальних ресурсів [4]. Однак у тягових застосуваннях, де необхідні швидкі зміни моменту, висока точність підтримання швидкості та стабільна робота при раптових змінах навантаження, скалярний підхід виявляє суттєві обмеження. Він не забезпечує незалежного керування потоком і моментом, а тому поступається більш сучасним методам у динамічних режимах [4, 5].

Подальшим етапом розвитку стало векторне керування, яке дало змогу математично розділити канали формування магнітного потоку та електромагнітного моменту. Саме це забезпечило значно кращі динамічні характеристики привода, підвищення точності регулювання швидкості та

можливість ефективної роботи в широкому діапазоні режимів [4, 5]. Для транспортних систем векторне керування стало фактично стандартом, оскільки дає можливість реалізувати властивості, подібні до керування двигуном постійного струму, але на базі більш надійних і технологічних машин змінного струму [5]. Водночас навіть у цій групі систем існують обмеження, коли їхня ефективність суттєво залежить від коректності математичної моделі та точності визначення параметрів двигуна, які в реальних умовах можуть змінюватися [4, 5].



Рисунок 1.2 – Основні традиційні методи керування тяговим електроприводом

Окреме місце посідає пряме керування моментом, яке орієнтоване на швидку реакцію системи на зміну навантаження та дає високу швидкодію під час перехідних процесів [6]. Для тягових приводів це особливо важливо, оскільки рух електричного транспорту супроводжується частими змінами моменту опору, випадковими коливаннями зчеплення та впливом профілю шляху [6]. Проте

перевага високої швидкодії тут поєднується з іншою проблемою, коли DTC, як правило, має вищі пульсації моменту та також потребує достатньо точного уявлення про поточний стан системи. Тобто традиційні методи керування демонструють різні компроміси між простотою, точністю, швидкістю та стійкістю до збурень [4–6].

Особливо цінними для оцінки меж традиційних підходів є праці, у яких моделюються не лише нормальні, а й асиметричні та аварійні режими. У роботі S. Goolak та співавт. показано, що при дефектах вихідного перетворювача або асиметрії обмоток тягового двигуна змінюються пульсації моменту, баланс фазних струмів і, відповідно, енергетичні показники привода [4]. У пізнішій праці цих же дослідників порівнюються системи векторного керування і DTC в умовах стохастичних збурень, зміни моменту навантаження та ковзання коліс, і автори прямо фіксують, що реальна експлуатація тягового привода є значно менш детермінованою, ніж це передбачається класичними спрощеними моделями [6].

Таким чином, аналіз традиційних систем керування тяговим електроприводом дає підстави стверджувати, що скалярне, векторне та моментне керування забезпечують прийнятні результати лише за умови достатньої визначеності параметрів об'єкта та режимів його роботи [4–6]. Однак у транспортних системах така визначеність є радше винятком, ніж правилом. Саме тому розвиток тягових електроприводів закономірно веде до адаптивних підходів, здатних коригувати параметри регулятора залежно від поточного стану системи.

### **1.3 Адаптивне керування в електроприводах**

Адаптивне керування є логічним продовженням розвитку класичних систем автоматичного регулювання, коли стало очевидно, що фіксовані налаштування регулятора не забезпечують потрібної якості в умовах змінного навантаження, невизначеності параметрів і наявності зовнішніх збурень [7–9].

Для електропривода суть адаптації полягає в тому, що параметри керування змінюються не один раз під час налагодження, а автоматично коригуються в процесі роботи відповідно до поточного стану об'єкта [7]. Такий підхід особливо важливий для тягового електропривода, оскільки транспортний режим завжди пов'язаний із безперервною зміною навантаження, швидкості, умов зчеплення, режимів гальмування та параметрів живлення [3, 9].

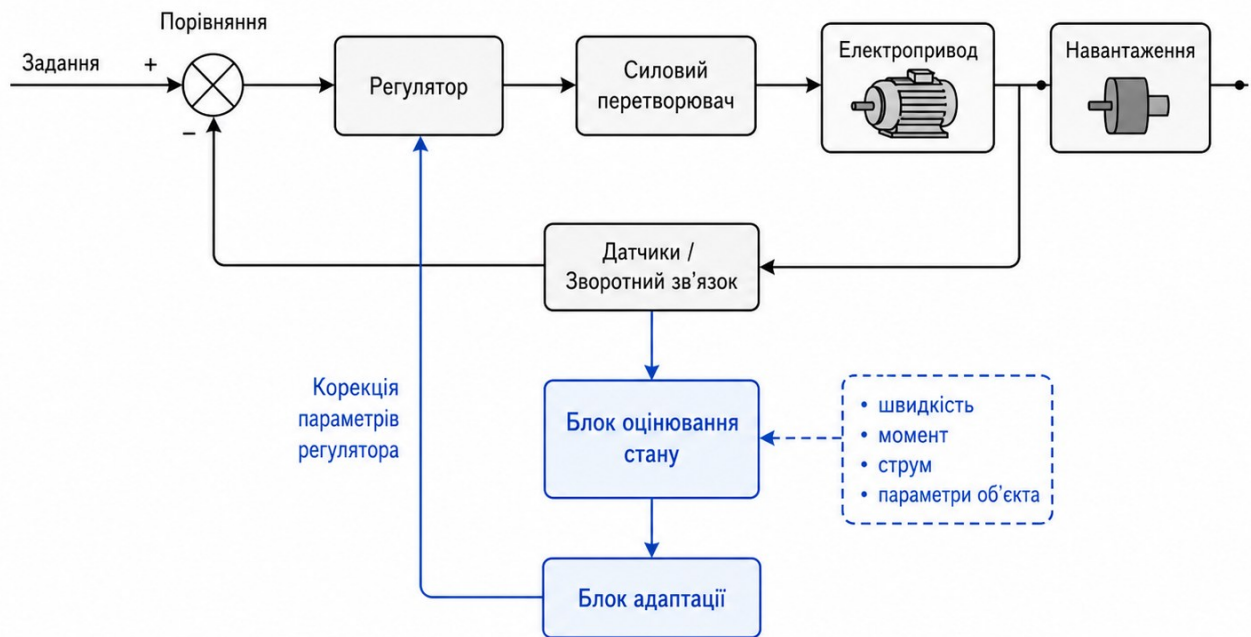


Рисунок 1.3 – Узагальнена структура адаптивної системи керування електроприводом

Методологічно адаптивні системи можна поділити на прямі та непрямі. У непрямих структурах спочатку виконується оцінювання параметрів об'єкта або його стану, а вже потім на цій основі перебудовуються параметри регулятора [7]. У прямих системах корекція здійснюється безпосередньо за сигналами входу і виходу, без окремого явного етапу ідентифікації параметрів [7]. Практика показує, що обидва підходи мають право на існування, проте їхня ефективність визначається точністю оцінювання поточного стану системи. Якщо система не “розуміє”, у якому режимі вона реально працює, адаптація перетворюється на формальну процедуру без гарантованого покращення якості керування. Саме

тому в сучасних структурах адаптивного керування особливого значення набуває блок оцінювання стану [7, 8].

У науковій літературі адаптивне керування часто розглядається на прикладі електроприводів із пружними механічними зв'язками, де зміна моменту інерції, жорсткості чи навантаження призводить до появи коливальних процесів і потребує гнучкої перебудови регулятора [7, 8]. Хоча такі роботи не присвячені безпосередньо тяговому транспортному приводу, вони мають важливе методологічне значення для розглядуваної теми. Вони переконливо показують, що жорстко налаштований регулятор поступається адаптивній структурі там, де об'єкт є змінним, а модель – неповною [7, 8]. Особливо показовою є праця М. Kamiński та К. Szabat, у якій поєднано адаптивне керування з нейронним опрацюванням даних, тобто зроблено крок від класичної адаптації до інтелектуалізованої [8]. Проте і в цьому випадку об'єктом дослідження є не транспортна тяга як така, а загальний електропривод зі складною механічною динамікою. Отже, транспортно-орієнтоване узагальнення цього підходу залишається відкритим.

Праця Xi Zhang є важливою тим, що переводить дискусію з рівня окремого електропривода на рівень транспортної електрифікації загалом [9]. Автор наголошує, що електроприводи в транспортних засобах на альтернативних джерелах енергії стикаються з новими вимогами – бездатчикове керування, режим ослаблення магнітного потоку, узгодження привода із системами накопичення енергії, узагальненого моделювання всієї електромеханічної системи [9]. Це означає, що адаптивність уже не є “додатковою опцією”, а стає необхідною умовою для підтримання належної якості керування. Разом з тим ця праця радше окреслює концептуальні напрями розвитку, ніж пропонує компактне прикладне рішення для тягового електропривода на основі нейромережевої ідентифікації стану. Саме в цьому й полягає невирішена частина проблеми, яка визначає актуальність розглядуваної теми роботи.

Отже, аналіз літератури дає підстави стверджувати, що адаптивне керування є обґрунтованим і перспективним підходом для електроприводів, що

працюють у змінних режимах [7–9]. Для тягових систем його доцільність зумовлена багаторежимністю руху, параметричною невизначеністю та необхідністю підтримувати високу точність керування в реальному часі. Проте повноцінне поєднання адаптивної структури з інтелектуальним оцінюванням стану саме транспортного тягового привода ще не має у відкритій літературі єдиного завершеного розв’язання.

### 1.4 Неймережеві методи ідентифікації стану системи

У сучасних системах керування електроприводами задача ідентифікації стану системи є однією з базових. Під станом системи розуміють сукупність змінних, які характеризують її поточний режим і визначають подальшу динаміку процесів. Для тягового електропривода до таких змінних можуть належати швидкість ротора, електромагнітний момент, потік, навантажувальний момент, температурний стан, а в розширеному трактуванні – також ознаки перевантаження чи розвитку несправностей [10–12]. Проблема полягає в тому, що не всі ці змінні можна безпосередньо виміряти; частина з них визначається непрямо на основі моделей, датчиків і алгоритмів оцінювання [12].

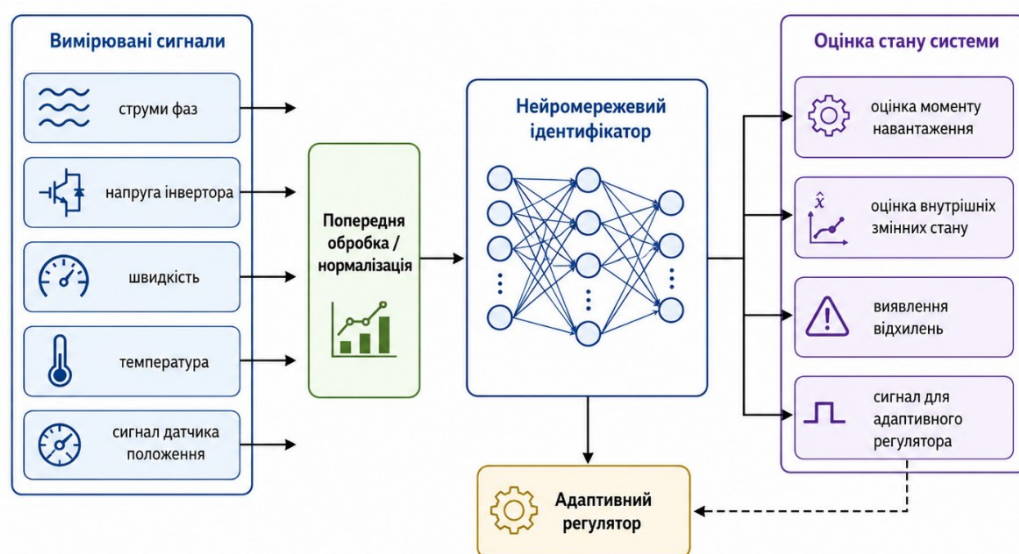


Рисунок 1.4 – Схема неймережевої ідентифікації стану тягового електропривода

Класичні спостерігачі стану та аналітичні оцінювачі ефективні доти, доки математична модель об'єкта є достатньо точною. Однак для тягового електропривода це припущення часто порушується: параметри змінюються через нагрів, старіння, зміну навантаження, коливання живлення та нелінійний характер електромеханічних процесів [4, 6, 12]. Саме тому в останні роки суттєво зріс інтерес до нейромережових методів, здатних працювати не лише з аналітичним описом, а й з експериментальними даними [10, 11]. У цьому полягає їхня принципова перевага, коли нейронна мережа може апроксимувати складні нелінійні залежності між вимірюваними сигналами та невимірюваними змінними стану, навіть якщо повна точна модель об'єкта відсутня або є надто громіздкою [10].

