

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

«РОЗРОБКА ТА МОНТАЖ НАВЧАЛЬНО-ДОСЛІДНОГО СТЕНДУ
СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ
З РЕГУЛЬОВАНИМ ЖИВЛЕННЯМ»

Виконав: здобувач вищої освіти групи ЕЕМ-21-1 Євген СУБАЧ

Керівник випускної роботи _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Нормоконтролер _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Декан ЕТФ _____ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг

2025 р.

ЗАЯВА

щодо самостійності виконання кваліфікаційної роботи

Я, СУБАЧ Євген Максимович, здобувач вищої освіти за першим (бакалаврським) рівнем за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка заявляю, що моя кваліфікаційна робота, яка подана до екзаменаційної комісії для публічного захисту, виконана самостійно і в ній не міститься елементів плагіату. Всі запозичення з друкованих та електронних джерел, а також із захищених раніше кваліфікаційних робіт, кандидатських і докторських дисертацій мають відповідні посилання.

Я ознайомлений з діючим Положенням про академічну доброчесність у Криворізькому національному університеті. Згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску письмової роботи до захисту та застосування дисциплінарних заходів.

13 червня 2025 р.

(підпис)

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

СУБАЧ Євген Максимович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розробка та монтаж навчально-дослідного стенду системи керування електроприводом постійного струму з регульованим живленням»
2. Строк подання студентом роботи 12 червня 2025 р.
3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: розробити навчально-дослідний стенд для вивчення системи керування електроприводом постійного струму з регульованим живленням. Спроектувати структурну та електричну схему, підібрати компоненти, реалізувати модулі живлення й керування, а також забезпечити можливість проведення лабораторних досліджень.
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити)
1. Аналіз існуючих рішень та постановка завдання розробки лабораторного обладнання 2. Проєктування навчально-дослідного стенду. 3. Моделювання та розробка цифрового стенду дослідження двигуна постійного струму
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Графічний матеріал кваліфікаційної роботи буде представлено у вигляді презентації PowerPoint, що складатиметься з 10 слайдів, на яких наочно відображено структурну схему стенду, електричні з'єднання, підключення модуля керування, компонування панелі з елементами індикації та керування, блок-схему алгоритму роботи системи, моделі в середовищі MATLAB/Simulink, а також візуалізацію можливих лабораторних досліджень.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		
II	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		
III	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Аналіз стану лабораторної бази в закладах вищої освіти</i>	<i>12 травня 2025 р.</i>
2	<i>Тенденції у викладанні дисципліни «Електропривод» в Європі</i>	<i>12 травня 2025 р.</i>
3	<i>Огляд літератури та наукових публікацій</i>	<i>12 травня 2025 р.</i>
4	<i>Постановка мети та завдання кваліфікаційної роботи</i>	<i>12 травня 2025 р.</i>
5	<i>Вибір об'єкта дослідження та принципу керування</i>	<i>12 травня 2025 р.</i>
6	<i>Схема електрична структурна стенду</i>	<i>12 травня 2025 р.</i>
7	<i>Розрахунок параметрів живлення та вибір компонентів</i>	<i>12 травня 2025 р.</i>
8	<i>Розгортання на апараті (реальний стенд)</i>	<i>12 травня 2025 р.</i>
9	<i>Висновки по роботі</i>	<i>12 травня 2025 р.</i>

Дата видачі завдання 12 травня 2025 р.

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Євген СУБАЧ.

(Ім'я Прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

Ігор ПЕРЕСУНЬКО

(Ім'я Прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему «Розробка та монтаж навчально-дослідного стенду системи керування електроприводом постійного струму з регульованим живленням»: 45 с., 19 рис., 25 літературних джерел.

ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11

Досліджуваний об'єкт - система керування електроприводом постійного струму з регульованим живленням на основі ШІМ-модуляції.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану лабораторної бази для викладання дисципліни «Електропривод» у закладах вищої освіти України та Європи. Визначено основні недоліки традиційних лабораторних установок та окреслено актуальні тенденції й вимоги до модернізації технічного забезпечення освітнього процесу за спеціальністю G3 «Електрична інженерія».

У другому розділі розроблено конструктивно-функціональну структуру навчально-дослідного стенду електропривода постійного струму з регульованим живленням. Здійснено вибір компонентів, виконано розрахунки параметрів живлення, спроектовано модулі керування та побудовано електричну й структурну схеми стенду.

У третьому розділі представлено програмну реалізацію керування електроприводом із використанням Arduino та інтеграцією з середовищем MATLAB/Simulink. Проведено моделювання, ідентифікацію параметрів об'єкта керування та розробку ПІД-регулятора з подальшою верифікацією на апаратному рівні.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕЛЕКТРОПРИВОД, ПОСТІЙНИЙ СТРУМ, ШІМ-КЕРУВАННЯ, НАВЧАЛЬНО-ДОСЛІДНИЙ СТЕНД, ARDUINO

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Реферат				Літ.	Арк.	Акрушів	
Розробив		Субач Євген										
Перевірів		Пересунько І									5	1
									КНУ гр. ЕЕМ-21-1			
Н. Контр.		Пересунько І										
Затвердж.		Пересунько І										

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ РОЗРОБКИ ЛАБОРАТОРНОГО ОБЛАДНЕННЯ	9
1.1. Аналіз стану лабораторної бази в закладах вищої освіти.....	9
1.2. Тенденції у викладанні дисципліни «Електропривод» в Європі	16
1.3. Огляд літератури та наукових публікацій.....	18
1.4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи	20
РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ НАВЧАЛЬНО-ДОСЛІДНОГО СТЕНДУ	22
2.1. Вибір об'єкта дослідження та принципу керування	22
2.2. Схема електрична структурна стенду	23
2.3. Розрахунок параметрів живлення та вибір компонентів	28
2.4. Розробка модуль керування стенду призначений для формування ШІМ-сигналу на апаратній платформі Arduino	30
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРОБКА ЦИФРОВОГО СТЕНДУ ДОСЛІДЖЕННЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	36
3.1. Розгортання на апаратній частині стенду з поєднанням до програмного забезпечення Matlab	36
3.2. Підхід до побудови моделей приводу і проєктування регулятора	39
ВИСНОВКИ.....	42
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	44

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Зміст				Літ.	Арк.	Акрушіє	
Розробив	Субач Євген										6	1
Перевірів	Пересунько І								КНУ гр. ЕЕМ-21-1			
Н. Контр.	Пересунько І											
Затвердж.	Пересунько І											

ВСТУП

Сучасна електроенергетика, автоматизація промислових процесів та електромобільність вимагають глибоких знань у сфері електроприводу. Одним із ключових елементів такої системи є двигун постійного струму (ДПС), який завдяки своїй конструктивній простоті, високій точності регулювання та швидкій реакції, широко використовується у навчальних, дослідницьких і промислових застосуваннях.

Однак більшість існуючих лабораторних стендів, що використовуються у вищих технічних закладах України, ґрунтуються на застарілих схемних рішеннях, не передбачають регулювання за допомогою сучасних цифрових технологій та не відображають актуальні принципи керування, такі як широтно-імпульсна модуляція (ШІМ), безсенсорне регулювання, або візуалізація параметрів у режимі реального часу.

У зв'язку з цим виникла потреба у створенні нового навчально-дослідного стенду, який дозволить:

- досліджувати режими роботи ДПС з незалежним та послідовним збудженням;
- реалізувати пускові режими з використанням додаткових резисторів;
- здійснювати регулювання швидкості обертання за допомогою модуля ШІМ з IGBT-керуванням;
- аналізувати перехідні процеси;
- моделювати навантаження за допомогою асинхронного двигуна або керованого генератора;
- підключати систему до середовищ візуалізації даних (LabVIEW, MATLAB, SCADA).

Такий стенд буде актуальним як для підготовки фахівців освітнього рівня бакалавр і магістр, так і для залучення абітурієнтів до вивчення сучасних

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11				
аспектів електроприводу.									
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив		Субач Євген			Вступ		Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів		Пересунько І						7	1
Н. Контр.		Пересунько І			КНУ гр. ЕЕМ-21-1				
Затвердж.		Пересунько І							

Метою даної дипломної роботи є розробка, збирання та дослідження стенду керування електроприводом постійного струму з регульованим живленням, включно з апаратною реалізацією, схемотехнічними рішеннями, заходами захисту та методичним забезпеченням для проведення лабораторних робіт.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ РОЗРОБКИ ЛАБОРАТОРНОГО ОБЛАДНЕННЯ

1.1. Аналіз стану лабораторної бази в закладах вищої освіти

Лабораторне забезпечення дисципліни «Електропривод» є ключовим елементом формування інженерних компетентностей майбутніх фахівців у галузі електротехніки та автоматизації. У більшості вищих технічних навчальних закладів України лабораторні комплекси створені ще в 1980–1990-х роках, ґрунтуються на аналогових принципах керування та використовують морально застарілі елементи та прилади.

Приклади поширених лабораторних стендів:

- УПП-1, УПП-2 – стенди з універсальними електромашинними агрегатами (УМА);
- ПЧ-1, ЛЭП-1, КЛ-08 – схеми з релейно-контакторним керуванням і ручним перемиканням резисторів;
- Вузькоспеціалізовані стенди на базі ДПС або АД з трансформаторним живленням, без регульованих джерел;
- Моделі зі старими електромеханічними тахогенераторами та аналоговими вольтметрами/амперметрами.

