

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики і електротехніки

(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій

(повна назва кафедри)

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри



В. М. Рябенський

д.т.н., професор

« 15 » грудня 2025 р.

Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: Розробка системи керування процесом пуску потужних суднових асинхронних двигунів

Виконав: студент

6321м групи



(підпис)

В.В. Борщевський

Керівник роботи:

професор каф. ПЕЕТ, д.т.н., професор

(посада, науковий ступінь, вчене звання)



(підпис)

О.О. Ушкаренко

м. Миколаїв–2025року

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра	<u>програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій</u>
Спеціальність	<u>171«Електроніка»</u>
Освітня програма	<u>Електронні системи</u>

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми
 В. М. Рябенський
(підпис)

« 09 » жовтня 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ на здобуття ступеня вищої освіти «магістр» (освітньо-кваліфікаційний рівень)

Студенту Борщевському Владиславу Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка системи керування процесом пуску потужних суднових асинхронних двигунів

керівник роботи Ушкаренко Олександр Олегович, професор каф. ПЕЕТ, д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ректора № 1217 від «14» жовтня 2025 року.

2. Термін подання роботи: 09.12.2025 р.

3. Вихідні дані по роботі: потужність асинхронних двигунів до 30 кВт;
номінальне діюче значення напруги 380 В, частота 50 Гц; сумарна потужність
дизель-генераторів суднової електроенергетичної системи 300 кВт;

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів)

1. Класифікація й основні види керування судновим асинхронним електроприводом

2. Розробка апаратної частини системи керування

3. Програмне забезпечення для керування системою плавного пуску АД

4. Охорона праці

5. Перелік презентаційних матеріалів

1. Структурна схема суднової системи плавного пуску асинхронного двигуна

2. Принципова схема системи керування процесом пуску асинхронного двигуна

3. Блок-схеми алгоритмів роботи системи керування

4. Модель суднового асинхронного електроприводу

5. Результати моделювання системи плавного пуску асинхронного двигуна

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Тубальцев А.М.		

7. Дата видачі завдання « 15 » жовтня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

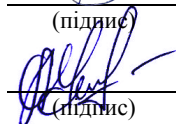
№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналітичний огляд систем керування судновим асинхронним електроприводом	29.11.2024	виконано
2.	Розробка моделі суднової електростанції для дослідження процесу пуску двигуна та її моделювання	11.04.2025	виконано
3.	Розробка принципової схеми системи керування процесом пуску асинхронного двигуна	12.06.2025	виконано
4.	Розробка алгоритмів та програмного забезпечення системи керування системою пуску асинхронного двигуна	31.10.2025	виконано
5.	Підготовка розділу з охорони праці	28.11.2025	виконано
6.	Оформлення пояснювальної записки підготовка графічного матеріалу та доповіді	20.12.2025	виконано

Студент

Керівник роботи



(підпис)



(підпис)

В.В. Борщевський

(прізвище та ініціали)

О.О. Ушкаренко

(прізвище та ініціали)

Анотація

У магістерській кваліфікаційній роботі розроблено систему керування процесом пуску потужних суднових асинхронних двигунів, що застосовуються у складі насосного обладнання. Проведено аналіз існуючих методів керування, створено структурну та принципову схеми, а також алгоритми функціонування з відповідним програмним забезпеченням. Комп'ютерне моделювання підтвердило ефективність запропонованого рішення. Використання сучасної елементної бази дало змогу зменшити габарити, масу та вартість пристрою. Система має можливість підключення до комп'ютера для моніторингу та накопичення даних. Застосування розробленої системи дозволяє знизити пусковий струм асинхронного двигуна на 50% у порівнянні з прямим пуском, що підвищує енергоефективність і надійність суднових електроустановок.

Ключові слова: асинхронний двигун, система керування, судновий електропривод, пусковий струм.

Abstract

The master's thesis presents the development of a control system for the start-up of high-power marine induction motors used in pump drives. Existing control methods were analyzed, and structural and schematic designs, operating algorithms, and dedicated software were developed. Computer simulations confirmed the efficiency of the proposed approach. Modern components reduced the system's size, weight, and cost, while a computer interface enables real-time monitoring and data collection. The developed control system decreases the motor inrush current by up to 50% compared to direct-on-line starting, improving the energy efficiency and reliability of ship power systems.