Оглядова праця М. Kamiński та Т. Tarczewski систематизує використання нейромереж в електроприводах за кількома напрямками: керування, оцінювання станних змінних, діагностика, оптимізація та робота з силовими перетворювачами [10]. Це важливо, оскільки дозволяє розглядати нейромережеву ідентифікацію не як випадковий модний інструмент, а як закономірний етап еволюції електроприводних систем. При цьому самі автори фактично показують, що нейромережі особливо доречні там, де звичайні математичні спостерігачі втрачають точність через невизначеність об'єкта або складність його динаміки [10]. Але навіть у цій фундаментальній оглядовій праці питання інтеграції нейромережевого оцінювача саме в контур адаптивного керування тяговим електроприводом не розгорнуто як завершену прикладну модель.

Конкретні дослідження нейромережевого оцінювання змінних стану підтверджують високу перспективність цього підходу. У праці G. Kaczmarczyk, R. Stanisławski та М. Kamiński показано, що глибокі нейронні мережі можуть точно оцінювати станні змінні динамічної системи без необхідності створення надто деталізованого аналітичного опису [11]. Хоча об'єктом дослідження в цій роботі є двомасова система, а не транспортний тяговий привід, її методологічний

висновок є принципово важливим, зокрема, при складній, слабо формалізованій динаміці доцільно переходити від суто модельно-орієнтованих спостерігачів до нейромережових оцінювачів [11]. Саме ця логіка добре відповідає природі тягового електропривода, де режими руху, навантаження та зовнішні умови роблять поведінку системи змінною в часі.

Варто також врахувати, що в транспортному електроприводі давно існує потреба в оцінюванні невимірюваних змінних без використання зайвих датчиків. Це яскраво видно на прикладі бездатчикових систем керування PMSM, у яких швидкість або положення ротора визначаються непрямими методами за електричними сигналами [12]. Хоча праця D. Yousfi, A. Elbacha та A. Ait Ouahman ще належить до класу модельно-орієнтованих *sensorless*-рішень, вона чітко показує, що сама постановка задачі— оцінити прихований стан системи без прямого вимірювання— давно є центральною для транспортної тяги [12]. У цьому сенсі нейромережові методи не виникають “з нуля”, а є наступним, більш гнучким етапом розвитку засобів оцінювання стану.

Разом із перевагами нейромережові методи мають і суттєві обмеження. Вони потребують достатніх масивів даних для навчання, чутливі до якості вибірки, вимагають обґрунтованого вибору архітектури та мають ризик перенавчання [10, 11]. Крім того, в транспортних задачах важливо не лише отримати точну оцінку стану, а й забезпечити обчислювальну придатність алгоритму для роботи в реальному часі. Тому практична цінність нейромережової ідентифікації визначається не тільки точністю, а й здатністю інтегруватися в реальний контур керування без надмірного ускладнення системи [10]. Саме ця вимога є ключовою для бакалаврської роботи, де потрібно обґрунтувати не абстрактну “силу нейромереж”, а доцільність конкретного функціонального використання нейромережового блоку в структурі адаптивного керування тяговим електроприводом.

Отже, аналіз нейромережових методів ідентифікації стану системи показує, що вони мають істотний потенціал для сучасних електроприводів, особливо в умовах нелінійності, параметричної невизначеності та неповної вимірюваності

станних змінних [10–13]. Разом з тим у більшості доступних відкритих праць або розглядаються загальні огляди нейромережових застосувань, або досліджуються нетранспортні лабораторні об'єкти, або йдеться лише про бездатчикове оцінювання без повної адаптивної інтеграції [10–13]. Отже, можна сказати, що поєднання нейромережової ідентифікації стану з адаптивним керуванням тяговим електроприводом залишається актуальною та недостатньо завершеною науково-практичною задачею, що і визначає доцільність подальшого моделювання в межах цієї бакалаврської роботи.

## **Висновки до розділу 1**

Проведений аналіз літературних джерел дозволяє зробити кілька узагальнених висновків. По-перше, тяговий електропривод є складним нелінійним об'єктом керування, чутливим до зміни навантаження, режимів руху, параметрів живлення та зовнішніх збурень [1–3]. По-друге, традиційні системи керування— скалярні, векторні та системи прямого керування моментом— забезпечують задовільні результати в межах прийнятих моделей, проте втрачають універсальність при параметричній невизначеності та стохастичному характері експлуатації [4–6]. По-третє, адаптивне керування є закономірним напрямом розвитку електроприводних систем, оскільки дозволяє підлаштовувати параметри регулятора до поточного стану об'єкта, однак у відкритій літературі ще не сформовано компактного завершеного транспортно-орієнтованого рішення для тягового привода [7–9]. По-четверте, нейромережові методи ідентифікації стану демонструють високу перспективність для оцінювання невимірюваних змінних у складних електромеханічних системах, але їх інтеграція в контур адаптивного керування тяговим електроприводом залишається недостатньо опрацьованою [10–13]. Саме ця невирішеність і формує науково-практичне підґрунтя для подальшого розроблення моделі адаптивного керування тяговим електроприводом на основі нейромережової ідентифікації стану системи.

## 2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

### 2.1 Вибір структури тягового електропривода для моделювання

Для моделювання в даній роботі приймається тяговий електропривод на базі синхронного двигуна з постійними магнітами. Такий вибір є обґрунтованим, оскільки саме PMSM-приводи широко застосовуються в сучасному електричному транспорті завдяки високій енергоефективності, значній питомій потужності, хорошим масогабаритним показникам і можливості точного регулювання моменту та швидкості.

Як базовий об'єкт дослідження прийнято двигун типу **AMXE250** виробництва АВВ, призначений для електробусів та важких електричних транспортних засобів. Цей двигун синхронний тяговий електродвигун з постійними магнітами, що характеризується високою питомою потужністю, рідинним охолодженням, максимальною потужністю 436 кВт, максимальним крутним моментом 3353 Н·м та граничною частотою обертання 3500 об/хв.

Основні технічні параметри двигуна, прийнятого для моделювання, наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні параметри тягового двигуна, прийняті для моделювання

Параметр	Позначення	Значення
Тип двигуна	–	PMSM AMXE250
Максимальна потужність	$P_{max}$	436 кВт
Максимальний момент	$M_{max}$	3353 Н·м
Гранична частота обертання	$n_{max}$	3500 об/хв
Тип охолодження	–	рідинне
Кількість фаз	–	3
Тип датчика положення	–	резольвер

Наведені в табл. 2.1 параметри характеризують обраний тяговий двигун як сучасний високоефективний об'єкт транспортного застосування. Для цілей імітаційного дослідження ці дані є достатніми для формування узагальненого

уявлення про технічний рівень привода та обґрунтування вибору PMSM як базового об'єкта моделювання.

Вибір саме такого типу двигуна для моделювання доцільний з кількох причин. По-перше, синхронні машини з постійними магнітами є одними з найперспективніших для транспортних систем, де важливими є високий ККД, широкий діапазон регулювання швидкості та ефективна робота у режимах розгону й рекуперативного гальмування. По-друге, для такого двигуна є доцільним застосування векторного керування, яке добре узгоджується з подальшим введенням адаптивного контуру. По-третє, PMSM є зручним об'єктом для побудови узагальненої математичної моделі в координатах  $d$ - $q$ , що широко використовується в задачах імітаційного моделювання.

У межах роботи не ставиться задача повного відтворення всіх конструктивних і теплових особливостей реального тягового привода. Тому при побудові моделі приймаються такі припущення. Напруга живлення від інвертора вважається керованою величиною. Параметри обмоток статора та магнітний потік від постійних магнітів у межах одного режиму моделювання приймаються сталими. Механічна передача і колісна пара подаються у вигляді еквівалентного моменту навантаження, приведенного до вала двигуна. Вплив насичення магнітної системи, просторових гармонік і втрат у сталі в базовій моделі не враховується, оскільки для бакалаврської роботи важливішим є дослідження загальної структури адаптивного керування, а не поглиблена електромагнітна деталізація.

До основних параметрів, які враховуються в моделі, належать активний опір обмотки статора, індуктивності по осях  $d$  і  $q$ , магнітний потік від постійних магнітів, момент інерції, коефіцієнт в'язкого тертя, електромагнітний момент і момент навантаження. Крім того, у моделі враховуються сигнали, доступні для вимірювання: швидкість ротора, фазні струми, напруга інвертора, температура обмоток і сигнал датчика положення. Саме ці сигнали далі використовуються в нейромережевому блоці ідентифікації стану.

Отже, для подальшого моделювання прийнято структуру тягового електропривода, що складається з силового перетворювача, синхронного двигуна

з постійними магнітами, механічного навантаження, системи керування, датчиків зворотного зв'язку та нейромережевого блоку оцінювання стану. Така структура є достатньою для побудови імітаційної моделі, що дозволяє дослідити вплив адаптації на якість керування в умовах змінного навантаження.

Структуру тягового електропривода, прийнятого для подальшого моделювання, наведено на рисунку 2.1.

Як видно з рисунка 2.1, у моделі тягового електропривода основними функціональними елементами є силовий перетворювач, синхронний двигун з постійними магнітами, механічне навантаження та система керування із зворотними зв'язками. Така структура дозволяє врахувати як електромагнітні, так і механічні процеси, що визначають динаміку привода в транспортному режимі роботи.

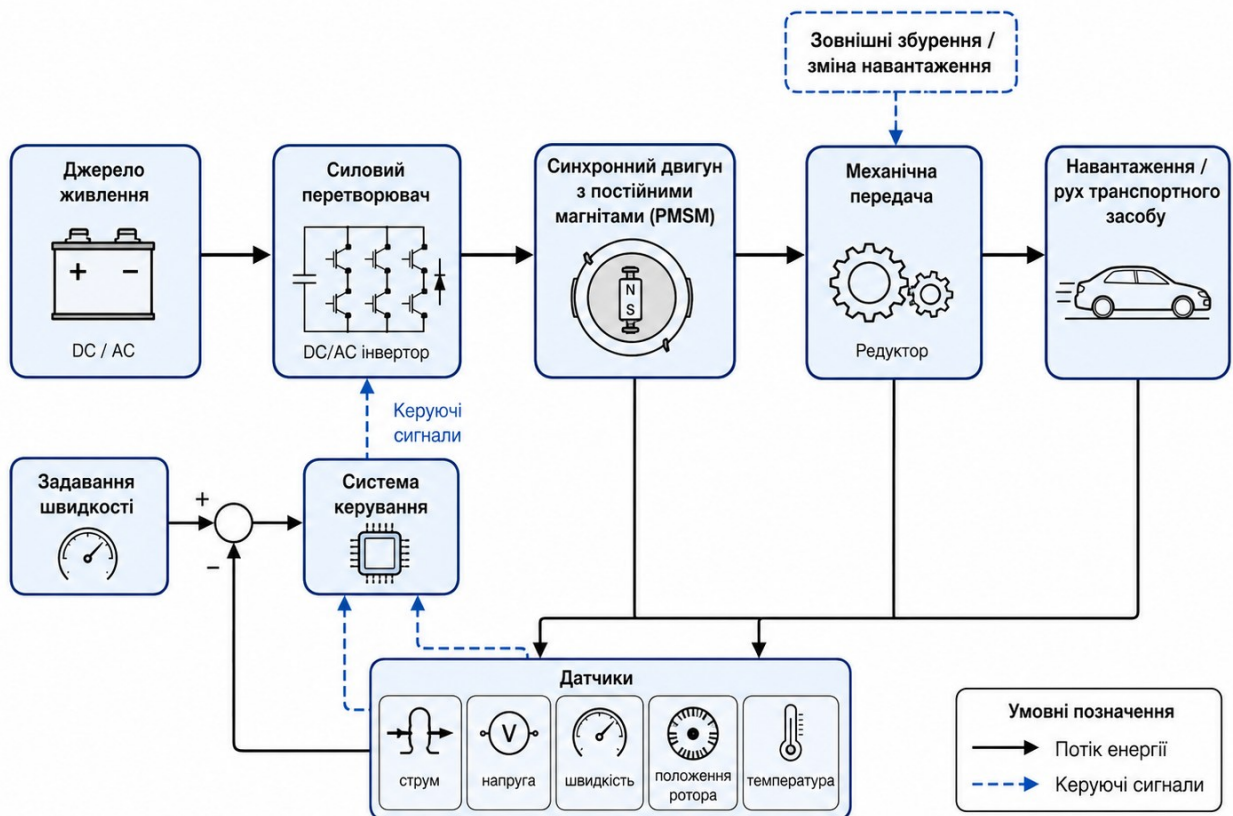


Рисунок 2.1 – Структура тягового електропривода, прийнятого для моделювання

## 2.2 Математичний опис тягового електропривода

Для опису електричної частини PMSM використовується узагальнена модель у синхронній системі координат  $d-q$ . Такий підхід дозволяє подати трифазний електропривод у вигляді двоканальної системи, у якій окремо описуються складові струму та напруги, пов'язані з магнітним потоком і моментом.