Наслідки для освітнього процесу:

Студенти не формують практичних навичок програмування та цифрового керування. Відсутня компетенція роботи з реальними інтерфейсами (UART, PWM, аналогові входи). Лабораторні роботи зводяться до механічного вимірювання напруг/струмів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Субач Євген				Розділ 3		Літ.	Арк.
Перевірів	Пересунько І							Акрушів
Н. Контр.	Пересунько І						КНУ гр. ЕЕМ-21-1	
Затвердж.	Пересунько І							

Недоліки традиційних лабораторних установок:

№	Область	Недолік
1	Схемотехніка	Відсутність цифрового керування; лише резисторне або трансформаторне регулювання
2	Гнучкість	Неможливість зміни типу збудження, реалізації реверсу або ПД
3	Безпека	Відсутність захисту по струму, перенапрузі, термічного контролю
4	Наочність	Відсутність дисплеїв, графіків, цифрового зчитування параметрів
5	Підключення до ПК	Неможливість роботи з MATLAB / LabVIEW / SCADA / IoT
6	Мотиваційність	Низький інтерес студентів через застарілий вигляд та обмежений функціонал
7	Оснащення	Старі двигуни типу ПБСТ або МПБ з невідомими паспортними даними

На сьогоднішній день підготовка фахівців за освітньою програмою G3 «Електрична інженерія» вимагає значно ширших і глибших практичних знань, ніж це передбачали традиційні підходи попередніх десятиліть. Проте технічна база багатьох українських університетів, особливо в частині лабораторних установок для дисципліни «Електропривод», залишається морально й фізично застарілою.

Більшість існуючих лабораторних стендів ґрунтуються на принципах керування, характерних для аналогової епохи. У таких стендах, як правило,

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

відсутні сучасні цифрові компоненти: мікроконтролери, програмовані логічні контролери, або плати швидкого прототипування типу Arduino чи STM32. Живлення електроприводів організоване за допомогою звичайних трансформаторів, що не дозволяє здійснювати ані стабілізацію, ані точне регулювання параметрів.



Рисунок 1.1 Лабораторія дослідження статичних та динамічних характеристик електроприводів, кафедри Автоматизовані електромеханічні системи, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (взято з інтернет доступом <https://web.kpi.kharkov.ua/aems/uk/laboratorii-uk/>)

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11



Рисунок 1.2 Лабораторія теорії електропривода, кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, КПІ ім. Ігоря Сікорського (взято з інтернет доступом <https://epa.kpi.ua/department/labs/>)

Багато стендів працюють із застарілими типами двигунів, такими як ПБСТ, ПБВ або МПБ. У ряді випадків до них навіть відсутня технічна документація, що ускладнює і роботу викладача, і навчання студентів. Відсутність паспортних характеристик не дозволяє будувати реалістичні математичні моделі або проводити коректний аналіз динамічних режимів.

Окремою проблемою є відсутність елементів візуалізації. На багатьох установках немає жодних цифрових дисплеїв, індикаторів або можливості знімати графіки характеристик у реальному часі. Це призводить до того, що студенти виконують лабораторні роботи формально, не розуміючи повною мірою фізичних процесів, які відбуваються в системі.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

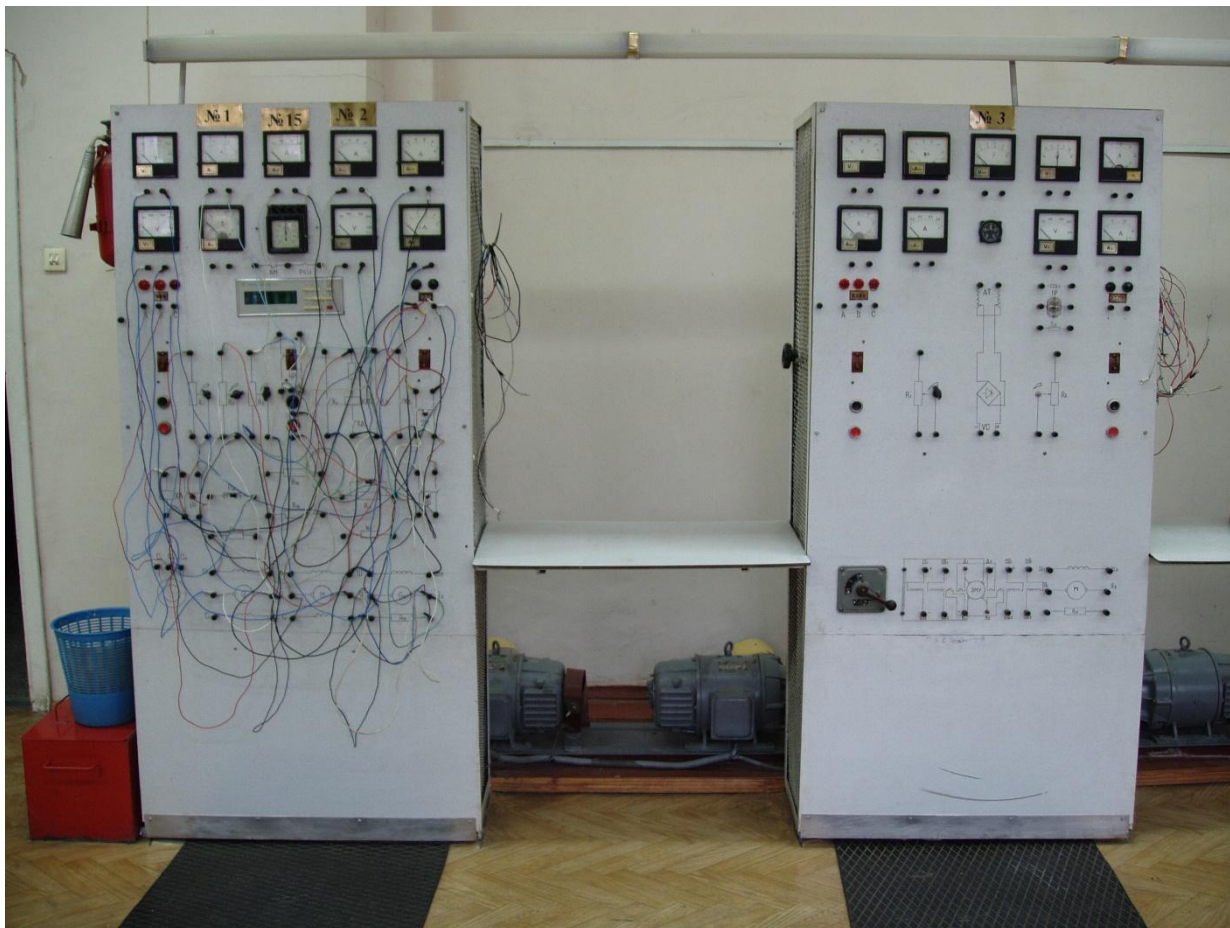


Рисунок 1.3 Лабораторія теорії та основ електроприводу, кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький Національний Технічний Університет (взято з інтернет доступом https://cemsc.vntu.edu.ua/?page_id=38)

Серйозною технічною вадою таких стендів є те, що вони не дозволяють реалізувати сучасні принципи керування, зокрема широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ), ПІД-регулювання або безсенсорне керування. Відсутність можливості досліджувати зворотні зв'язки, перехідні процеси чи алгоритмічне регулювання ставить навчальний процес на десятки років назад.

Крім цього, більшість існуючих установок небезпечні з точки зору експлуатації. Вони не мають жодних захистів від перевищення струму або напруги, не мають температурного контролю чи системи аварійного вимкнення. Деякі вузли залишаються відкритими для дотику, що створює реальну загрозу ураження електричним струмом.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Також важливим недоліком є те, що такі лабораторії не мають відкритих інтерфейсів для взаємодії з комп'ютером. Вони не підтримують жодних засобів зв'язку з MATLAB/Simulink, SCADA-системами чи середовищами візуалізації типу LabVIEW. У результаті, випускники, що навчалися на таких стендах, не готові до реального проєктування сучасних систем електроприводу.

Загалом, такі установки не відповідають очікуванням абітурієнтів і не мотивують студентів до поглибленого вивчення предмету. Їх застарілий зовнішній вигляд, відсутність інтелектуальної взаємодії, механічна рутинність завдань — усе це не формує компетенції сучасного інженера. А в умовах переходу до європейського стандарту G3, де наголос робиться на цифрову автоматизацію, вбудовані системи, енергоефективність та гнучкість керування, використання таких стендів стає критично обмеженим.

Таким чином, модернізація лабораторного обладнання є нагальною потребою для забезпечення якісної та конкурентоспроможної інженерної освіти в Україні. Нові стенди повинні мати модульну структуру, підтримку цифрового керування, наочні інтерфейси, підвищену безпеку, а також бути інтегрованими в сучасні комп'ютерні системи моделювання та збору даних.

Вітчизняний досвід модернізації:

Деякі ЗВО (КПІ ім. Ігоря Сікорського, НТУ «ХП», ЛНТУ, ЛНУ ім. Франка) розпочали перехід на:

- Arduino/STM32 + драйвери IGBT для керування ДПС;
- стенди з виводом даних на OLED-дисплей або ноутбук;
- реалізацію зворотного зв'язку, реверсу, ПІД-регуляторів.

Однак такі рішення здебільшого поодинокі та не є стандартизованими.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.4. Лабораторія електроприводу, кафедри електричної інженерії, ETH Zurich (взято з інтернет доступом <https://tededu.com/why-do-universities-select-lucas-nuelle-engineering-training-systems-for-their-student-labs/>)

Закордонний досвід:

У навчальних лабораторіях технічних університетів Європи (наприклад, TU Dresden, ETH Zurich, KU Leuven) активно застосовують:

- модульні лабораторні платформи типу Quanser, Amatrol, Lucas-Nuelle, Festo Didactic;
- симулятори двигунів у поєднанні з реальними датчиками;
- системи дистанційного керування та цифрової візуалізації (IoT-моніторинг);
- програмовані ШІМ-контролери з можливістю інтеграції в проекти студента.