Keywords: induction motor, control system, marine electric drive, starting current.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. КЛАСИФІКАЦІЯ Й ОСНОВНІ ВИДИ КЕРУВАННЯ СУДНОВИМ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ	9
1.1. Аналітичний огляд існуючих методів та технічних рішень для пуску потужних асинхронних двигунів	9
1.2. Теоретичні відомості про системи плавного пуску	12
1.3. Огляд існуючих промислових зразків систем плавного пуску асинхронних двигунів	16
1.4. Система плавного пуску асинхронних двигунів Altistart 48.....	19
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	23
2.1. Формулювання вимог до системи плавного пуску асинхронного двигуна.....	23
2.2. Розрахунок основних елементів системи керування.....	30
2.3. Розрахунок надійності системи керування.....	36
2.4. Розробка моделі та моделювання роботи системи плавного пуску асинхронного двигуна	38
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ КЕРУВАННЯ СИСТЕМОЮ ПЛАВНОГО ПУСКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА	43
3.1. Опис процесу роботи з програмними засобами керування промисловими системами плавного пуску асинхронних двигунів	43
3.2. Аналіз спектрального складу напруг статора асинхронного двигуна при його запуску	50
3.3. Розробка блок-схем алгоритмів програмного забезпечення для мікроконтролера.....	53
3.4. Дослідження сплесків потужності при пуску потужного суднового асинхронного двигуна	57
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	61

4.1. Вступ.....	61
4.2. Мікроклімат на робочому місці	62
4.3. Розрахунок освітлення	64
4.4. Заходи щодо техніки безпеки.....	66
Висновки	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	70
ДОДАТОК А.....	74
ДОДАТОК Б	79
Програмний код реалізації функцій.....	79

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ДС – датчик струму

ЕРС – електрорушійна сила

КІХ – кінцева імпульсна характеристика

ККД – коефіцієнт корисної дії

КТЕ – комутуючий тиристорний елемент

МЛ – множна ланка

НІХ – нескінченна імпульсна характеристика

ПК – пристрій керування

ПР – перетворювач

ПС – пристрій сполучення

РС – регулятор струму

САР – система автоматичного регулювання

СІФК – система імпульсно-фазового керування

ФК – фазове керування

ФКР – фазове керування у ланцюгах ротора

ФКС – фазове керування у ланцюгах статора

					171.6321м.КР.ПЗ.Скорочення	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

ВСТУП

Суднові електроенергетичні системи працюють у режимах, що характеризуються різкими змінами навантаження. Особливо це стосується випадків, коли виконується прямий пуск потужних асинхронних короткозамкнених двигунів, які широко застосовуються у складі насосного обладнання. У таких умовах пускові струми можуть перевищувати номінальні у кілька разів, що призводить до значного зниження напруги на шинах електроенергетичної системи судна. Це негативно впливає на стійкість роботи інших споживачів, а також може спричиняти уповільнений розгін або зрив у роботі електродвигунів. Тому актуальним завданням є зменшення пускового струму і забезпечення надійного пуску суднових електроприводів.

Одним із ефективних підходів є застосування тиристорних комутаторів у колі статора двигуна. Завдяки регулюванню кута відкриття тиристорів здійснюється фазове керування, яке дозволяє впливати на напругу, що подається на двигун, і тим самим керувати динамікою його розгону. Такий спосіб забезпечує можливість вибору оптимальних режимів пуску, має просту реалізацію та задовільні техніко-економічні показники.

Подальший розвиток систем керування асинхронними електроприводами пов'язаний із застосуванням мікроконтролерів. Використання цифрових засобів дозволяє реалізовувати складні алгоритми регулювання, забезпечувати автоматизований контроль, діагностику, а також моніторинг і накопичення даних для подальшого аналізу. Це відкриває можливості створення більш компактних, енергоефективних та надійних систем для суднової енергетики.