Рівняння напруг статора в координатах  $d-q$  мають вигляд [10 - 13]:

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q, \quad (2.1)$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f, \quad (2.2)$$

де  $u_d, u_q$  – проекції напруги статора на осі  $d$  і  $q$ ;

$i_d, i_q$  – проекції струму статора;

$R_s$  – активний опір статора;

$L_d, L_q$  – індуктивності по відповідних осях;

$\omega_e$  – електрична кутова швидкість;

$\psi_f$  – магнітний потік постійних магнітів.

Електромагнітний момент для синхронного двигуна з постійними магнітами може бути поданий у вигляді

$$M_e = \frac{3}{2} p (\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q), \quad (2.3)$$

де  $p$  – число пар полюсів двигуна.

Для спрощення моделі та переходу до типового режиму векторного керування в роботі приймається, що керування здійснюється при  $i_d \approx 0$ . За такого припущення вираз для моменту спрощується:

$$M_e = \frac{3}{2} p \psi_f i_q. \quad (2.4)$$

Це означає, що електромагнітний момент безпосередньо визначається  $q$ -складовою струму, тобто основний керуючий вплив у контурі моменту реалізується через регулювання  $i_q$ .

Механічна частина тягового електропривода описується рівнянням руху:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M_e - M_L - B\omega_m, \quad (2.5)$$

де  $J$  – зведений момент інерції системи;

$\omega_m$  – механічна кутова швидкість ротора;

$M_L$  – момент навантаження;

$B$  – коефіцієнт в'язкого тертя.

Момент навантаження у транспортному приводі є змінною величиною. У найпростішому вигляді його можна подати як суму сталої та змінної складових:

$$M_L = M_{L0} + \Delta M_L(t), \quad (2.6)$$

де  $M_{L0}$  – середнє навантаження, що відповідає усталеному руху;

$\Delta M_L(t)$  – змінна складова, яка відображає вплив профілю шляху, маси транспортного засобу, прискорення, опору руху та випадкових збурень.

Залежність швидкості від керуючого впливу у структурі привода має опосередкований характер. Спочатку керуючий сигнал системи керування змінює напругу і струм у статорі, потім формується електромагнітний момент, а вже через механічне рівняння змінюється швидкість ротора. Таким чином, для побудови імітаційної моделі доцільно розглядати об'єкт як багатоконтурну систему, у якій зовнішній контур регулює швидкість, а внутрішній – момент або струм (рис. 2.4).

В роботі прийнята модель має бути не максимально повною, а функціонально придатною для моделювання. Саме тому в ній не враховуються деталі силового інвертора, комутаційні гармоніки, магнітне насичення та температурна залежність усіх параметрів. Проте у модель вводиться змінне

навантаження, а також можливість зміни окремих параметрів об'єкта, що дозволяє досліджувати доцільність адаптивного керування.

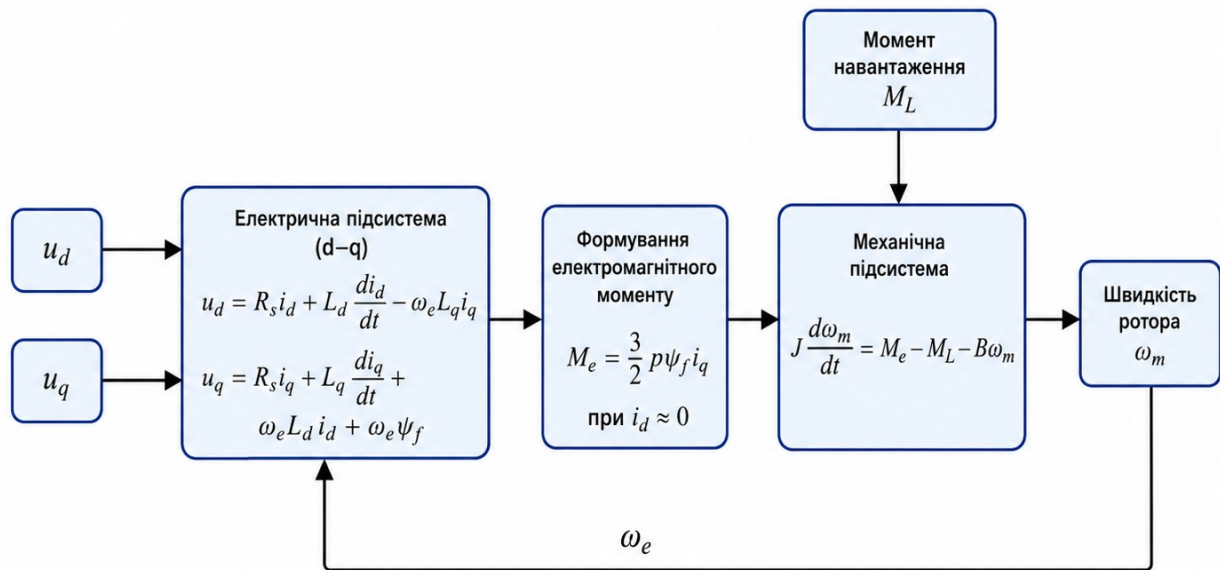


Рисунок 2.4 – Структурна схема математичної моделі тягового електропривода в координатах  $d$ - $q$

Отже, математичний опис тягового електропривода в межах цієї роботи включає електричну підсистему у координатах  $d$ - $q$ , рівняння електромагнітного моменту та механічне рівняння руху. Такий рівень опису є достатнім для формування узагальненої моделі системи керування та проведення подальших імітаційних досліджень.

## 2.3 Структура адаптивної системи керування

Адаптивна система керування в даній роботі будується як розвиток класичної багатоконтурної системи регулювання тягового електропривода. Її основою є контур регулювання швидкості та підпорядкований контур регулювання моменту або  $q$ -складової струму. У традиційній структурі параметри регуляторів задаються заздалегідь і в процесі роботи не змінюються.

Проте для тягового електропривода такий підхід має обмеження, оскільки навантаження, параметри об'єкта і зовнішні умови постійно змінюються [11–12].

У запропонованій структурі основний регулятор виконує функцію формування керуючого впливу за сигналом похибки швидкості. Як базове рішення доцільно використовувати ПІ-регулятор швидкості, оскільки він є достатньо простим, стійким і традиційним для електроприводних систем. Вихід цього регулятора формує задавання для внутрішнього контуру моменту або струму, який реалізується через силовий перетворювач.

Контур зворотного зв'язку формується за сигналами датчиків швидкості, струму, напруги та положення ротора. Ці сигнали використовуються не лише для традиційного регулювання, а й для оцінювання поточного стану системи. Саме тут у структуру вводиться адаптивний блок.

Адаптивний блок отримує інформацію від блоку оцінювання стану та на її основі змінює параметри основного регулятора. У найпростішому випадку така корекція може полягати в переналаштуванні коефіцієнтів ПІ-регулятора швидкості  $K_p$  і  $K_i$ . Якщо система працює в режимі різкого зростання навантаження, адаптивний блок підвищує швидкодію контуру регулювання. Якщо ж виявляється перехід до усталеного режиму, параметри регулятора можуть змінюватися так, щоб зменшити перерегулювання, коливання та енергетичні втрати.

Принцип роботи адаптивної системи можна подати так. Спочатку порівнюються задане та виміряне значення швидкості. Далі основний регулятор формує керуючий сигнал для перетворювача. Одночасно з цим блок оцінювання стану, спираючись на вимірювані сигнали, визначає поточний режим роботи привода, оцінює змінні стану або величину навантаження та передає цю інформацію до адаптивного блоку. Після цього адаптивний блок коригує параметри регулятора, щоб підтримати необхідну якість керування.

Узагальнену структуру адаптивної системи керування тяговим електроприводом подано на рисунку 2.2.

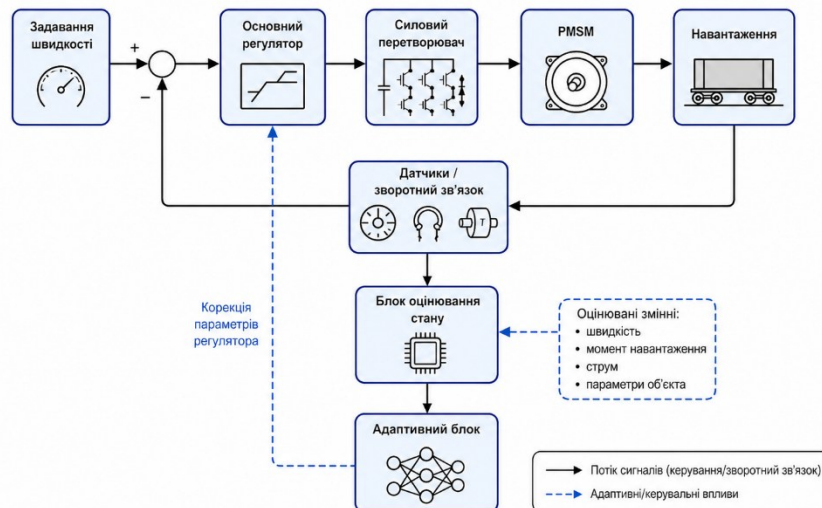


Рисунок 2.2 – Узагальнена структура адаптивної системи керування тяговим електроприводом

На рисунку 2.2 показано, що адаптивний контур не замінює базову систему регулювання, а доповнює її. Основний регулятор забезпечує формування керуючого впливу за сигналом похибки, тоді як адаптивний блок змінює його параметри залежно від оціненого стану електропривода. Такий підхід дає змогу підвищити якість керування без кардинального ускладнення базової структури.

Таким чином, запропонована структура не замінює класичну систему керування повністю, а надбудовується над нею, дозволяє порівнювати базовий і адаптивний режими в межах однієї і тієї ж математичної моделі. Крім того, така побудова є більш реальною з погляду практичного впровадження, оскільки не потребує повного перегляду архітектури електропривода, а лише розширює її інтелектуальним контуром корекції.

## 2.4 Неймережевий блок ідентифікації стану

Неймережевий блок у структурі моделі виконує функцію ідентифікації стану тягового електропривода. Його призначення полягає в тому, щоб на основі вимірюваних сигналів оцінити такі внутрішні або непрямі визначувані

величини, які є важливими для адаптації регулятора. Для двигуна АМХЕ250 доступними є сигнали швидкості від резольвера, фазні струми, температура обмоток статора, напруга живлення інвертора та сигнали датчика положення ротора. Саме ці сигнали використано як інформаційну основу для нейромережевої ідентифікації.