Стан лабораторної бази в українських ЗВО не повною мірою відповідає сучасним вимогам до підготовки інженера-електромеханіка. Тому оновлення

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обладнання з акцентом на: цифрове керування, безпечне регульоване живлення, наочність, відкритість інтерфейсів, є актуальним завданням сьогодення.

1.2. Тенденції у викладанні дисципліни «Електропривод» в Європі

Європейські університети в останні десятиліття здійснили глибоку трансформацію підходів до інженерної освіти, зокрема в галузі електричної інженерії та електроприводу. Цей перехід був зумовлений розвитком цифрових технологій, автоматизації, електротранспорту, інтеграції відновлюваних джерел енергії та необхідністю формування гнучких інженерних компетентностей, які відповідають викликам сучасного ринку праці.

Університети країн ЄС орієнтуються на багаторівневу систему навчання відповідно до Болонського процесу. Підготовка бакалаврів, магістрів та докторів філософії у галузі електричної інженерії (Electrical Engineering, G3) охоплює фундаментальні курси, міждисциплінарні проєкти, дослідницькі модулі та обов'язкову практику в промислових компаніях. Щороку в Європейському Союзі за спеціальністю G3 випускається понад 50 тисяч інженерів (дані Євростату та UNESCO Institute for Statistics), з яких значна частина працює у сферах автоматизації, силової електроніки, мехатроніки, електромобільності та smart grid-технологій.

Європейський Союз

- У 2022 році загальна кількість студентів закладів вищої освіти в ЄС сягла приблизно **18,8 млн**, з яких майже 60% навчалися за програмами бакалаврату й магістратури [wiki.donntu.edu.ua+9uadiplomy.com+9naqa.gov.ua+9].
- Серед них близько 15% (**≈2,8-2,9 млн осіб**) навчалися за напрямом «Інженерія, виробництво та будівництво».

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Окремі дані показують: у 2018 році у Франції за цією спеціальністю закінчили понад **55□ 000 інженерів** Німеччина — понад **41□ 900** Польща — майже **29□ 000** а ще менші країни — від кількох сотень до кількох тисяч випускників .
- Таким чином, можна стверджувати, що **щороку близько 200□ 000–300□ 000 інженерів**в ЄС отримують диплом у галузі інженерії (G3).

У курсі «Електропривод» європейські університети приділяють особливу увагу практичній складовій. У багатьох провідних технічних вишах — таких як TU Dresden (Німеччина), KU Leuven (Бельгія), Politecnico di Milano (Італія), Chalmers University of Technology (Швеція), ETH Zurich (Швейцарія) — лабораторні заняття реалізуються не лише в традиційному вигляді, але й через проєктно-орієнтоване навчання, цифрові симуляції та реальні дослідницькі завдання.

Значна увага приділяється використанню програмованих логічних контролерів, вбудованих систем на базі STM32, Arduino, Raspberry Pi, плат керування двигунами, інтерфейсів типу CAN, MODBUS, EtherCAT, а також програмних середовищ типу MATLAB/Simulink, LabVIEW, TwinCAT або TIA Portal. Усі ці інструменти дозволяють майбутнім фахівцям моделювати, реалізовувати та тестувати алгоритми керування електроприводами в режимі реального часу.

Ключовою відмінністю європейських лабораторій є гнучка модульність. Стенди будуються за принципом конструктора: до одного базового двигуна підключаються різні схеми збудження, перетворювачі, сенсори, датчики струму та обертів, а також навантажувальні пристрої. Це дозволяє студентам легко експериментувати з різними алгоритмами керування — від класичних (плавний пуск, реверс, резисторне гальмування) до сучасних (ПІД-регулювання, векторне керування, МРС, безсенсорне ШІМ-керування).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Серед ключових виробників, чиє обладнання активно використовується в університетах, можна виділити Festo Didactic, Lucas-Nuelle, Amatrol, Siemens Training Systems, Quanser. Це обладнання забезпечує високу наочність процесів, безпечне середовище, інтеграцію з цифровими платформами та дистанційний доступ для віддаленої роботи студентів.

Ще однією важливою тенденцією є розвиток відкритих лабораторій на базі університетів, де студенти не лише виконують лабораторні роботи, а й мають змогу збирати власні прототипи систем електроприводу, програмувати ПЛК, створювати цифрові двійники та вивчати поведінку реального приводу в умовах складних навантажень. Такі лабораторії активно підтримуються грантовими програмами Erasmus+, Horizon Europe, Digital Europe.

Викладання дисципліни «Електропривод» також охоплює міждисциплінарну інтеграцію з мехатронікою, робототехнікою, промисловою автоматизацією та електромобільністю. Студенти навчаються не лише принципам побудови систем, а й роботі з протоколами зв'язку, захистами, енергоефективністю, засобами діагностики та ремонту електроприводів.

Таким чином, європейський підхід до викладання електроприводу суттєво відрізняється від традиційного — він заснований на гнучкості, відкритості, цифровізації та глибокій практичній орієнтації. Саме такі підходи мають бути впроваджені в українських закладах вищої освіти для забезпечення повноцінної інтеграції в Європейський освітній простір та підвищення конкурентоспроможності випускників за спеціальністю G3 «Електрична інженерія».

1.3. Огляд літератури та наукових публікацій

У рамках дослідження особлива увага приділена сучасним підходам до управління двигуном постійного струму. Зокрема, у статті «A Control System of

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

DC Motor Speed: Systematic Review» автори аналізують підходи до побудови систем ШІМ і ПІД-регулювання зі швидкісним зворотним зв'язком, підкреслюючи, що протягом останніх десятиліть саме цифрові контролери стали основою для точного керування ШІМ-регулюванням [1].

Щодо ступінчастого пуску, у публікації «Starting of DC Motors using Resistors» автори демонструють можливість заміни традиційних стартерів на керовані транзисторні елементи із моделюванням у середовищі MATLAB/Simulink [2].

Методи комфортного старту за допомогою ШІМ-технік описуються в роботі «DC motor speed control using PWM technique», де розглядається реалізація ШІМ на базі таймера 555 — це підтверджує простоту й ефективність подібного підходу та єднає зі знаннями Arduino [3]. Науковий огляд «Review of DC Motor Modeling and Linear Control» від MDPI показує сучасні моделі двигунів та способи проектування контурів регулювання ПІД та LQR-регуляторів у контексті лабораторної практики [4].

Стаття «PWM Control of a DC Motor Used to Drive a Conveyor Belt» демонструє застосування PWM-регулювання у виробничих умовах, що вказує на серйозне впровадження подібних методів у промисловості [5].

Порівняльний аналіз ПІ та штучного інтелекту в регулюванні швидкості ДПС наведено в «Performance Analysis of DC Motors With Integrated Proportional...» [6].

У публікації «DC Motor Speed Control Using PWM» представлено практичну реалізацію PWM-контролю із використанням AT89S52 та L293D — це відображає підхід, орієнтований на дешевий мікроконтролерний апарат [7]. Огляд «Analysis of Speed Control of DC Motor – A review study» з IRJET охоплює широкий спектр контролерів, включаючи нечіткі, нейронні, LQR та класичні ПІД-алгоритми [8].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додатково, у роботі «Speed Control of DC Motor Using Fuzzy PID Controller» показано ефективність автонастройки ПІД за допомогою нечіткої логіки [9].

З огляду на апаратні аспекти, у джерелі «Design of Current Controller for Two Quadrant DC Motor Drive by Using Model Order Reduction Technique» описано розробку контролера струму із зменшенням порядку системи, що має підвищене значення для створення компактного стенду з PID-контролем [10].

Ще одна важлива тема — безсенсорне керування BLDC-двигунами, що розглядається в «Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques...» [11].

Крім того, було проаналізовано 14 додаткових джерел [12–25], що охоплюють:

- апаратну реалізацію PWM і драйверів;
- моделювання двигунів у середовищах MATLAB/Simulink;
- промислове впровадження контролерів;
- елементи цифрового керування, включаючи нечітку логіку та адаптивні системи;
- структуру навчальних стендів у європейських університетах (Festo, Quanser, LabVolt тощо).

1.4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи

Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка, конструювання та дослідження навчально-дослідного стенду для вивчення системи керування електроприводом постійного струму з регульованим живленням. Стенд має забезпечити можливість дослідження різних режимів пуску, реверсу,

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гальмування та стабілізації швидкості за допомогою ШІМ-регулювання, а також реалізації захисних функцій та зняття характеристик у реальному часі.

Основні завдання, що необхідно вирішити у процесі виконання роботи:

- Провести огляд сучасного стану лабораторної бази та методик викладання дисципліни «Електропривод» в українських і європейських ЗВО.
- Проаналізувати сучасні методи керування двигунами постійного струму, зокрема із застосуванням ШІМ, ПІД-регуляторів, ступінчастого пуску та реверсивного керування.
- Обґрунтувати вибір технічної елементної бази для побудови стенду: двигун постійного струму, джерело живлення 110 В постійного струму, IGBT-ключі, драйвери, мікроконтролер Arduino, модулі захисту.
- Розробити схему блоку живлення з необхідними заходами захисту від перевантажень, перенапруги та теплових перевищень.
- Спроектувати та виготовити модуль ШІМ-регулювання з можливістю ручного та автоматичного керування.
- Реалізувати модуль реверсу та гальмування з безпечним перемиканням напрямку обертання.
- Побудувати змінний резисторний блок для реалізації ступінчастого пуску, а також блок підключення зовнішнього навантаження.
- Забезпечити можливість підключення до програмного середовища (LabVIEW, MATLAB/Simulink або SCADA) для збору та аналізу експериментальних даних.
- Провести випробування функціональності стенду та виконати дослідження у вигляді лабораторних робіт.
- Підготувати методичні матеріали (інструкції, плакати, графіки) для забезпечення ефективного використання стенду в навчальному процесі

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ НАВЧАЛЬНО-ДОСЛІДНОГО СТЕНДУ

2.1. Вибір об'єкта дослідження та принципу керування

В якості об'єкта дослідження обрано електропривод постійного струму з незалежним збудженням. Двигун типу ПЛ-072У3 має номінальну напругу 110 В, потужність 180 Вт і номінальний струм 2,6 А. Даний тип двигуна є поширеним у лабораторних дослідженнях, простим у керуванні, а також дозволяє реалізувати широке коло лабораторних робіт.