У даній магістерській роботі виконано проектування системи керування процесом пуску потужних асинхронних двигунів у складі суднових насосів. Розроблено структурну та принципову схеми, алгоритми

					171.6321м.КР.ПЗ.Вступ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

керування та програмне забезпечення. Для перевірки ефективності запропонованих рішень використано математичне моделювання.

Об'єкт дослідження – процес пуску асинхронного електропривода суднового насосного обладнання.

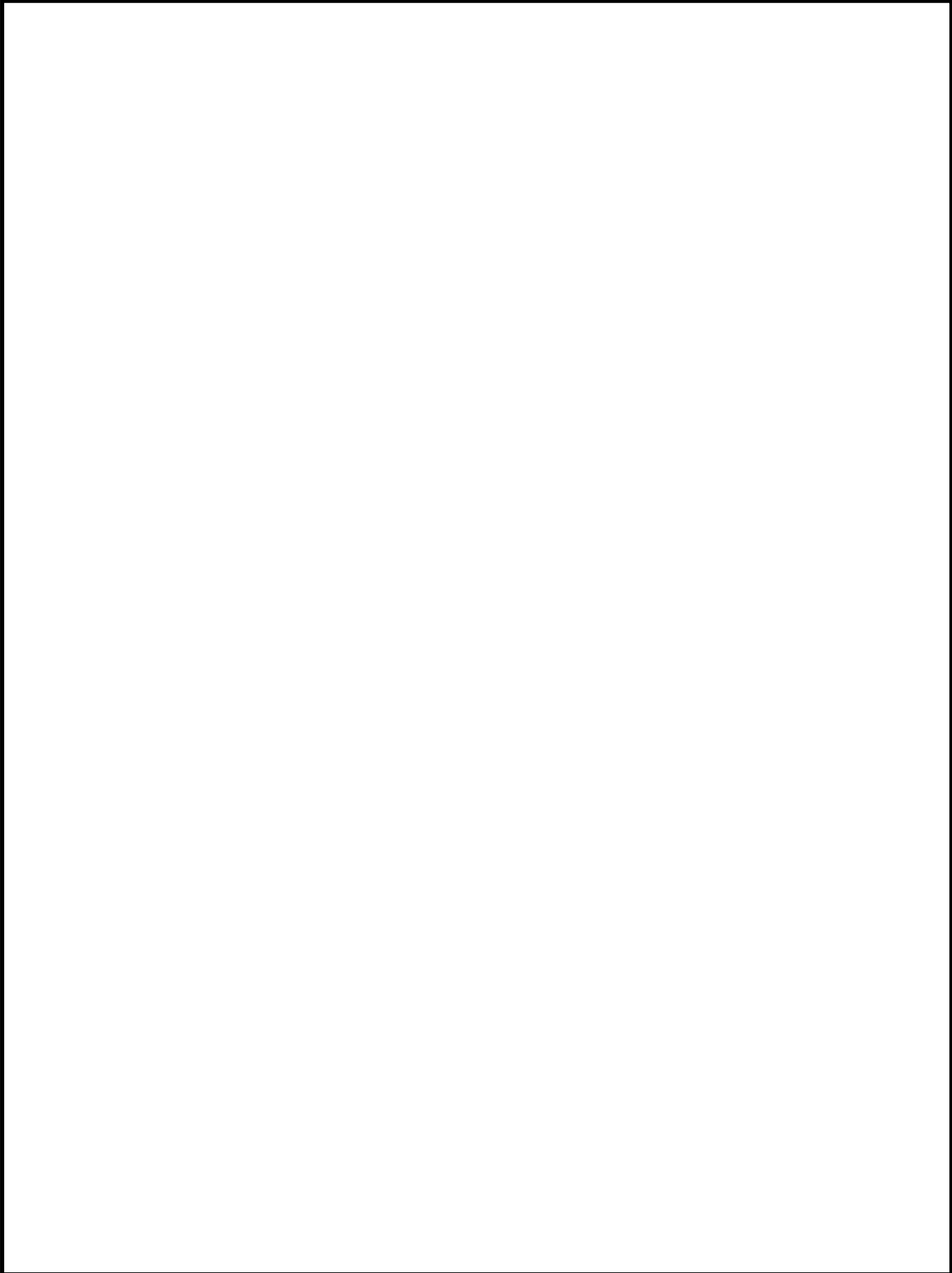
Предмет дослідження – методи та технічні засоби керування пусковими режимами асинхронних двигунів із використанням тиристорних комутаторів та мікропроцесорних систем.