На вхід нейромережі в межах даної моделі подаються механічна швидкість ротора, фазні або перетворені струми статора, напруга живлення інвертора, температура обмоток і сигнал положення ротора. За потреби до вхідного вектора також може включатися похибка швидкості або її похідна, що дає змогу точніше відобразити динаміку режиму. Склад вхідних і вихідних сигналів нейромережевого блоку ідентифікації стану наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Вхідні та вихідні сигнали нейромережевого блоку ідентифікації стану

Група сигналів	Позначення / назва	Призначення
Вхідний сигнал	швидкість ротора $\omega$	оцінка динамічного режиму
Вхідний сигнал	струми статора $i_a, i_b, i_c$ або $i_d, i_q$	визначення електромагнітного стану
Вхідний сигнал	напруга інвертора $U$	урахування режиму живлення
Вхідний сигнал	температура обмоток $T$	урахування зміни параметрів
Вхідний сигнал	сигнал положення ротора $\theta$	уточнення поточного стану
Вихідний сигнал	оцінка моменту навантаження $\widehat{M}_L$	корекція регулятора
Вихідний сигнал	оцінка відхилення стану	виявлення зміни режиму
Вихідний сигнал	коригувальний сигнал	адаптація параметрів регулятора

Згідно з таблицею 2.2, нейромережевий блок працює не як окремий регулятор, а як оцінювач стану системи. На основі сукупності електричних, механічних і додаткових сигналів він формує узагальнену інформацію про поточний режим роботи, яка використовується для подальшого адаптивного переналаштування системи керування.

На відміну від надто широкого підходу, де нейромережі приписується одразу і діагностика, і прогнозування, і контроль несправностей. Нейромережевий блок повинен формувати на виході:

- оцінку навантажувального моменту або еквівалентного збурення,
- оцінку відхилення параметрів об'єкта від номінального режиму,

– допоміжний коригувальний сигнал для адаптивного блоку.

Таким чином, нейромережа не замінює регулятор, а виконує роль інтелектуального оцінювача стану. Це є принципово важливим, оскільки дозволяє зберегти прозору структуру системи керування, тобто класичний регулятор продовжує виконувати основну функцію стабілізації, а нейромережа лише допомагає адаптивному контуру точніше враховувати реальний стан привода.

В роботі прийнято нейромережу прямого поширення сигналу з одним або двома прихованими шарами. Таке рішення є достатнім для апроксимації нелінійних залежностей між вимірюваними сигналами та оцінюваними змінними, але не перевантажує модель надмірною складністю. Навчання мережі може виконуватися на масиві даних, сформованому під час попереднього моделювання в різних режимах роботи: пуск, розгін, усталений рух, зміна навантаження та гальмування.

Вихід нейромережевого ідентифікатора надходить до адаптивного блоку, де використовується для корекції коефіцієнтів основного регулятора. Наприклад, якщо нейромережа оцінює зростання моменту навантаження, система може автоматично підвищити коефіцієнт підсилення регулятора швидкості для зменшення похибки. Якщо ж виявляється тенденція до коливального режиму, адаптивний блок може змінити інтегральну складову так, щоб зменшити перерегулювання.

Отже, нейромережевий блок ідентифікації стану виконує вузьку, але дуже важливу функцію, зокрема, він забезпечує інформаційне підґрунтя для адаптивного переналаштування системи керування. Саме завдяки цьому модель отримує можливість реагувати не лише на похибку вихідної координати, а й на приховані зміни стану об'єкта.

Функціональну схему нейромережевої ідентифікації стану в контурі керування наведено на рис. 2.3.

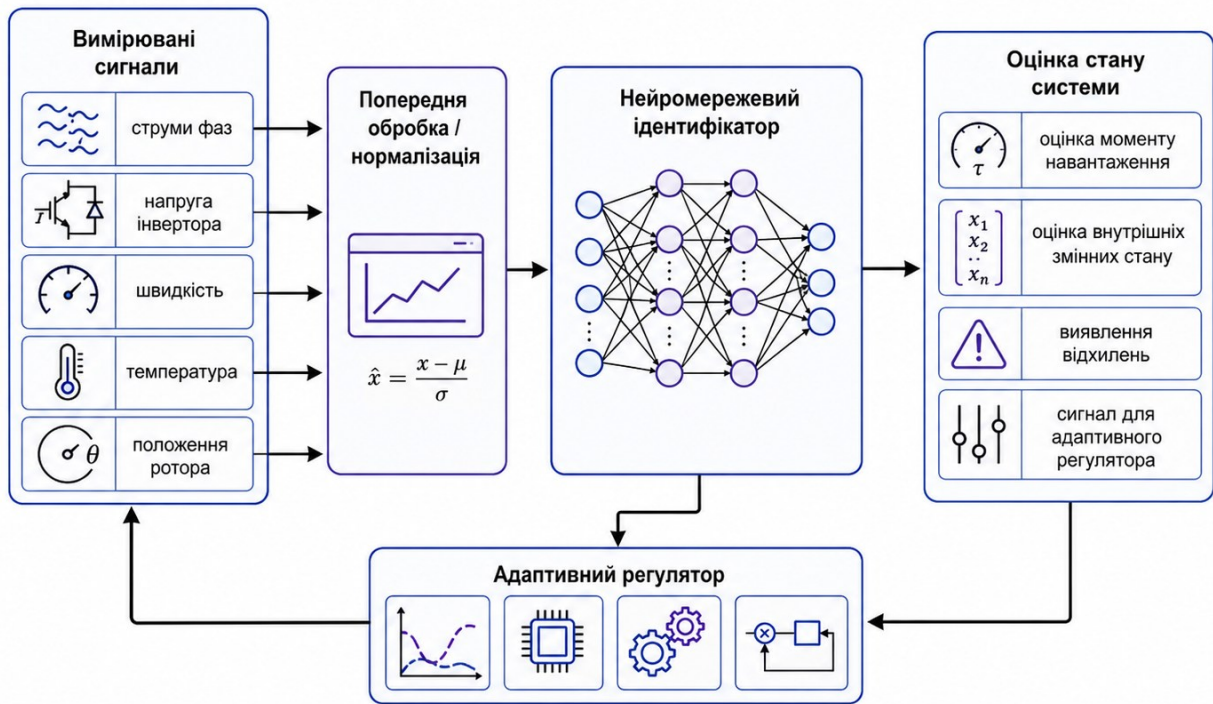


Рисунок 2.3 – Функціональна схема нейромережевої ідентифікації стану в контурі керування

З рисунку 2.3 видно, що нейромережевий блок функціонує як проміжна ланка між вимірюваними сигналами та адаптивним регулятором. Його використання дає змогу перейти від безпосереднього реагування лише на похибку швидкості до керування з урахуванням оціненого внутрішнього стану об'єкта, що особливо важливо при змінному навантаженні та параметричній невизначеності.

## 2.5 Функціональна схема моделі

Функціональна схема розробленої моделі включає кілька взаємопов'язаних підсистем (рис. 2.4). Центральною частиною є тяговий електропривод, який складається із силового перетворювача, синхронного двигуна з постійними магнітами та механічного навантаження. На вхід системи подається задавальний сигнал швидкості, який визначає бажаний режим роботи електропривода.

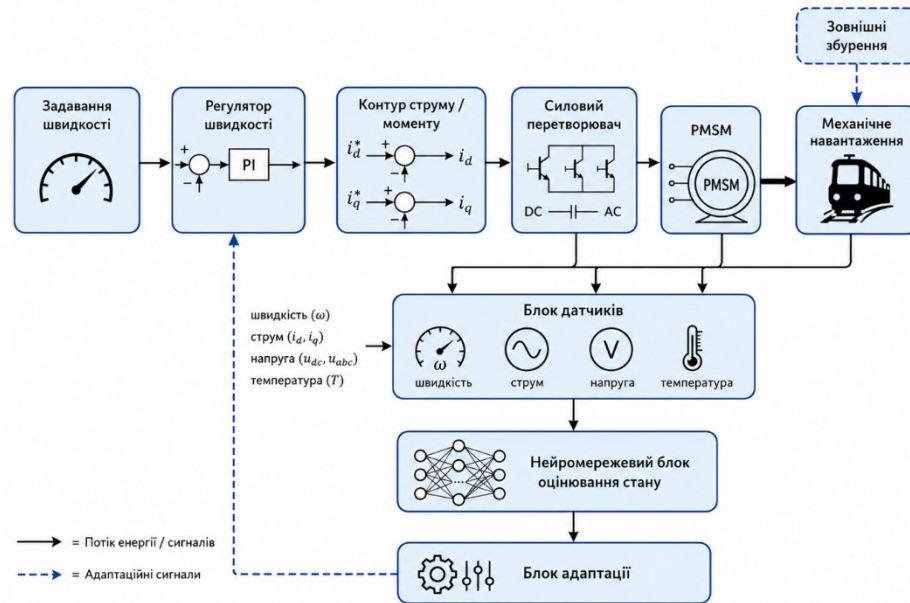


Рисунок 2.4 – Загальна функціональна схема імітаційної моделі адаптивного керування тяговим електроприводом

Після порівняння заданої та фактичної швидкості формується сигнал похибки, що надходить на основний регулятор. Основний регулятор генерує керуючий вплив для силового перетворювача, який змінює параметри живлення двигуна. У результаті змінюються електромагнітний момент і швидкість ротора, а отже, і режим роботи всього електропривода.

Датчики зворотного зв'язку знімають основні вимірювані сигнали, зокрема, швидкість, струми, напругу, положення ротора та, за наявності, температуру обмоток. Частина цих сигналів використовується безпосередньо в контурі регулювання, а частина надходить до неймережевого блоку ідентифікації стану.

Неймережевий блок, опрацьовуючи вимірювані сигнали, формує оцінку навантаження та узагальнений індикатор поточного стану об'єкта. Ця інформація передається до адаптивного блоку, який виконує корекцію параметрів основного регулятора. Таким чином, у системі реалізується додатковий контур адаптації, накладений на класичний контур зворотного зв'язку.

Функціонально така схема може бути описана як система з двома рівнями керування. Перший рівень – це базове регулювання швидкості та моменту.

Другий рівень– це інтелектуальна адаптація, яка змінює параметри першого рівня залежно від поточного стану привода. За такої організації зберігається структурна ясність моделі, а також забезпечується можливість окремо дослідити вплив нейромережевого ідентифікатора на якість регулювання.

З позиції імітаційного моделювання така функціональна схема є зручною, оскільки дозволяє послідовно реалізувати в середовищі моделювання окремі блоки: модель PMSM, модель навантаження, класичний регулятор, блок датчиків, нейромережевий оцінювач і блок адаптації. Надалі це дає змогу виконати порівняння роботи системи без адаптації та з адаптацією при однакових зовнішніх умовах.

## **Висновки до розділу 2**

У другому розділі розроблено узагальнену модель адаптивного керування тяговим електроприводом, придатну для подальшого імітаційного дослідження. Як об'єкт моделювання обрано синхронний тяговий двигун з постійними магнітами типу AMXE250, що відповідає сучасним вимогам до транспортних електроприводів. На основі базових рівнянь PMSM у координатах  $d-q$  сформовано математичний опис електричної та механічної частин привода. Побудовано структуру адаптивної системи керування, у якій класичний регулятор доповнюється блоком оцінювання стану та блоком адаптації. Окремо визначено функцію нейромережевого ідентифікатора, який за вимірюваними сигналами формує оцінку навантаження і стану системи для подальшого коригування параметрів регулятора. Розроблена функціональна схема є достатньо простою для бакалаврської роботи й водночас достатньо змістовною для порівняльного моделювання в різних режимах експлуатації.

## 3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

### 3.1 Побудова імітаційної моделі системи

Для дослідження адаптивної системи керування тяговим електроприводом використано програмне середовище **MATLAB Online** з пакетом **Simulink**, яке призначене для математичного та імітаційного моделювання динамічних систем. Об'єктом дослідження є тяговий електропривод на базі синхронного двигуна з постійними магнітами **ABB AMXE250**, що характеризується високою питомою потужністю та придатністю до транспортного застосування. У файлі студента саме це середовище визначене як основне для проведення чисельних експериментів і дослідження динамічних режимів роботи електропривода.

Імітаційна модель побудована у вигляді взаємопов'язаних функціональних блоків, які відтворюють основні процеси в системі адаптивного керування. До її складу входять блок задання швидкості, блок порівняння, ПІ-регулятор швидкості, регулятор струму в координатах  $d-q$ , блок **SVPWM**, інвертор, модель тягового двигуна **AMXE250**, блок навантаження, система датчиків та нейромережевий блок ідентифікації стану. Така структура дозволяє реалізувати як базовий контур регулювання швидкості та струму, так і додатковий контур адаптації, який виконує оцінювання стану системи та корекцію параметрів керування.

Імітаційну модель адаптивного керування тяговим електроприводом, реалізовану в середовищі Simulink, наведено на рис. 3.1.