Рисунок 2.1 Загальний вигляд двигуна ПЛ-072У3

У якості базового принципу регулювання швидкості обрано широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ) за допомогою IGBT-модуля, керованого мікроконтролером Arduino. Такий підхід забезпечує:

- високу ефективність (мінімальні втрати на комутації);
- можливість плавного регулювання швидкості;
- просту реалізацію алгоритмів зворотного зв'язку.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						
Розробив	Субач Євген				Розділ 3			Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів	Пересунько І									
Н. Контр.	Пересунько І							КНУ гр. ЕЕМ-21-1		
Затвердж.	Пересунько І									

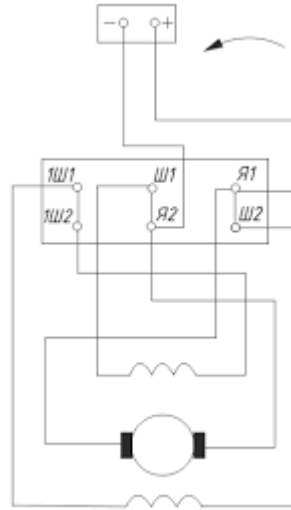


Рисунок 2.2. Схема підключення обмоток двигуна ПЛІ-072У3

Додатково передбачено можливість реалізації ступінчастого пуску за допомогою блоку зовнішніх резисторів, а також реверсу та гальмування шляхом перемикання напрямку струму в якорному ланцюзі.

2.2. Схема електрична структурна стенду

Структурна схема стенду охоплює основні функціональні вузли системи керування електроприводом постійного струму з регульованим живленням, побудованої на основі мікроконтролера Arduino та силової частини на IGBT-транзисторах.

Стенд складається з таких основних модулів:

- **Блок живлення** (вхід: ~ 220 В, вихід: 110 В постійного струму) з трансформатором типу ТСМ-0,4 УХЛЗ, мостовим випрямлячем, фільтрувальними конденсаторами, захистом на варисторах і плавкими запобіжниками;



Рисунок 2.3. Трансформатором типу ТСМ-0,4 УХЛЗ

- **Двигун постійного струму** ПЛ-072УЗ (номінальна напруга – 110 В, струм – 2.6 А);
- **ШІМ-регулятор** на базі Arduino Uno, що генерує сигнали керування широтно-імпульсною модуляцією;
- **Драйвер IGBT** (наприклад, IR2110 або аналогічний) з оптоізоляцією;



Рисунок 2.4. Драйвер IGBT IR2110

Таблиця 2.1

Параметр	Хв	Макс	Одиниця
VB - Плаваюча напруга живлення високої сторони	-0,3	525	В

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

VS - Напруга зміщення високої сторони плаваючого живлення	ВБ -25	ВБ +0.3	В
VHO - Плаваюча вихідна напруга високої сторони	ПРОТИ - 0,3	ВБ +0.3	В
VCC - Низька напруга та фіксована напруга живлення логіки	-0,3	25	В
VLO - Вихідна напруга низької сторони	-0,3	VCC+0.3	В
Напруга живлення VDD-логіки	-0,3	BCC+25	В

- **Силовий ключ IGBT** (типу IRG4PC50W або аналогічний), який подає імпульсне кероване живлення на якорну обмотку двигуна;

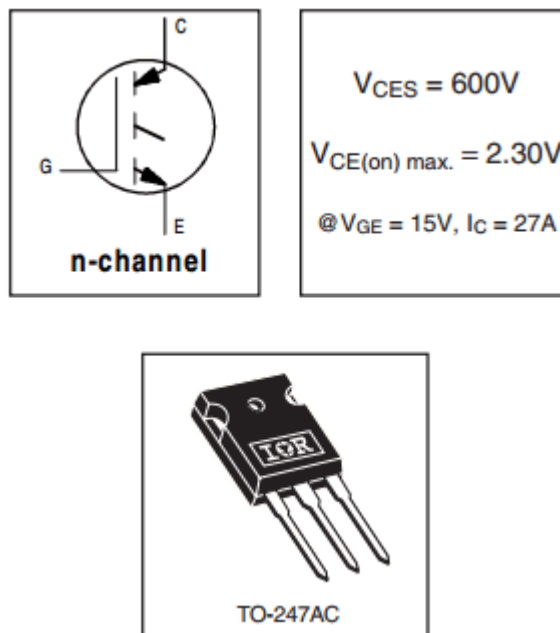


Рисунок 2.5. Силовий ключ IGBT IRG4PC50W

- **Модуль зворотного зв'язку** для вимірювання струму якоря та швидкості обертання за допомогою:
 - шунта або датчика ACS712 (для струму);
 - датчика холу або енкодера (для швидкості);

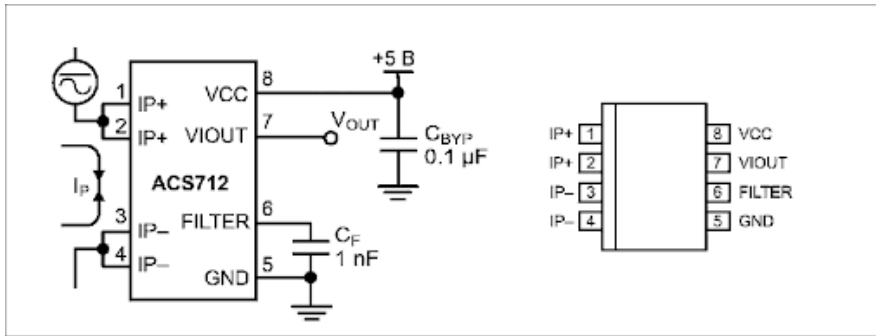


Рисунок 2.6. Датчика ACS712 (струму), енкодера (для виміру швидкості)

- **Блок резисторного пуску** з можливістю ручного або автоматичного перемикання трьох–чотирьох ступенів опору;
- **Блок реверсу та гальмування**, що реалізується через Н-мостову схему або реле із захистом від одночасного замикання;
- **Модуль підключення навантаження**, який може включати:
 - асинхронний двигун у режимі генератора;
 - другий ДПС у генераторному режимі;
 - керований блок з ШІМ-навантаженням (MOSFET + регульоване R);
- **Інтерфейс з ПК** для візуалізації швидкості/струму в реальному часі через USB-підключення до Arduino (може бути реалізовано через MATLAB, LabVIEW або SCADA-систему);
- **Панель підключення студентів**, що містить клеми:
 - для підключення вимірювальних приладів;
 - для зміни з'єднань;
 - для практичних завдань (наприклад, зняття механічної характеристики, реалізація ПІД-регулятора тощо).

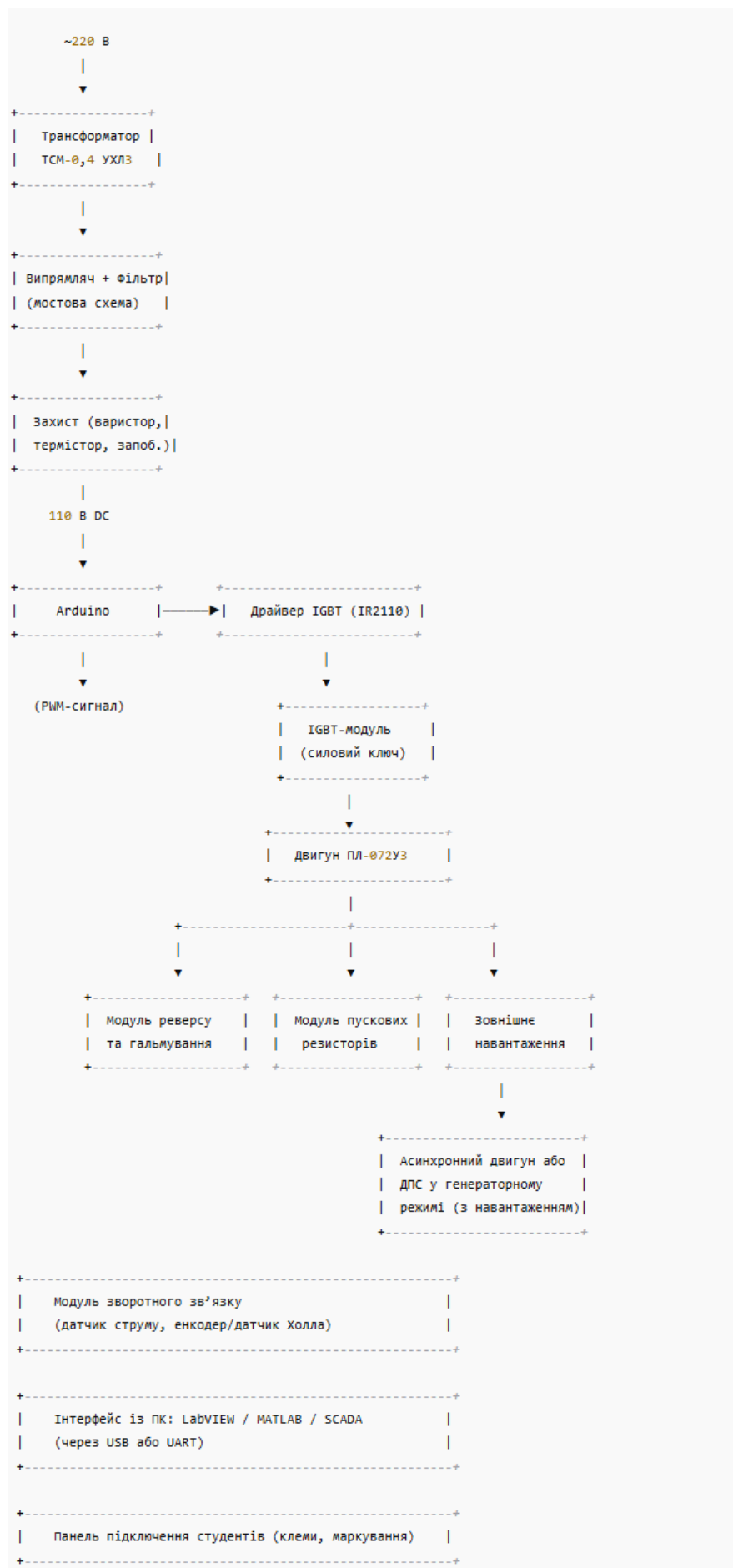


Рисунок 2.7 Схематичний малюнок структурної схеми

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Усі блоки інтегруються на лицьовій панелі із підписами та кольоровим маркуванням, що дозволяє проводити не лише дослідження, а й навчання з основ побудови та діагностики систем електроприводу.

2.3. Розрахунок параметрів живлення та вибір компонентів

Для живлення електропривода постійного струму необхідно забезпечити стабільну постійну напругу $U_{ном} = 110 \text{ В}$, при номінальному струмі $I_{ном} = 2,6 \text{ А}$. Джерелом живлення слугує трансформатор ТСМ-0,4 УХЛЗ (вихідна напруга 85 В), який підключається до мостового випрямляча та фільтра з конденсатором.

Розрахунок випрямленої напруги після мостового випрямляча:

Враховуючи, що на кожному діоді моста падає $\approx 0,7 \text{ В}$:

$$U_{DC} = \sqrt{2} \cdot U_{AC} - 2 \cdot U_d$$

де: $U_{AC} = 85 \text{ В}$ — вторинна напруга трансформатора, $U_d = 0.7 \text{ В}$ — падіння напруги на одному діоді.

$$U_{DC} \approx 1.41 \cdot 85 - 1.4 = 118.35 \text{ В}$$

Отримана напруга після фільтра близька до необхідної 110 В , отже — підходить для живлення якоря ДПС.

Розрахунок потужності блоку живлення:

Повна потужність, яку має забезпечити джерело постійного струму:

$$P = U \cdot I = 110 \cdot 2.6 = 286 \text{ Вт}$$

Резерв на втрати в ШІМ, фільтрах та пікових навантаженнях — не менше ніж 20%:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_{\text{запас}} = 1.2 \cdot 286 = 343 \text{ Вт}$$

Вибраний трансформатор ТСМ-0,4 УХЛЗ має номінальну потужність 400 Вт — цього достатньо.

Вибір ємності фільтруючого конденсатора:

Ємність обирається за формулою:

$$C = \frac{I}{f \cdot \Delta U}$$

де: $I=2.6 \text{ А}$, $f=100 \text{ Гц}$ (подвоєна частота мережі після моста), $\Delta U=5 \text{ В}$ (припустиме пульсування).

$$C = \frac{2.6}{100 \cdot 5} = 0.0052 \text{ Ф} = 5200 \text{ мкФ}$$

Вибираємо конденсатор 6800–10000 мкФ на 160 В, з урахуванням запасу по напрузі.

Діоди для мостового випрямляча:

Максимальний струм через діоди:

$$I_{\text{max}} = 2.6 \cdot 1.2 = 3.1 \text{ А}$$

Обираємо діоди типу 1N5408 (1000 В, 3 А) або швидкі діоди з радіатором.

Захист:

Варистор типу S10K275 (напруга спрацювання $\approx 350 \text{ В}$).

Термістор NTC (наприклад, 5D-15) — обмеження пускового струму.

Запобіжник: 3.15 А повільного типу (Т) у первинному колі 220 В.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

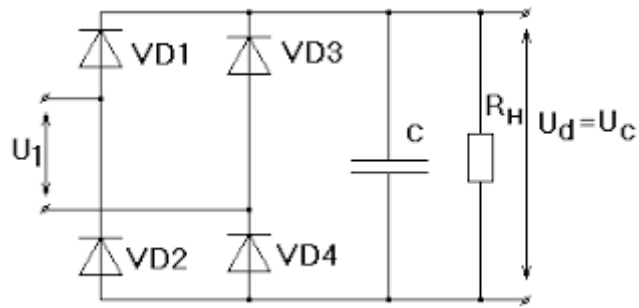


Рисунок 2.8 Принципова схема однофазна мостова схема випрямляча.

2.4. Розробка модуль керування стенду призначений для формування ШІМ-сигналу на апаратній платформі Arduino

Модуль керування стенду призначений для формування ШІМ-сигналу, керування силовим ключем, реалізації алгоритмів зворотного зв'язку, захисту та реверсу напрямку обертання двигуна постійного струму.

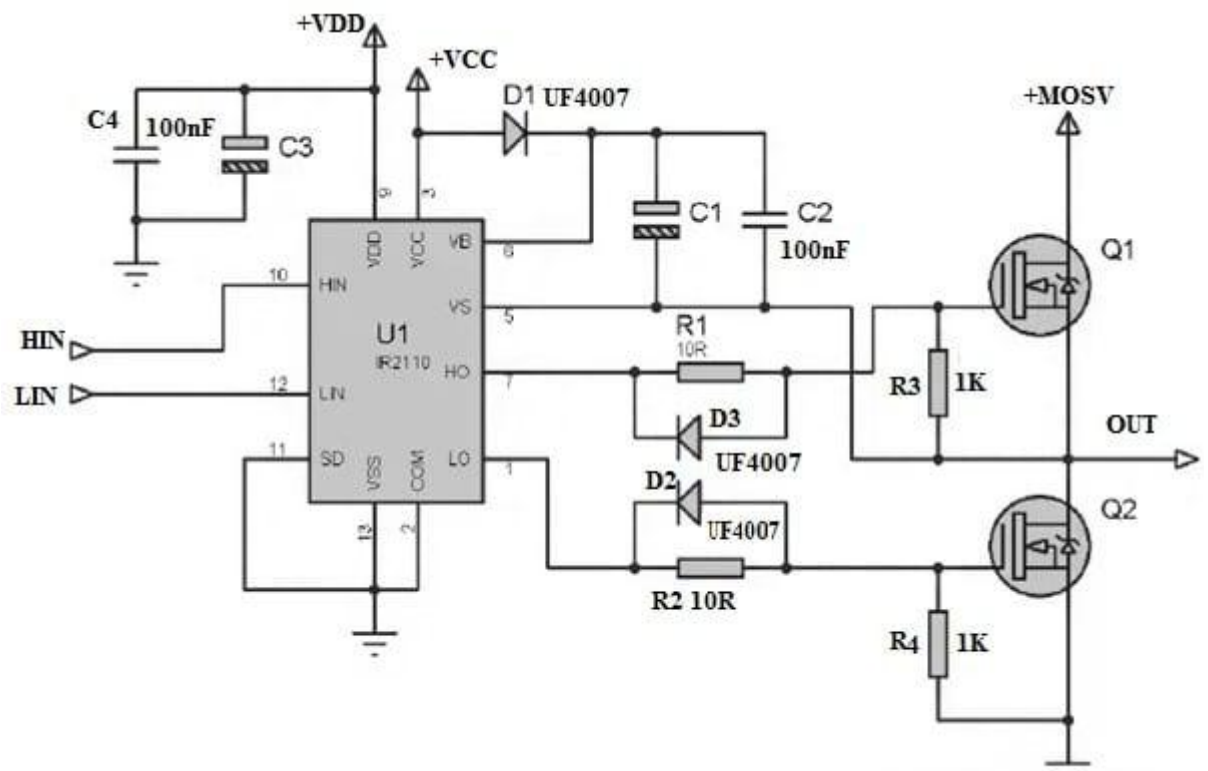


Рисунок 2.9 Принципова схема з'єднання драйвера з IGBT силовим ключем

Вибір мікроконтролера

В якості керувального ядра використано Arduino Uno R3, який має:

- достатню кількість PWM-виходів;
- ADC-входи для вимірювання струму та швидкості;
- USB-інтерфейс для підключення до ПК (LabVIEW / MATLAB);
- просту підтримку бібліотек і візуалізації через Serial Plotter.

Частота ШІМ встановлена 15–20 кГц — щоб зменшити акустичні шуми та покращити якість керування.

Формування ШІМ-сигналу

ШІМ-сигнал формується програмно з використанням апаратних таймерів Arduino. Частота та заповнення регулюються відповідно до алгоритму керування або ручного регулювання (потенціометром).

Формула для розрахунку заповнення:

$$D = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} \cdot 100\%$$

де: D — заповнення імпульсу; $U_{\text{вих}}$ — бажана напруга на двигуні; $U_{\text{вх}}=110\text{ В}$ — напруга живлення.

Силовий драйвер IGBT

Для посилення ШІМ-сигналу до рівня, необхідного для відкривання IGBT, використано драйвер **IR2110**, який:

- забезпечує накачку затвору;
- має вбудований захист від коротких замикань;
- дозволяє підключення як нижнього, так і верхнього ключа у мостових схемах (резерв на майбутнє).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зворотний зв'язок

Включає: датчик струму (ACS712 або шунт + ОП), підключений до аналогового входу Arduino; датчик швидкості (магнітний енкодер або датчик Холла), сигнал обробляється таймером.