Як видно з рисунку 3.1, побудована модель поєднує класичний контур керування тяговим електроприводом із нейромережевим блоком ідентифікації стану. Датчики формують сигнали швидкості, струму, температури та напруги, які надходять до нейромережевого блока, а результати оцінювання використовуються для корекції параметрів системи керування в реальному часі.

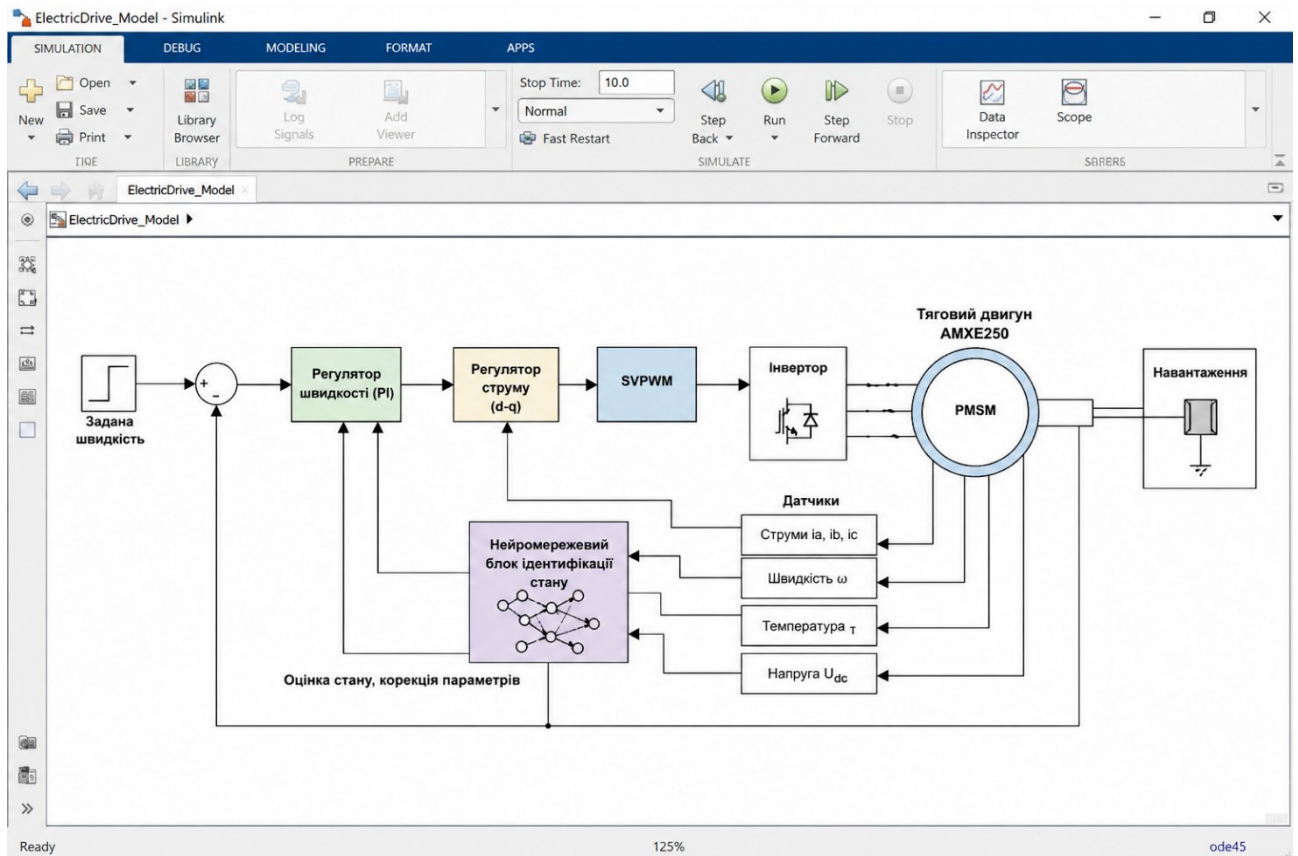


Рисунок 3.1 – Імітаційна модель адаптивного керування тяговим електроприводом у середовищі Simulink

Блок завдання формує еталонний сигнал швидкості, який подається на вхід системи керування. Регулятор порівнює задане й фактичне значення швидкості та формує керуючий сигнал для інвертора. У файлі як базовий варіант зазначено використання ПІ-регулятора швидкості, а в адаптивному режимі – адаптивного ПІ-регулятора. Це є цілком доцільним для бакалаврської роботи, оскільки дозволяє порівняти класичний та адаптивний варіанти без надмірного ускладнення структури моделі.

Модель силового перетворювача виконує функцію перетворення постійної напруги джерела живлення у трифазну напругу змінної частоти й амплітуди для живлення PMSM. У моделі двигуна відтворюються електрична підсистема, механічна підсистема та формування електромагнітного моменту. Блок механічного навантаження моделює опір руху транспортного засобу, зокрема режими рушання, роботи на рівній ділянці, зростання навантаження та вплив

зовнішніх збурень. Датчики формують сигнали зворотного зв'язку за швидкістю, струмом, напругою та температурою.

Для математичної моделі прийнято параметри, наведені у файлі як технічні та розрахункові: кількість полюсів двигуна – **12**, кількість пар полюсів – **6**, номінальна напруга постійного кола – **750 В**, максимальна температура обмоток – **180 °С**. Крім того, для узагальненої PMSM-моделі використано типові параметри: опір статора  $R_s=0,015$  Ом, індуктивність по осі  $d$   $L_d=0,6$  мГн, індуктивність по осі  $q$   $L_q=0,8$  мГн, потокозчеплення магнітів  $\psi_f=0,45$  Вб, момент інерції  $J=0,35$  0 кг·м<sup>2</sup> і коефіцієнт в'язкого тертя  $B=0,001$  Н·м·с. Для нейромережевого блоку у файлі задано п'ять вхідних сигналів, десять нейронів прихованого шару і три вихідні нейрони, із сигмоїдною функцією активації прихованого шару та лінійною функцією виходу.

Таким чином, побудована імітаційна модель відображає як класичний контур керування швидкістю, так і додатковий контур адаптації на основі нейромережевої оцінки стану системи. Її структура є достатньою для дослідження перехідних процесів, оцінювання реакції привода на зміну навантаження та аналізу переваг адаптивного підходу над традиційним.

### 3.2 Дослідження роботи системи в різних режимах

Для оцінки якості роботи розробленої системи доцільно дослідити кілька характерних режимів, які відтворюють типові умови експлуатації тягового електропривода. З урахуванням структури моделі, наведеної у файлі, найбільш показовими є режими пуску, зміни навантаження, зміни задавального сигналу та дії зовнішніх збурень. Саме ці режими дозволяють перевірити, наскільки система здатна підтримувати необхідну швидкість і момент за змінних умов роботи.

Першим дослідним режимом є пуск електропривода. У цьому режимі на систему подається ступінчасте задавання швидкості від нуля до номінального або заданого робочого значення. Основна увага приділяється швидкості наростання

швидкості ротора, величині перерегулювання, тривалості перехідного процесу та пусковому значенню електромагнітного моменту. Для тягового електропривода саме режим пуску є одним із найважливіших, оскільки він визначає здатність системи формувати достатнє тягове зусилля без надмірних коливань струму і моменту.

Другим режимом є зміна механічного навантаження. У моделі цей режим може бути реалізований шляхом стрибкоподібного збільшення моменту навантаження на валу двигуна. Такий сценарій імітує початок руху на підйомі, збільшення маси транспортного засобу або зростання опору руху. У цьому випадку оцінюється, наскільки швидко система компенсує відхилення швидкості, чи зберігається стійкість регулювання та як змінюється електромагнітний момент. Саме цей режим є найбільш показовим для адаптивного керування, оскільки дає змогу перевірити роботу блоку оцінювання стану та ефективність переналаштування регулятора.

Третім режимом є зміна задавального сигналу. Для його реалізації задається зміна швидкості з одного усталеного значення на інше, наприклад при переході від режиму розгону до режиму руху з підвищеною швидкістю. У цьому випадку аналізується точність відпрацювання нового завдання, динаміка перехідного процесу та характер зміни струму й моменту. Цей режим дозволяє оцінити гнучкість системи керування та її придатність до роботи в умовах змінного транспортного циклу.

Четвертим режимом є робота при зовнішніх збуреннях. У моделі збурення можуть бути задані у вигляді короткочасного імпульсного або випадкового приросту моменту навантаження, коливань вхідної напруги або зміни параметрів двигуна. Такий режим дозволяє оцінити робастність системи та її здатність зберігати працездатність за умов параметричної невизначеності. У файлі студента підкреслюється, що саме зміна навантаження, температури та параметрів об'єкта є однією з основних причин погіршення якості керування, а тому дослідження режиму збурень є необхідним. Перехідний процес швидкості ротора для основних досліджуваних режимів наведено на рисунку 3.2.

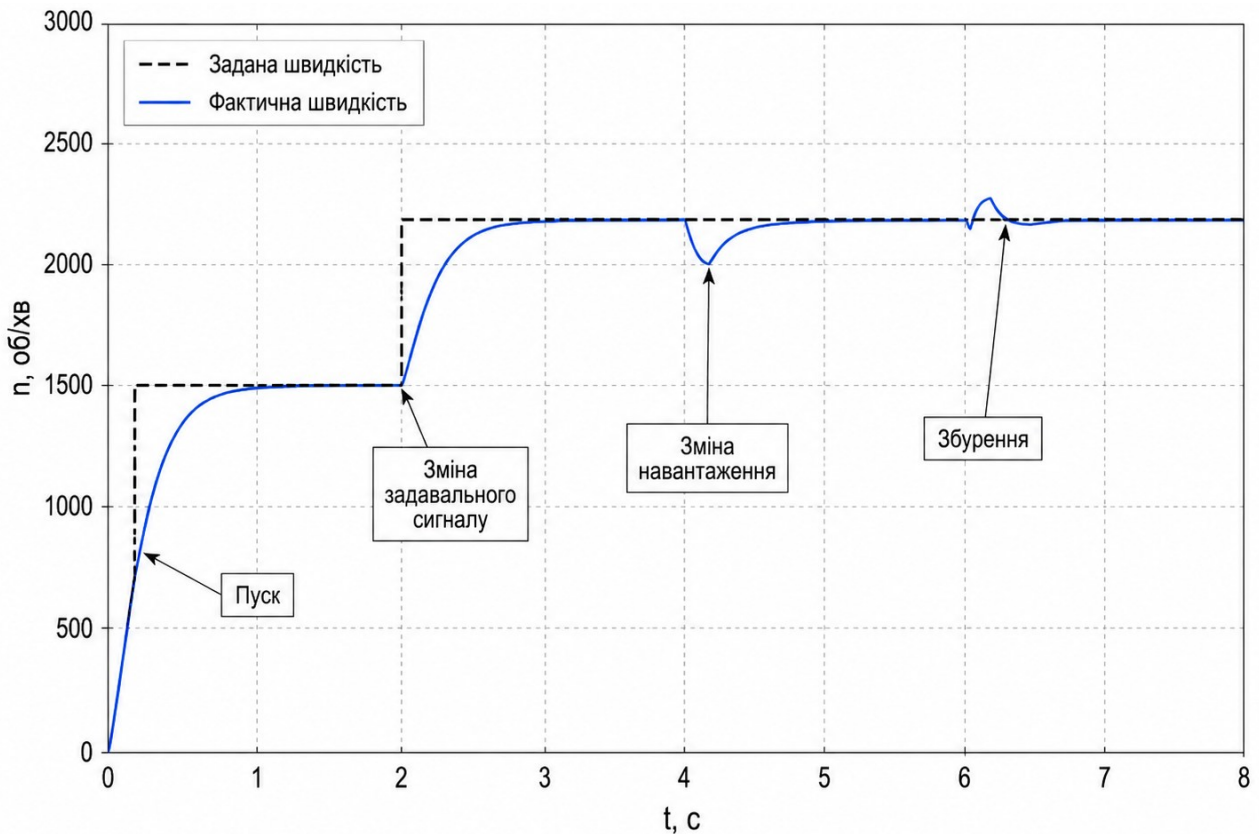


Рисунок 3.2 – Перехідний процес швидкості ротора в різних режимах роботи

З рисунку 3.2 видно, що електропривод забезпечує відпрацювання режиму пуску, зміну задавального сигналу та відновлення швидкості після зміни навантаження і короткочасних збурень, що підтверджує працездатність побудованої імітаційної моделі.