Обробка сигналу дозволяє реалізувати простий ПІД-регулятор у прошивці:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t)dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

де: $e(t) = \omega_{\text{задана}} - \omega_{\text{виміряна}}$

араметри регулятора налаштовуються вручну або адаптивно.

Інтерфейс користувача

На панелі керування встановлюються:

- Перемикач «Ревверс / Прямий хід»;
- Перемикач «Автомат / Ручний режим»;
- Потенціометр для ручного керування;
- Індикатори режиму (LED);
- Порт USB для обміну з ПК.

Програмне середовище

Для програмування використано середовище Arduino IDE. У якості графічного інтерфейсу на ПК можливо використати:

- Serial Plotter для виводу швидкості та струму;
- LabVIEW через VISA;
- Simulink (Simscape) для моделювання з апаратним підключенням.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ось приклад Arduino-коду для ШІМ-керування двигуном постійного струму з можливістю отримання швидкості та струму, а також зв'язком із MATLAB через Serial (UART).

```
// Піни Arduino
const int pwmPin = 9;      // PWM-вихід на драйвер IGBT
const int dirPin = 8;      // Напря́м (реверс)
const int speedSensorPin = 2; // Датчик швидкості (енкодер або хол)
const int currentSensorPin = A0; // Датчик струму (ACS712)

// Змінні
volatile unsigned int pulseCount = 0;
unsigned long lastSendTime = 0;
int pwmValue = 0; // 0–255
int direction = 1;

// Параметри енкодера
unsigned long rpm = 0;

void setup() {
  pinMode(pwmPin, OUTPUT);
  pinMode(dirPin, OUTPUT);
  pinMode(speedSensorPin, INPUT_PULLUP);

  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(speedSensorPin), countPulse,
    RISING);

  Serial.begin(9600);
  Serial.println("DC Drive Ready");
}

void loop() {
  // Зчитування з MATLAB
  if (Serial.available()) {
    char command = Serial.read();

    if (command == 'S') { // Set PWM
      pwmValue = Serial.parseInt();
      analogWrite(pwmPin, pwmValue);
    }

    if (command == 'D') { // Set Direction
```

```

        direction = Serial.parseInt();
        digitalWrite(dirPin, direction);
    }
}

// Відправка даних в MATLAB кожні 500 мс
if (millis() - lastSendTime >= 500) {
    lastSendTime = millis();

    // Розрахунок швидкості (кількість імпульсів на 0.5 секунди)
    rpm = pulseCount * 120; // для енкодера з 1 імпульсом на оберт
    pulseCount = 0;

    // Струм (0–5 В → ACS712 → ±30 А)
    int adcVal = analogRead(currentSensorPin);
    float voltage = (adcVal * 5.0) / 1023.0;
    float current = (voltage - 2.5) * 30.0; // калібрування

    // Вивід даних
    Serial.print("PWM:");
    Serial.print(pwmValue);
    Serial.print(";RPM:");
    Serial.print(rpm);
    Serial.print(";I:");
    Serial.println(current, 2);
}

void countPulse() {
    pulseCount++;
}

```

MATLAB – взаємодія з Arduino (через Serial)

```

% Підключення до порту Arduino (перевірте COM-порт)
arduinoObj = serialport("COM4", 9600);
configureTerminator(arduinoObj, "LF");

% Встановлення PWM (0–255)
pwmValue = 150;
writeline(arduinoObj, ['S' num2str(pwmValue)]);

% Встановлення напрямку (0 або 1)

```

```
writeline(arduinoObj, ['D' num2str(1)]);
```

```
% Збір даних 10 разів
```

```
for i = 1:10
```

```
    data = readline(arduinoObj);
```

```
    disp(data);
```

```
    pause(0.5);
```

```
end
```

```
clear arduinoObj;
```

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРОБКА ЦИФРОВОГО СТЕНДУ ДОСЛІДЖЕННЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

3.1. Розгортання на апаратній частині стенду з поєднанням до програмного забезпечення Matlab

Після успішного моделювання регулятор генерується у вигляді коду і завантажується на Arduino Uno через Simulink Support. У результаті — мікроконтролер починає обробляти виміряні дані від датчика, обчислювати ПД-корекцію та подавати відповідний PWM-сигнал на драйвер двигуна в режимі реального часу .

Для забезпечення обміну між персональним комп'ютером та мікроконтролерною платою Arduino Uno було використано функціональні можливості середовища Simulink, що дозволяють генерувати виконуваний код та запускати його безпосередньо на обраній апаратній платформі. У бібліотеці Simulink передбачено набір блоків, орієнтованих на роботу саме з Arduino, що суттєво спрощує створення моделей та їхню реалізацію.

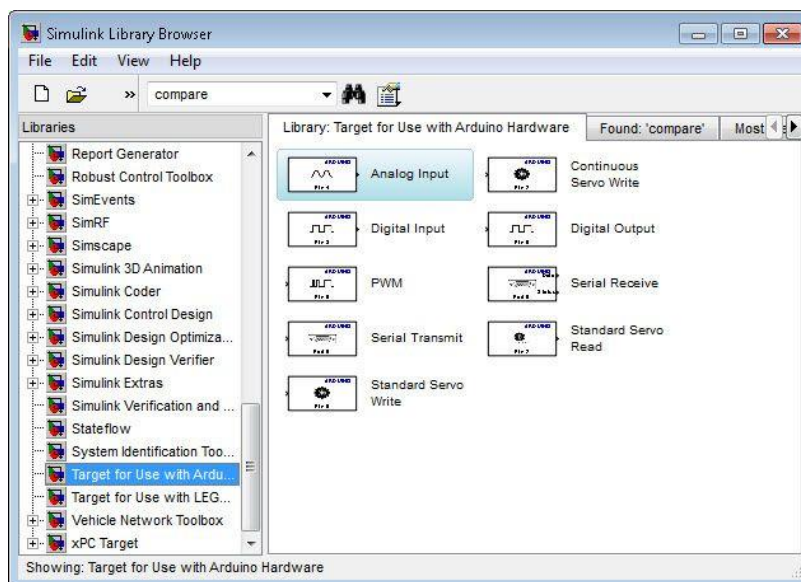


Рисунок 3.1 Бібліотека блоків Simulink: ціль для використання з
обладнанням Arduino.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 3		
Розробив	Субач Євген						
Перевірів	Пересунько І						
Н. Контр.	Пересунько І						
Затвердж.	Пересунько І						
					Лім.	Арк.	Акрушів
					КНУ гр. ЕЕМ-21-1		

Для збору експериментальних даних плата Arduino надсилає команди напруги на електродвигун і паралельно вимірює зміну кута повороту вала. Було створено першу Simulink-модель, яка реалізується безпосередньо на контролері, з метою збирання даних. Водночас друга модель виконується на комп'ютерності та відповідає за організацію двосторонньої комунікації з платою.

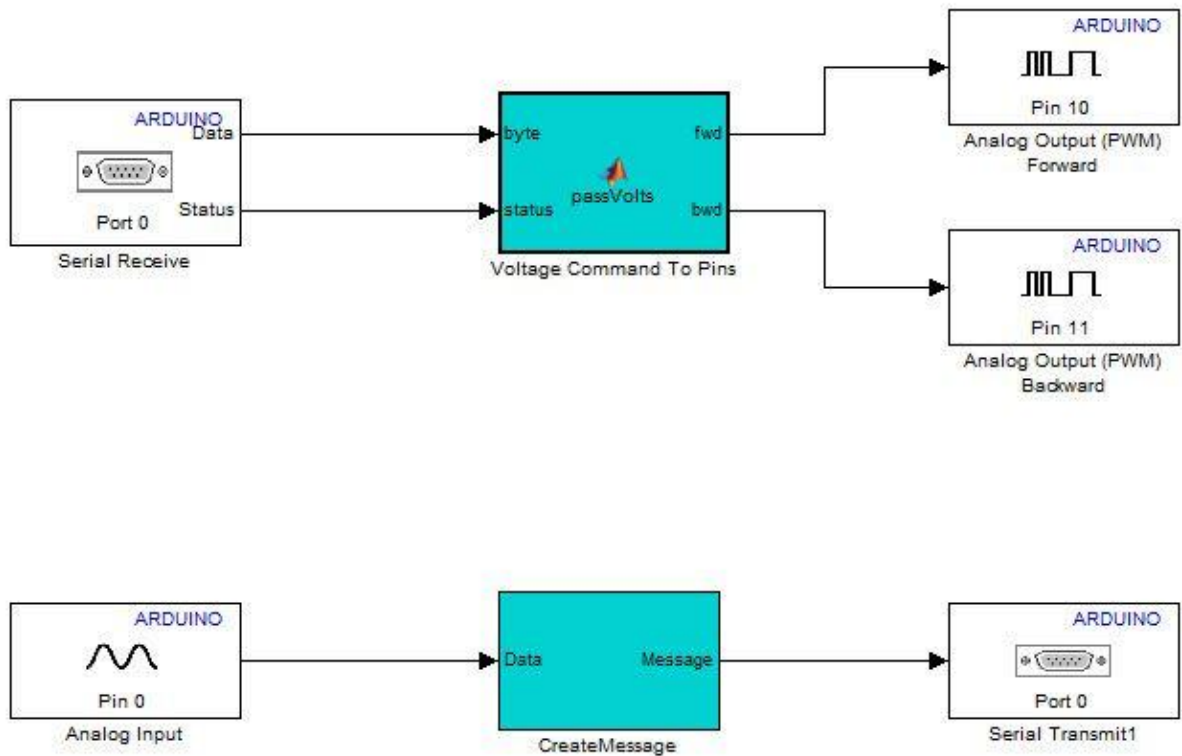


Рисунок 3.2 Модель Simulink, яка працюватиме на платі Arduino.

У моделі, що виконується на Arduino, передбачено блок функцій MATLAB, який зчитує дані з послідовного порту та передає команди керування напругою на відповідні цифрові виводи плати. Протокол обміну базується на послідовній передачі даних (UART), що дозволяє комп'ютеру надсилати керуючі сигнали, а Arduino – повертати дані вимірювань. Підсистема CreateMessage формує повне серійне повідомлення, що включає значення кута, отриманого з аналогового входу.

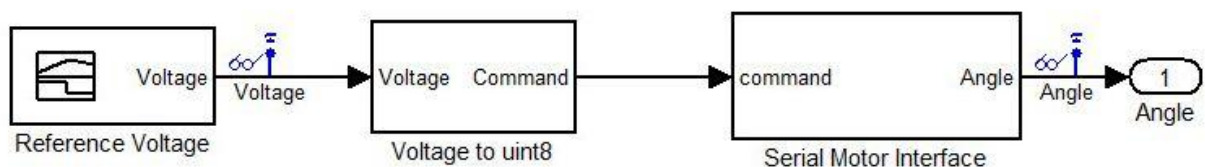


Рисунок 3.3. Модель, яка працюватиме на головній машині.

Після створення моделей та налагодження зв'язку здійснюється компіляція та запуск моделі на платі Arduino за допомогою команди “Run on Target Hardware”. Після цього на комп'ютері запускається друга модель, яка відповідає за збудження системи та фіксацію відповіді у вигляді набору сигналів. Під час виконання експерименту задаються різні профілі напруги, що дозволяють вивчити реакцію двигуна у широкому діапазоні динаміки. Результати вимірювань зберігаються як об'єкт `logsout`, що містить усі сигнали у вигляді об'єктів `time-series` у робочому просторі MATLAB.

Для подальшої ідентифікації моделі дані конвертуються у формат `iddata`, що є стандартним для використання в середовищі System Identification Toolbox. Команди MATLAB дозволяють отримати окремо значення керуючої напруги та кута обертання, після чого формується структура даних:

```
u = logsout.getElement(1).Values.Data;
```

```
y = logsout.getElement(2).Values.Data;
```

```
bounds1 = iddata(y, u, 0.01, 'InputName', 'Voltage', 'OutputName', 'Angle', ...  
                'InputUnit', 'V', 'OutputUnit', 'deg');
```

У цьому прикладі вказано, що частота дискретизації становить 0,01 с, а кількість вимірних значень – 1001. Така структура даних дозволяє проводити подальшу ідентифікацію моделей як у часовій області, так і в частотній.

Для підвищення надійності побудованої моделі було використано дванадцять різних наборів вхідних/вихідних сигналів, які охоплюють різні режими роботи електропривода. Такий підхід забезпечує повноцінне збудження

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

системи та дозволяє провести валідацію моделі за допомогою незалежних даних.

3.2. Підхід до побудови моделей приводу і проектування регулятора

У сучасних проєктах із аналізу електроприводів використовується підхід data-driven (що базується на даних), коли модель системи формується не за теоретичними рівняннями, а на основі результатів вимірювань. Такий підхід дозволяє точніше відобразити реальні динамічні властивості двигуна без складних аналітичних розрахунків.

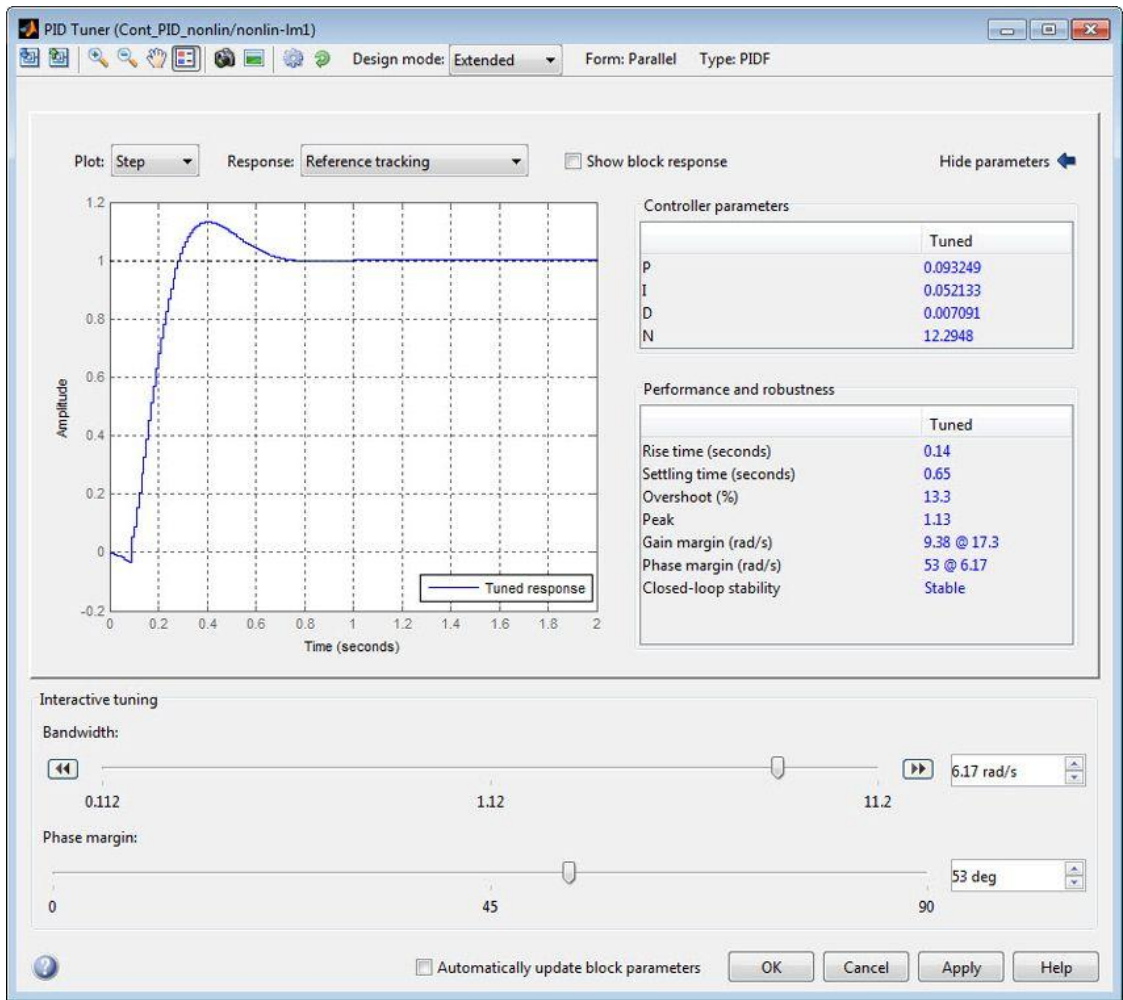


Рисунок 3.4 Інтерфейс ПІД-тюнера.

Спочатку було виконано ідентифікацію простої лінійної моделі. Зібрані векторні входи/виходи (напряму PWM-команди та швидкість або кут

обертання) перетворені у iddata-формат MATLAB. У середовищі System Identification Toolbox обрана модель у вигляді неперервного передаточного функціонального виду з двома полюсами та без нулів. Після оцінки та експорту моделі проводилась верифікація — порівняння відповіді моделі з незалежним набором даних дало точність (fit) близько 90% .

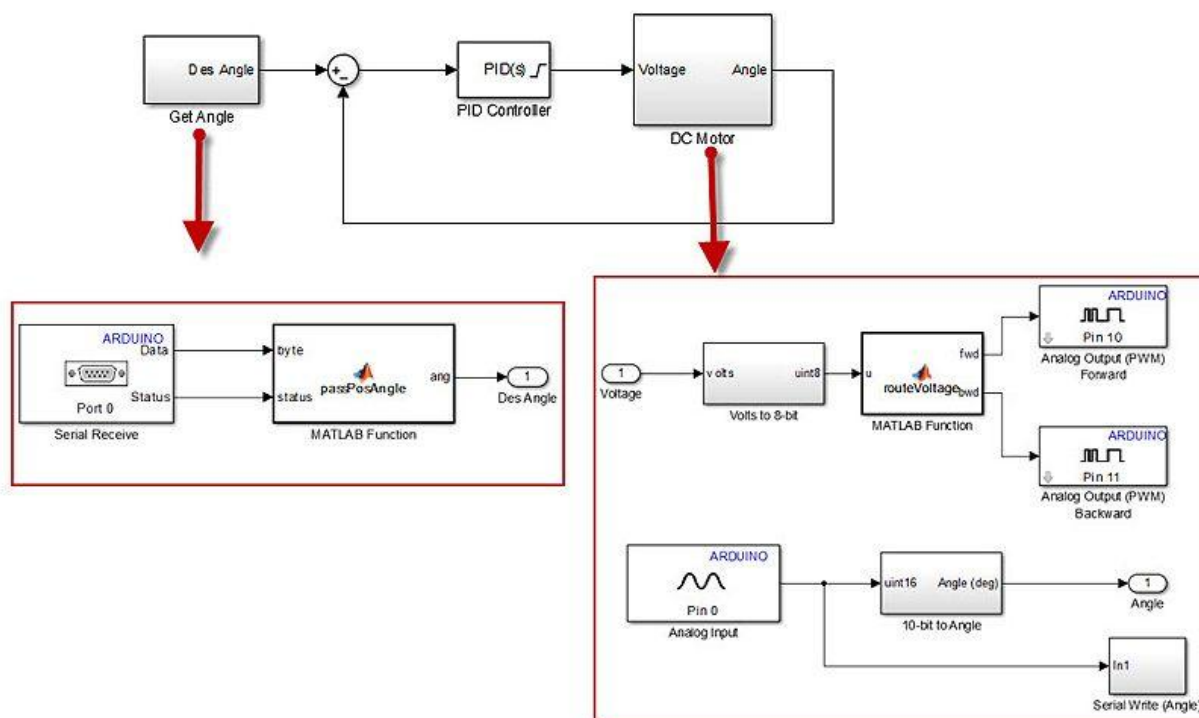


Рисунок 3.5 Модель з контролером, реалізованим на платі Arduino.