Отже, сукупність розглянутих режимів дає можливість всебічно оцінити працездатність моделі адаптивного керування. Вони охоплюють як стандартні динамічні процеси тягового привода, так і ситуації, пов'язані зі зміною зовнішніх умов, що особливо важливо для транспортних електромеханічних систем.

### 3.3 Аналіз перехідних процесів

Аналіз перехідних процесів у моделі тягового електропривода доцільно виконувати за графіками швидкості ротора, струму статора та електромагнітного

моменту. Саме ці змінні найбільш повно відображають динамічний стан системи та дозволяють оцінити якість регулювання в різних режимах роботи. У файлі студента прямо зазначено, що за допомогою Simulink доцільно аналізувати процеси розгону двигуна, реакцію системи на зміну навантаження та ефективність роботи адаптивного регулятора.

За графіком *швидкості ротора* оцінюються час виходу на усталене значення, величина перерегулювання та статична похибка. Для традиційної системи з фіксованими параметрами регулятора при зміні навантаження або задавання можливе збільшення часу перехідного процесу та поява більш помітного відхилення швидкості від заданого значення. Для адаптивної системи очікується більш швидке відновлення заданого режиму, оскільки нейромережевий блок формує інформацію про поточний стан привода, а адаптивний контур використовує її для корекції параметрів регулятора.

Аналіз перехідних процесів у моделі тягового електропривода доцільно виконувати за графіками швидкості ротора, струму статора та електромагнітного моменту. Саме ці змінні найбільш повно відображають динамічний стан системи та дозволяють оцінити якість регулювання в різних режимах роботи. Осцилограми основних змінних тягового електропривода, отримані в середовищі Simulink під час моделювання, наведено на рисунку 3.3.

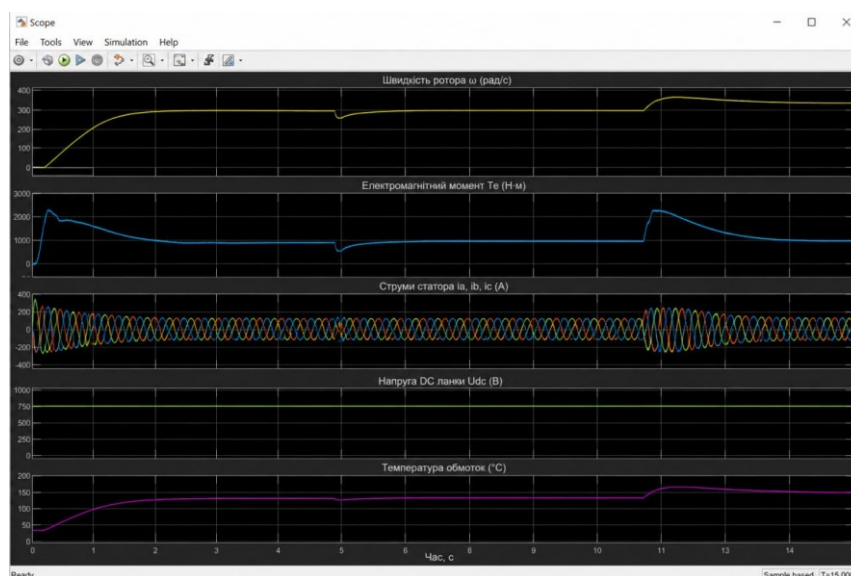


Рисунок 3.3 – Осцилограми швидкості ротора, електромагнітного моменту, струмів статора, напруги DC-ланки та температури обмоток

Як видно з рисунку 3.3, у процесі моделювання було отримано часові залежності швидкості ротора, електромагнітного моменту, фазних струмів статора, напруги DC-ланки та температури обмоток. На початковій ділянці спостерігається режим пуску електропривода, якому відповідає інтенсивне зростання швидкості, підвищене значення електромагнітного моменту та збільшені струми статора. У подальшому система переходить до усталеного режиму. У моменти зміни навантаження або дії збурення спостерігаються короткочасні відхилення швидкості та моменту, після чого система відновлює робочий режим.

За графіками *струму статора* або його складових можна оцінити характер пускового режиму, реакцію системи на збурення та навантажувальні переходи. Зростання струму на початку перехідного процесу є природним наслідком необхідності сформувати потрібний електромагнітний момент. Водночас надмірні коливання струму є небажаними, оскільки вони збільшують втрати в обмотках і теплове навантаження на силову частину привода. З точки зору якості керування більш досконалою є така система, у якій забезпечується швидке відпрацювання режиму без тривалих пульсацій струму.

Графік **електромагнітного моменту** дозволяє оцінити, наскільки адекватно привід реагує на зміну умов роботи. У режимі пуску момент має швидко зростати до значення, достатнього для розгону системи. При стрибкоподібній зміні навантаження система повинна компенсувати цю зміну за рахунок збільшення моменту, не втрачаючи стійкості. Якщо адаптивний контур працює коректно, то реакція моменту стає більш узгодженою з характером навантаження, а амплітуда небажаних коливань зменшується.

Під час аналізу реакції системи на зміну умов експлуатації особливу увагу слід приділити порівнянню роботи моделі за наявності та за відсутності адаптації. Якщо при однаковому стрибку навантаження традиційний регулятор демонструє більшу похибку та повільніше повернення до заданої швидкості, а адаптивний – швидше відновлює режим і формує більш стабільний момент, це свідчить про доцільність використання нейромережевої ідентифікації стану. У

такому разі нейромережевий блок виконує не декоративну, а функціонально важливу роль, оскільки забезпечує своєчасне виявлення зміни режиму та формування сигналу для корекції регулятора. Така логіка безпосередньо впливає зі структури системи, описаної у файлі, де виходи нейромережевого блоку використовуються для адаптації параметрів регулятора та підтримання стабільної роботи при змінному навантаженні.

Загалом якість перехідних процесів доцільно оцінювати за такими показниками: тривалість перехідного процесу, величина перерегулювання, максимальна похибка швидкості, характер пульсацій струму і моменту, а також стійкість до зовнішніх збурень. Саме ці характеристики дають змогу зробити обґрунтований висновок щодо ефективності адаптивного керування.

### **3.4 Порівняння адаптивного та традиційного керування**

Для оцінки доцільності використання адаптивного підходу необхідно порівняти роботу системи з нейромережевою ідентифікацією стану та традиційної системи керування з фіксованими параметрами регулятора. Таке порівняння доцільно виконувати за основними показниками якості перехідних процесів: часом регулювання, величиною перерегулювання, максимальною похибкою швидкості при зміні навантаження, швидкістю відновлення після збурення та характером пульсацій моменту.

У традиційній системі керування параметри регулятора задаються заздалегідь і залишаються сталими в процесі роботи. Такий підхід забезпечує прийнятну якість регулювання лише в межах тих умов, для яких система була попередньо налаштована. При зміні навантаження, параметрів двигуна або появи зовнішніх збурень традиційний регулятор реагує менш гнучко, що проявляється у збільшенні похибки, більшому перерегулюванні та тривалішому відновленні усталеного режиму.

Адаптивна система, на відміну від традиційної, використовує додаткову інформацію про поточний стан електропривода, яка формується нейронмережовим блоком ідентифікації. Це дає змогу вчасно виявити зміну режиму роботи і скоригувати параметри основного регулятора. Унаслідок цього система швидше реагує на збурення, менше відхиляється від заданого значення швидкості та забезпечує кращу якість перехідних процесів.

Порівняння перехідних характеристик традиційного та адаптивного керування наведено на рисунку 3.4.

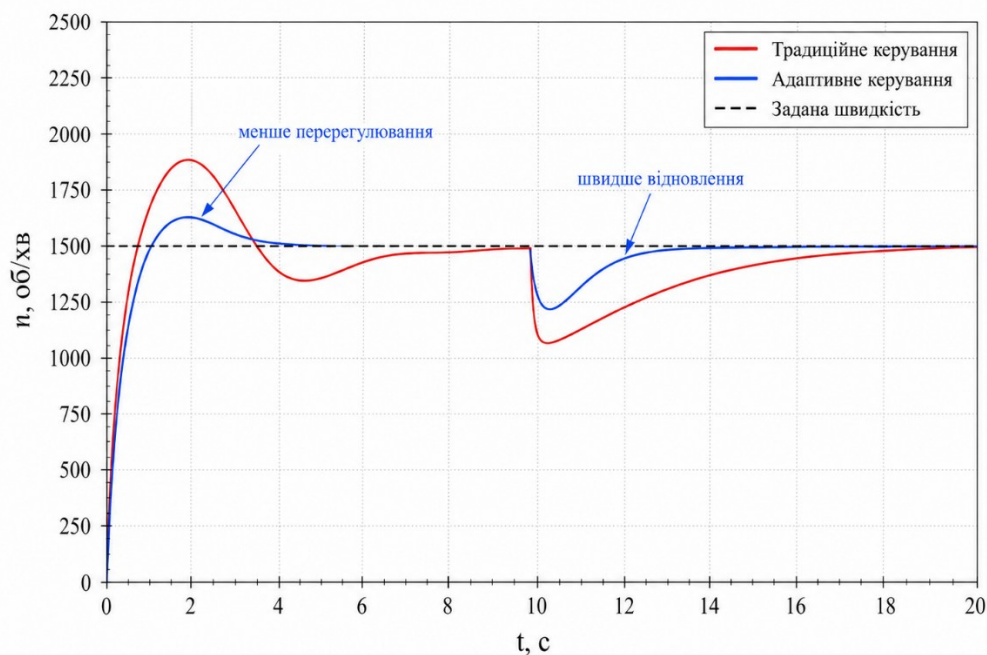


Рисунок 3.4 – Порівняння традиційного та адаптивного керування

Порівняльний графік показує, що при однаковому задавальному сигналі адаптивне керування має менше перерегулювання на етапі виходу до усталеного режиму. Крім того, у випадку збурення або зміни навантаження адаптивна система швидше відновлює задану швидкість, тоді як традиційне керування характеризується глибшим провалом швидкості та довшим часом стабілізації. Це свідчить про кращу узгодженість параметрів адаптивного регулятора з поточним станом об'єкта.

Кількісне порівняння основних показників якості традиційного та адаптивного керування наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняння показників якості традиційного та адаптивного керування

Показник	Традиційне керування	Адаптивне керування
Час перехідного процесу, с	1,20	0,85
Перерегулювання, %	8,5	3,2
Максимальна похибка швидкості при зміні навантаження, %	6,0	2,1
Час відновлення після збурення, с	0,75	0,42
Пульсації моменту	вищі	нижчі
Стійкість до збурень	задовільна	підвищена

Дані таблиці підтверджують, що використання адаптивного контуру дозволяє скоротити тривалість перехідного процесу, зменшити перерегулювання, знизити максимальну похибку швидкості при зміні навантаження та підвищити стійкість системи до зовнішніх збурень. Окремо слід відзначити зменшення пульсацій електромагнітного моменту, що є важливим для тягового електропривода, оскільки безпосередньо впливає на плавність руху та навантаження механічних елементів привода.

Отже, порівняння традиційного та адаптивного керування показує, що введення нейромережевого блоку ідентифікації стану є доцільним. Він не лише покращує точність оцінювання поточного режиму роботи, а й створює інформаційну основу для оперативної корекції параметрів регулятора, що забезпечує вищу якість керування тяговим електроприводом у змінних умовах експлуатації.

### 3.5 Оцінка ефективності запропонованого підходу

Оцінка ефективності запропонованого підходу повинна базуватися не лише на якісному аналізі графіків, а й на узагальненні отриманих результатів з точки зору практичної придатності системи. У межах виконаного моделювання встановлено, що застосування нейромережевого ідентифікатора стану в контурі

адаптивного керування позитивно впливає на динамічні характеристики тягового електропривода.

Насамперед ефективність запропонованого підходу проявляється у покращенні якості регулювання швидкості. Адаптивна система точніше відпрацьовує зміну задавального сигналу та демонструє кращу реакцію на зміну навантаження. Це особливо важливо для транспортного електропривода, який у реальних умовах постійно працює в нестационарних режимах.