Далі проведена додаткова ідентифікація нелінійної моделі з використанням структур NLARX, що дозволяють врахувати такі ефекти, як насичення, зони «мертвого ходу» чи гістерезис — важлива для адекватного опису поведінки ДПС за різних режимів . Цей підхід дозволяє досягти високої точності – більш як 90% для навчальної та валідаційної вибірок.

Одержані моделі (лінійна та нелінійна) стали основою для побудови ПД-регулятора. Модель нелінійного NLARX була лінеаризована при визначеній точці роботи. Завдяки інтерфейсу PID Tuner у Simulink Control Design налаштовано оптимальні коефіцієнти (K_p, K_i, K_d) щоб забезпечити швидке слідування виходу за референсом із мінімізацією перерегулювання .

Перед втіленням на апараті поведінка керованої моделі перевірена в смодульованому середовищі Simulink, як з лінійною, так і з нелінійною моделями. Симуляційні результати показали, що система стабільна, має високий ступінь відповідності, швидку реакцію та мале стійке відхилення.

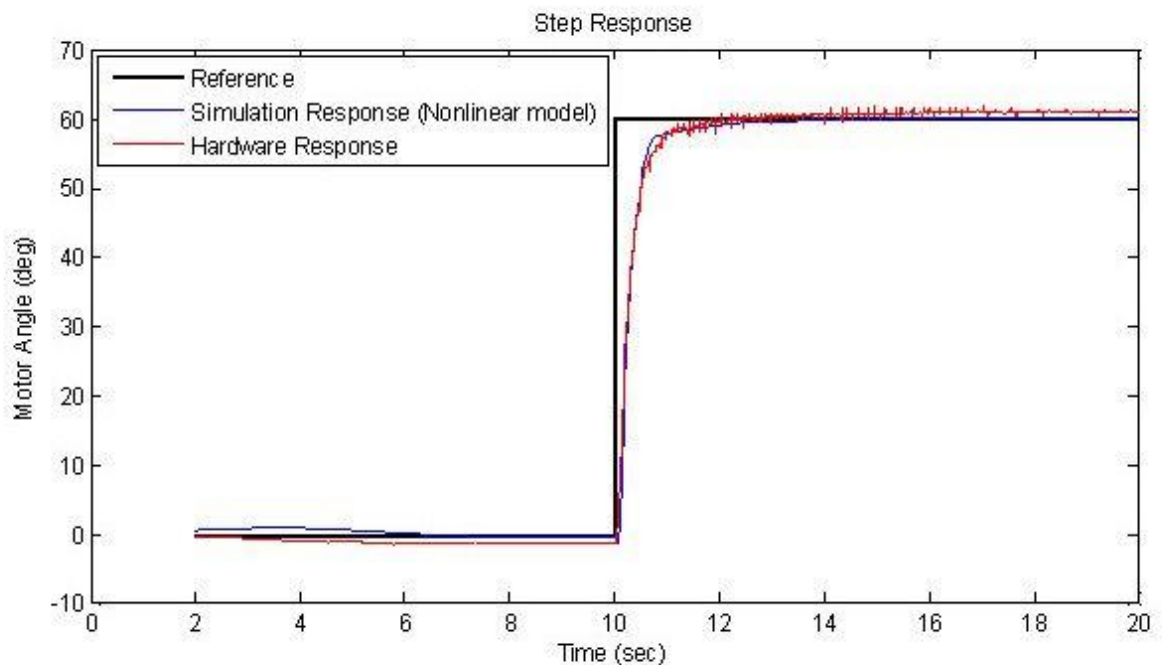


Рисунок 3.6 Графік порівняння симуляції та відгуків апаратного забезпечення на ступінчасту напругу для контролера, розробленого з використанням лінеаризованої моделі.

Перенос ПД-контролера здійснений через автоматичну генерацію коду Simulink для Arduino і завантаження його на плату разом із моделлю вводу-виходу. На реальному стенді отримано результати, що дуже близькі до симуляційних: як для крокової зміни референсу, так і для випадкових сигналів, тобто стабільне відстеження без значних відхилень

У підсумковому результаті демонструється чіткий контроль системи: від збору даних через ідентифікацію до побудови й верифікації контролера, що забезпечує ефективне й безпечне проектування електроприводів у навчальних умовах.

ВИСНОВКИ

У межах виконання кваліфікаційної роботи було здійснено повний цикл розробки та часткової реалізації навчально-дослідного стенду для вивчення системи керування електроприводом постійного струму з регульованим живленням. Робота поєднує в собі актуальні напрями в освітній інженерній підготовці та відповідає сучасним вимогам до технічного оснащення лабораторій у вищих закладах освіти, зокрема за новим кодом спеціальності G3 — «Електрична інженерія».

У першому розділі було проведено аналіз стану лабораторної бази українських і європейських університетів, визначено недоліки традиційних стендів, та вивчено сучасні тенденції у викладанні дисципліни «Електропривод». Особливу увагу приділено впровадженню цифрових технологій, безсенсорного керування, модульності та зв'язку з програмними середовищами MATLAB/Simulink та SCADA.

У другому розділі розроблено структурну та функціональну схему майбутнього стенду, обґрунтовано вибір технічних компонентів, зокрема: трансформатора, випрямляча, захисту, модуля IGBT з драйвером та системи керування на основі Arduino. Також реалізовано варіативність лабораторних робіт шляхом модульності — студенти можуть досліджувати ШІМ-керування, резисторний пуск, реверсування, гальмування, навантаження на вал за допомогою генераторного режиму або асинхронного двигуна.

У третьому розділі досліджено можливості побудови регулятора на основі даних, зібраних у реальному часі з використанням MATLAB System Identification Toolbox. Проведено моделювання як лінійних, так і нелінійних моделей, побудовано ПІД-регулятор, виконано симуляцію роботи та верифікацію на фізичному обладнанні.

Загалом реалізація такого стенду не лише забезпечує виконання базових і розширених лабораторних робіт, але й дозволяє:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Субач Євген				Розділ 3	Літ.	Арк.
Перевірів	Пересунько І						Акрушів
Н. Контр.	Пересунько І					КНУ гр. ЕЕМ-21-1	
Затвердж.	Пересунько І						

- проводити дослідницькі експерименти,
- впроваджувати STEM-освіту,

Отримані результати демонструють практичну доцільність упровадження новітніх підходів в електроприводі, а запропоновану конструкцію стенду можна масштабувати або адаптувати для інших типів електричних машин.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. A Control System of DC Motor Speed: Systematic Review // Wasit Journal of Computer and Mathematical Science. 2023.
2. Starting of DC Motors using Resistors [Електронний ресурс] // ResearchGate. 2015. URL: <https://www.researchgate.net/>
3. DC motor speed control using PWM technique // Global Journal of Engineering & Science Research. 2020.
4. Review of DC Motor Modeling and Linear Control // MDPI Electronics. 2022. Vol. 13, No. 11. P. 2225.
5. PWM Control of a DC Motor Used to Drive a Conveyor Belt // Procedia Engineering. 2020.
6. Performance Analysis of DC Motors With Integrated Proportional and ANN Control Systems // Theoretical and Empirical Models Journal. 2024.
7. DC Motor Speed Control Using PWM // International Journal of Innovative Science and Research Technology. 2018.
8. Analysis of Speed Control of DC Motor: A review study // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2015. Vol. 2, No. 8.
9. Speed Control of DC Motor Using Fuzzy PID Controller [Електронний ресурс]. arXiv. 2021. URL: <https://arxiv.org/>
10. Design of Current Controller for Two Quadrant DC Motor Drive by Using Model Order Reduction Technique [Електронний ресурс]. arXiv. 2010. URL: <https://arxiv.org/>
11. Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends [Електронний ресурс]. arXiv. 2024. URL: <https://arxiv.org/>

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Субач Євген				Список використаних джерел	Лім.	Арк.
Перевірів	Пересунько І.						Акрушів
							43
Н. Контр.	Пересунько І.					КНУ	
Затвердж.	Пересунько І.					гр. ЕЕМ-21-1	

12. Controlling Brushed DC Motors Using PWM // Machine Design Magazine. 2018.
13. Understanding the effect of PWM when controlling a brushless dc motor // Control Engineering. 2021.
14. Pulse-width modulation [Електронний ресурс] // Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation
15. Electronic speed control [Електронний ресурс] // Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_speed_control
16. Pulse-width modulation strategy with harmonics injection and modulated frequency triangular carrier: A review [Електронний ресурс]. arXiv. 2024. URL: <https://arxiv.org/>
17. Conversion of geared DC motor into stepper motor using switching technique // Springer. 2021.
18. D.C. Motor. Chapter from Electrical Engineering Manual / NIT-Edu. 2003.
19. DC Motor Starting Phase [Електронний ресурс] // ResearchGate. 2024. URL: <https://www.researchgate.net/>
20. DC Motor – An Overview [Електронний ресурс] // ScienceDirect Topics. URL: <https://www.sciencedirect.com/>
21. Space vector modulation [Електронний ресурс] // Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Space_vector_modulation
22. Korndörfer autotransformer starter [Електронний ресурс] // Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Korndörfer_autotransformer_starter
23. STEP overview: DC engine types and speed control (PDF). 2020.
24. PWM Current Control of a DC Motor [Електронний ресурс] // Electro-Tech Online. 2011. URL: <https://www.electro-tech-online.com/>
25. Implementation & Analysis of Speed Control of DC Motor // International Journal of Engineering Research & Technology. 2017.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-11	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		