Другим важливим результатом є підвищення стійкості системи до збурень. Завдяки тому, що нейромережевий блок аналізує вимірювані сигнали та формує оцінку поточного стану привода, система отримує можливість раніше виявляти відхилення від номінального режиму та швидше компенсувати їх. У результаті зменшується глибина провалів швидкості, скорочується час відновлення після збурення та підвищується загальна стабільність роботи електропривода.

Третім аспектом ефективності є зменшення небажаних коливань електромагнітного моменту та струму статора. Для тягового електропривода це має важливе значення, оскільки надмірні коливання цих змінних призводять до зростання втрат енергії, підвищеного теплового навантаження та зниження ресурсу силового обладнання. Адаптивний підхід дозволяє зробити реакцію системи більш узгодженою зі зміною режиму навантаження.

Окремо слід підкреслити, що запропонована структура є придатною для подальшого розвитку. На відміну від повної заміни класичного контуру керування, у даній роботі адаптивний блок побудований як надбудова над традиційною системою. Це робить модель більш зрозумілою, зручною для аналізу та потенційно придатною для практичної реалізації у складі цифрової системи керування тяговим електроприводом.

Таким чином, результати моделювання дозволяють вважати запропонований підхід ефективним для задач адаптивного керування тяговим електроприводом. Використання нейромережевого ідентифікатора стану забезпечує більш точне врахування змін режиму роботи, а адаптивне переналаштування параметрів регулятора покращує якість перехідних процесів,

підвищує стійкість до збурень та створює передумови для підвищення енергоефективності системи в цілому.

### **Висновки до розділу 3**

У третьому розділі побудовано імітаційну модель адаптивного керування тяговим електроприводом у середовищі **MATLAB Online / Simulink** для двигуна **ABB AMXE250**. У моделі реалізовано основні функціональні блоки системи: задавання швидкості, регулятори, силовий перетворювач, модель PMSM-двигуна, блок навантаження, систему датчиків, нейромережевий блок ідентифікації стану та адаптивний контур корекції параметрів керування. Це дозволило дослідити роботу електропривода в режимах пуску, зміни навантаження, зміни задавального сигналу та дії зовнішніх збурень.

Аналіз перехідних процесів показав, що адаптивне керування забезпечує кращу якість регулювання порівняно з традиційним: зменшується перерегулювання, скорочується час відновлення після збурення, знижується похибка швидкості та покращується стійкість системи. Отже, застосування нейромережевої ідентифікації стану в контурі адаптивного керування є доцільним і може розглядатися як перспективний підхід для підвищення ефективності сучасних тягових електроприводів.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Вступ

Охорона праці під час дослідження та моделювання адаптивного керування тяговим електроприводом має важливе значення, оскільки робота пов'язана з використанням лабораторного стенда електропривода, силового перетворювача, електричних кіл живлення, комп'ютерної техніки та програмного середовища моделювання. Відповідно до Закону України «Про охорону праці» [15], безпечні та здорові умови праці є обов'язковою умовою виконання будь-яких робіт, пов'язаних з експлуатацією електротехнічного обладнання.

Під час виконання досліджень найбільш небезпечними є ураження електричним струмом, дія рухомих частин стенда, нагрівання елементів силової частини, можливість короткого замикання, пожежна небезпека, а також підвищене навантаження на зір та нервову систему при тривалій роботі за комп'ютером.

Метою цього розділу є аналіз небезпечних і шкідливих факторів, що виникають під час дослідження електропривода, та розробка організаційно-технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки роботи з лабораторним стендом і комп'ютеризованим робочим місцем.

### 4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів

Під час дослідження адаптивного керування тяговим електроприводом основними фізичними небезпечними факторами є наявність електричних кіл змінного і постійного струму, металевих корпусів електрообладнання, силового інвертора, ланки постійного струму, а також обертових частин електропривода [15, 16]. У разі пошкодження ізоляції або порушення схеми підключення можлива поява небезпечної напруги на неструмовідних металевих частинах стенда, що

створює ризик ураження електричним струмом. Для силових перетворювачів і приводів також характерні локальний нагрів, іскріння контактів, електромагнітні завади та ризик пожежі при короткому замиканні [15, 16].

Додаткову небезпеку становлять рухомі елементи електропривода, зокрема вал двигуна, муфти, вентилятори охолодження та інші механічно навантажені вузли. При недотриманні вимог безпеки можливі травмування рук, захоплення одягу або випадковий контакт із деталями, що рухаються. У лабораторних умовах небезпека зростає в моменти налагодження, зміни режимів роботи або проведення вимірювань без повного відключення живлення [17].

Окрему групу факторів утворюють шкідливі умови праці при роботі з комп'ютером. Під час моделювання в MATLAB/Simulink оператор тривалий час спостерігає за осцилограмами, параметрами регуляторів і повідомленнями системи, що викликає напруження зору, статичне навантаження на опорно-руховий апарат та нервово-емоційне перенапруження. Вимоги до безпечної роботи з екранними пристроями передбачають раціональну організацію робочого місця, правильне розміщення монітора, дотримання режиму праці та відпочинку і запобігання зоровому перевантаженню [18].

Таким чином, для розглядуваного об'єкта характерні такі основні небезпечні та шкідливі фактори: небезпека ураження електричним струмом, можливість короткого замикання та пожежі, нагрівання елементів стенда, дія рухомих частин електропривода, електромагнітний вплив силового обладнання, а також психофізіологічні навантаження під час роботи з програмним середовищем моделювання.

#### **4.3 Організаційно-технічні заходи щодо забезпечення безпеки**

Безпечна робота з лабораторним стендом електропривода повинна забезпечуватися поєднанням організаційних і технічних заходів. До організаційних заходів належать допуск до роботи лише осіб, які пройшли

інструктаж з охорони праці та електробезпеки, перевірка знань правил експлуатації стенда, ведення журналу ввімкнення й відключення обладнання, застосування попереджувальних написів і знаків безпеки, а також заборона роботи при знятих захисних кожухах і відкритих кришках шафи керування [15, 16]. Крім того, перед початком роботи необхідно перевіряти справність заземлювального провідника, відсутність пошкоджень ізоляції кабелів та надійність контактних з'єднань.

До основних технічних заходів належать ізоляція струмовідних частин, застосування захисних кожухів для рухомих елементів, використання аварійної кнопки вимкнення, живлення допоміжних кіл від безпечних напруг, а також автоматичне відключення живлення при замиканні фази на корпус [16]. Для металевих неструмовідних частин стенда необхідно передбачити захисний провідник РЕ, а живлення лабораторного обладнання доцільно виконувати від мережі типу TN-S, що забезпечує надійне спрацювання автоматичного вимикача в аварійному режимі [16].

Для лабораторного стенда приймається живлення від однофазної мережі 220 В, автоматичний вимикач типу С16, а також мідні фазний і захисний провідники перерізом 2,5 мм<sup>2</sup>. Умова автоматичного відключення полягає в тому, що струм замикання на корпус повинен бути достатнім для гарантованого спрацювання автоматичного вимикача. Для вимикача характеристики С нижню межу миттєвого спрацювання в навчальних розрахунках приймають як  $5I_n$ , тобто [16]:

$$I_a = 5I_n = 5 \cdot 16 = 80 \text{ А.} \quad (4.1)$$

Тоді максимально допустимий повний опір петлі «фаза – захисний провідник» дорівнює:

$$Z_{s \text{ dop}} = \frac{U_0}{I_a} = \frac{220}{80} = 2,75 \text{ } \Omega. \quad (4.2)$$

Для лабораторного стенда приймемо довжину лінії від щита до стенда 12 м. Тоді сумарна довжина петлі «фаза – РЕ» становить приблизно 24 м. Активний опір двох мідних провідників розраховується за формулою:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (4.3)$$

де  $\rho=0,018 \text{ }\Omega \cdot \text{мм}^2/\text{м}$  — питомий опір міді,  $l=24 \text{ м}$ ,  $S=2,5 \text{ мм}^2$ .

$$R = 0,018 \cdot \frac{24}{2,5} = 0,173 \text{ }\Omega.$$

З урахуванням опору контактних з'єднань, затискачів та внутрішнього опору джерела живлення приймемо повний опір петлі:

$$Z_s = 0,173 + 0,25 = 0,423 \text{ }\Omega.$$

Тоді очікуваний струм короткого замикання на корпус:

$$I_k = \frac{U_0}{Z_s} = \frac{220}{0,423} = 520 \text{ А}. \quad (4.4)$$

Оскільки

$$I_k = 520 \text{ А} > I_a = 80 \text{ А},$$

умова автоматичного відключення виконується. Отже, при пробі ізоляції на корпус лабораторного стенда автоматичний вимикач відключить аварійну ділянку мережі, що істотно знижує ризик ураження електричним струмом. Такий захід є доцільним для стенда електропривода, на якому досліджуються режими роботи інвертора, електродвигуна та системи керування (рис. 4.1).

Для підвищення безпеки роботи доцільно також застосувати пристрій захисного вимкнення на струм витоку **30 мА** для розеткової мережі та допоміжних кіл, забезпечити примусову вентиляцію шафи перетворювача, контролювати температуру силових елементів, не допускати накопичення пилу на друкованих платах і клемах, а також використовувати вуглекислотний або порошковий вогнегасник. Згідно з чинними правилами пожежної безпеки,

несправна електропроводка, перевантаження мережі та експлуатація пошкодженого обладнання є неприпустимими.

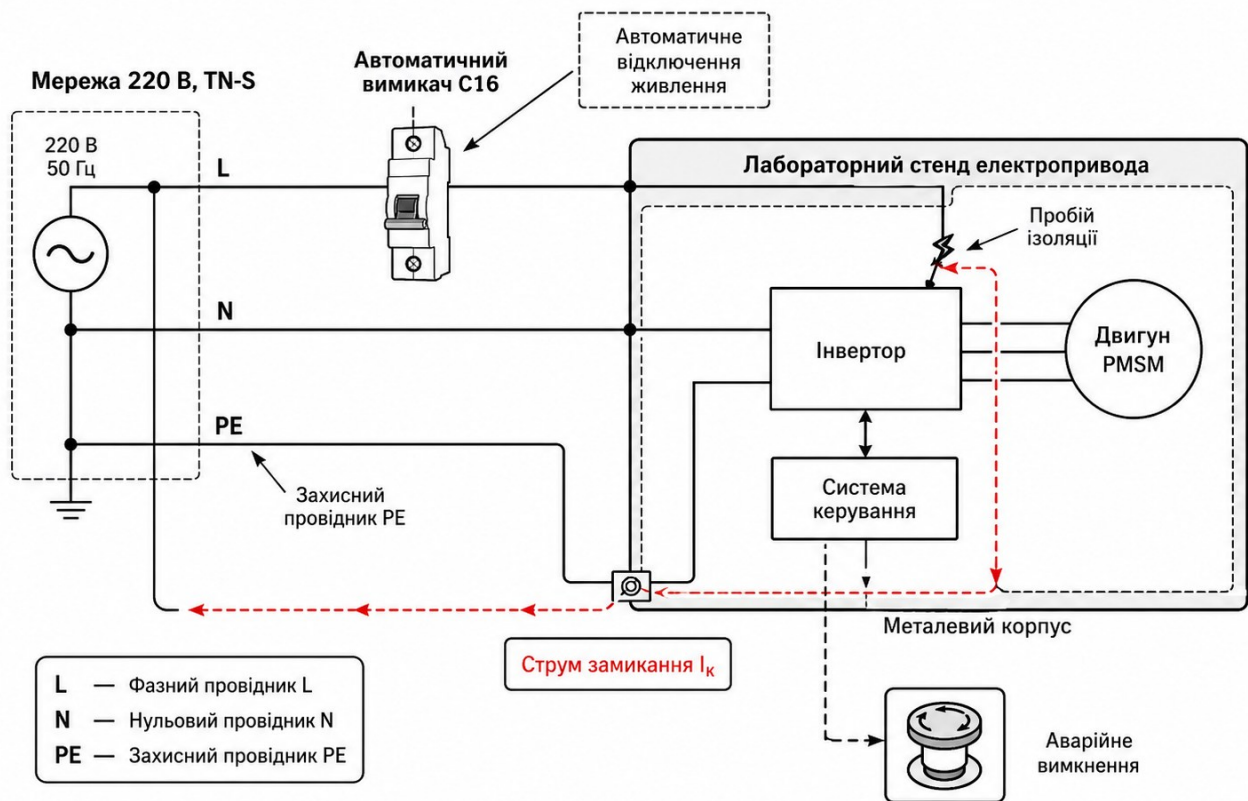


Рисунок 4.1 – Схема автоматичного відключення живлення лабораторного стенда електропривода при пробіі ізоляції на корпус

Як показано на рисунку 4.1, у разі пробією ізоляції струм замикання проходить через металевий корпус і захисний провідник PE, що забезпечує спрацювання автоматичного вимикача та відключення пошкодженої ділянки кола.

Під час роботи за комп'ютером робоче місце слід організувати так, щоб верхня межа екрана розташовувалася приблизно на рівні очей, відстань до монітора була зручною для сприйняття інформації, а клавіатура й маніпулятор не викликали надмірного статичного навантаження. Доцільно дотримуватися регламентованих перерв, уникати відблисків на екрані та забезпечувати достатнє

освітлення робочої зони. Це особливо важливо при тривалому аналізі графіків швидкості, моменту, струму і вихідних параметрів нейромережевого регулятора.

#### 4.4 Розрахунок заземлення потужності зарядної станції

Вихідні дані:

- Потужність зарядної станції  $P=120$  кВт
- Напруга мережі  $U=300$  V
- Система живлення TN-S
- Допустимий опір заземлювального пристрою  $R_{\text{доп}}=4$  Ом
- Питомий опір ґрунту  $\rho=100$  Ом
- Вертикальні електроди
- Довжина  $l=3$  м;
- Діаметр  $d=0.016$  м

1) пір одного вертикального електрода

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi l\rho} \left( \ln \frac{4l}{d} - 1 \right) \quad (4.5)$$

$$R_1 = \frac{100}{2 * 3.14 * 3} \left( \ln \frac{4 * 3}{0.016} - 1 \right)$$

$$R_1 = 5.31(6.62 - 1)$$

$$R_1 = 29.8$$

2) Кількість електродів

$$n = \frac{R_1}{R_{\text{доп}}}$$

$$n = \frac{29.8}{4} = 7.45 = 8$$

3) Урахування коефіцієнта використання

4)

$$\eta = 0,6$$

$$n = \frac{29.8}{4 * 0.6} = 12.4 = 13$$

5) Фактичний опір заземлювача

$$R = \frac{R_1}{n\eta}$$

$$R = \frac{29.8}{13 * 0.6} = 3.82$$

Таким чином, для зарядної станції потужності 120 кВт прийнято контур заземлення з 13 вертикальних сталевих електродів довжиною 3м з'єднаних сталеву смугою 40x4 мм. Розрахунковий опір становить 3,82 Ом що не перевищує допустимого значення 4 Ом

#### **Висновки до розділу 4**

Під час дослідження та моделювання адаптивного керування тяговим електроприводом найбільш значущими є небезпека ураження електричним струмом, нагрівання елементів силової частини, ризик короткого замикання і пожежі, дія рухомих частин стенда, а також психофізіологічне навантаження при роботі з комп'ютерним середовищем моделювання. Для зменшення впливу цих факторів запропоновано комплекс організаційних і технічних заходів: інструктаж персоналу, захисне огороження, аварійне вимкнення, використання захисного

провідника, контроль стану ізоляції, вентиляцію силового блоку та дотримання вимог безпечної роботи з екранними пристроями.

Розрахунок автоматичного відключення живлення показав, що для лабораторного стенда з автоматичним вимикачем С16 та мідними провідниками перерізом 2,5 мм<sup>2</sup> очікуваний струм замикання на корпус перевищує мінімальний струм спрацювання захисту. Це підтверджує працездатність обраного способу електрозахисту і дозволяє рекомендувати його для безпечної експлуатації лабораторного стенда електропривода.

## ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі розглянуто питання дослідження та моделювання адаптивного керування тяговим електроприводом на основі нейромережевої ідентифікації стану системи. Проведений аналіз показав, що тяговий електропривод є складним нелінійним об'єктом керування, для якого характерні змінні режими роботи, вплив зовнішніх збурень, зміна навантаження та параметрична невизначеність. Установлено, що традиційні системи керування забезпечують прийнятну якість регулювання лише в межах попередньо заданих умов, тоді як при зміні режимів експлуатації їх ефективність знижується. Це підтвердило доцільність застосування адаптивного підходу з використанням нейромережевого блоку оцінювання стану.

У роботі обґрунтовано вибір тягового електропривода на базі синхронного двигуна з постійними магнітами та сформовано математичну модель електричної і механічної частин системи. Розроблено структуру адаптивного керування, у якій класичний контур регулювання швидкості доповнено нейромережевим блоком ідентифікації стану та блоком корекції параметрів регулятора. Такий підхід дозволив поєднати відносну простоту традиційної системи керування з підвищеною гнучкістю адаптивної перебудови в змінних умовах роботи.

У середовищі MATLAB Online / Simulink побудовано імітаційну модель системи, що включає блок задання швидкості, регулятор швидкості, регулятор струму, інвертор, модель двигуна PMSM, блок навантаження, систему датчиків та нейромережевий блок ідентифікації стану. У процесі моделювання досліджено режими пуску, зміни задавального сигналу, зміни навантаження та дії зовнішніх збурень. Аналіз перехідних процесів за швидкістю ротора, електромагнітним моментом і струмами статора показав, що адаптивна система керування забезпечує кращі динамічні характеристики порівняно з традиційною: менше перерегулювання, меншу похибку швидкості, швидше відновлення після збурень і вищу стійкість до зміни навантаження.

У розділі з охорони праці визначено основні небезпечні та шкідливі фактори, характерні для дослідження і моделювання тягового електропривода, зокрема безпеку ураження електричним струмом, нагрівання елементів силової частини, ризик короткого замикання, дію рухомих частин та напруження праці при роботі з комп'ютером. Розроблено організаційно-технічні заходи безпеки та виконано розрахунок автоматичного відключення живлення лабораторного стенда при пробі ізоляції на корпус, що підтвердило достатню ефективність обраного способу електрозахисту.

Отже, поставлену мету роботи досягнуто. Розроблена модель адаптивного керування тяговим електроприводом на основі нейромережевої ідентифікації стану системи є працездатною та доцільною для подальших досліджень. Практична цінність одержаних результатів полягає у можливості використання запропонованого підходу для підвищення якості керування сучасними тяговими електроприводами електричного транспорту.

**Результати апробовано:** Герман М. Ю. АДАПТИВНІ НЕЙРОМЕРЕЖНІ МЕТОДИ НАЛАШТУВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРІВ У СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ // [Матеріали ХІХ Всеукраїнської науково-технічної конференції здобувачів вищої освіти «Сталий розвиток міст: поствоєнний період»](#) (91-ї науково-технічної конференції ХНУМГ ім. О. М. Бекетова) : в 5-и ч. / Ч. 2. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026. С. 7-9

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Amry Y., Elbouchikhi E., Le Gall F., Ghogho M., El Hani S. Electric Vehicle Traction Drives and Charging Station Power Electronics: Current Status and Challenges // *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 16. Art. 6037. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/16/6037> (дата звернення: 08.06.2026). DOI: 10.3390/en15166037.
2. Polater N., Steurer M., Summer M. Technical Review of Traction Drive Systems for Light Railways // *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 9. Art. 3187. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/9/3187> (дата звернення: 08.06.2026). DOI: 10.3390/en15093187.
3. Kajiwara S. Motion Dynamics Control of Electric Vehicles // *New Trends in Electrical Vehicle Powertrains* / ed. L. R. Martínez. London : IntechOpen, 2018. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/61493> (дата звернення: 08.06.2026). DOI: 10.5772/intechopen.77261.
4. Goolak S., Yermolenko O., Slobodyan V. et al. Analysis of Control Methods for the Traction Drive of an Alternating Current Electric Locomotive // *Symmetry*. 2022. Vol. 14, No. 1. Art. 150. URL: <https://www.mdpi.com/2073-8994/14/1/150> (дата звернення: 08.06.2026). DOI: 10.3390/sym14010150.
5. Ibrahim N., Al-Zuhairi H., Jasim A. Implementation of Vector Control on Electric Vehicle Traction System // *Bulletin of the National Research Centre*. 2019. Vol. 43. Art. 188. URL: <https://bnrc.springeropen.com/articles/10.1186/s42269-019-0258-8> (дата звернення: 08.06.2026). DOI: 10.1186/s42269-019-0258-8.
6. Goolak S., Liubarskyi B., Riabov I., Lukoševičius V., Keršys A., Kilikevičius S. Analysis of the Efficiency of Traction Drive Control Systems of Electric Locomotives with Asynchronous Traction Motors // *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 9. Art. 3689. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/9/3689> (дата звернення: 08.06.2026). DOI: 10.3390/en16093689.

7. Szabat K., Orłowska-Kowalska T. Adaptive Control of the Electrical Drives with the Elastic Coupling using Kalman Filter // Adaptive Control / ed. K. You. London : IntechOpen, 2009. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/6006> (дата звернення: 08.06.2026). DOI: 10.5772/6507.
8. Kamiński M., Szabat K. Adaptive Control Structure with Neural Data Processing Applied for Electrical Drive with Elastic Shaft // Energies. 2021. Vol. 14, No. 12. Art. 3389. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/12/3389> (дата звернення: 08.06.2026). DOI: 10.3390/en14123389.
9. Zhang X. Electric Drives in Alternative Fuel Vehicles– Some New Definitions and Methodologies // Electric Vehicles– The Benefits and Barriers / ed. S. Soylu. London : IntechOpen, 2015. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/49318> (дата звернення: 08.06.2026). DOI: 10.5772/61645.
10. Kamiński M., Tarczewski T. Neural Network Applications in Electrical Drives– Trends in Control, Estimation, Diagnostics, and Construction // Energies. 2023. Vol. 16, No. 11. Art. 4441. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/11/4441> (дата звернення: 08.06.2026). DOI: 10.3390/en16114441.
11. Kaczmarczyk G., Stanisławski R., Kamiński M. Deep-Learning Techniques Applied for State-Variables Estimation of Two-Mass System // Energies. 2025. Vol. 18, No. 3. Art. 568. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/3/568> (дата звернення: 08.06.2026). DOI: 10.3390/en18030568.
12. Yousfi D., Elbacha A., Ait Ouahman A. Efficient Sensorless PMSM Drive for Electric Vehicle Traction Systems // Electric Vehicles / ed. M. Ehsani. London : IntechOpen, 2011. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/19579> (дата звернення: 08.06.2026). DOI: 10.5772/16600.
13. Electric Vehicles– Modelling and Simulations / ed. Ş. Soylu. London : IntechOpen, 2011. URL: [https://vbn.aau.dk/files/55733132/electric\\_vehicles\\_modelling\\_and\\_simulation\\_s.pdf](https://vbn.aau.dk/files/55733132/electric_vehicles_modelling_and_simulation_s.pdf) (дата звернення: 08.06.2026). ISBN 978-953-307-477-1.
14. Закон України «Про охорону праці» : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>

15. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок.  
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0011-98>
- 16.НПАОП 40.1-1.07-01. Правила експлуатації електрозахисних засобів. URL:  
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1237-01>
- 17.НПАОП 60.2-1.01-06. Правила охорони праці на міському електричному транспорті. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1144-06>
- 18.ДСанПіН 3.3.2-007-98. Державні санітарні правила і норми роботи з відеодисплейними терміналами. URL:  
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0303-98>
- 19.НАПБ А.01.001-2014 Правила пожежної безпеки в Україні. URL:  
[https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=60541](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60541)
- 20.НАПБ Б.01.008-2018 Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=82176](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82176)
- 21.Герман М. Ю. АДАПТИВНІ НЕЙРОМЕРЕЖНІ МЕТОДИ НАЛАШТУВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРІВ У СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ // [Матеріали ХІХ Всеукраїнської науково-технічної конференції здобувачів вищої освіти «Сталий розвиток міст: поствоєнний період»](#) (91-ї науково-технічної конференції ХНУМГ ім. О. М. Бекетова) : в 5-и ч. / Ч. 2. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026. С. 7-9