Методи дослідження – аналітичний огляд і порівняння відомих способів керування, математичне моделювання динаміки електропривода, схемотехнічне моделювання, а також програмна реалізація алгоритмів керування.

Новизна отриманих результатів полягає у створенні системи керування пуском асинхронних двигунів із використанням сучасної елементної бази та мікроконтролерів, що дозволяє зменшити пусковий струм на 50% порівняно з прямим пуском. Крім того, розроблена система забезпечує інтеграцію з комп'ютером для моніторингу та збору даних, що створює можливість оптимізації режимів роботи електроприводів і підвищує енергоефективність суднових електроенергетичних установок.

Зв'язок із науковими програмами, темами та планами: дана робота є складовою частиною держбюджетної науково-дослідної теми «Розробка енергоефективних засобів генерації та перетворення електроенергії для систем розмагнічування малих кораблів» (ДР №0124U001522), у виконанні якої автор брав участь як співвиконавець.

					171.6321м.КР.ПЗ.Вступ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		



					171.6321м.КР.ПЗ.Р1			
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробник		Борщевський В.В.			Класифікація й основні види керування судновим асинхронним електроприводом	Літ.	Арк.	Аркуші
Консультант							8	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Ушкаренко О.О.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 1. КЛАСИФІКАЦІЯ Й ОСНОВНІ ВИДИ КЕРУВАННЯ СУДНОВИМ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

1.1. Аналітичний огляд існуючих методів та технічних рішень для пуску потужних асинхронних двигунів

Проблема керованого пуску потужних асинхронних двигунів у складі суднових насосних агрегатів є багатовимірною та включає електротехнічні, схемотехнічні, алгоритмічні й експлуатаційні аспекти. У класичних працях з електромеханіки наведено базові закономірності формування пускових струмів і динаміки асинхронних машин, що дозволяє розуміти фундаментальні обмеження прямих методів пуску і необхідність їхнього корегування в реальних системах з обмеженими джерелами живлення [1, 2]. Для суднових систем характерні більш жорсткі вимоги, оскільки джерела живлення (дизель-генератори) мають обмежену резервну потужність і швидкодію регулювання, а також високі вимоги до масо-габаритних показників і надійності в агресивних морських умовах [3, 4]. У зв'язку з цим у фундаментальній літературі підкреслюється необхідність застосування рішень, які дозволяють значно зменшити пускові струми і водночас не ускладнювати конструкцію та не збільшувати істотно витрати на впровадження [1, 2].

Класичні апаратні підходи (автотрансформаторний пуск, схема «зірка-трикутник», послідовні пускові реостати) детально описані в підручниках і практичній літературі. Вони є простими та перевіреними, але мають очевидні недоліки: великі габарити і маса (особливо важливо для суден), неможливість тонкого налаштування режиму пуску та відсутність цифрових можливостей для діагностики і збору даних [5, 6]. У прикладних дослідженнях також відзначається, що ці методи не завжди забезпечують потрібний ступінь обмеження струму при змінних навантаженнях насосних агрегатів, особливо при високих моментах опору або зміні статичного моменту навантаження під час пуску [7].

					171.6321м.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

Тиристорні (SCR) soft-starter'и та фазове (фазове/амплітудне) керування на базі тиристорів у колі статора є одним із найпоширеніших сучасних технічних рішень для плавного пуску. Праці промислових виробників і наукові статті описують принцип дії – управління кутом відкриття тиристорів для регулювання середньої напруги на статорі – і показують, що правильно налаштовані системи дозволяють суттєво зменшити пікові струми, знизити механічні навантаження на привід і контролювати характер перехідного процесу [8, 9, 10]. У наукових роботах останніх років наведено приклади адаптивних алгоритмів фазового керування, що враховують параметри мережі та навантаження, і які роблять систему більш ефективною у змінних умовах експлуатації [11, 12]. Водночас у літературі підкреслюється, що тиристорні пускачі формують додаткові гармоніки і можуть викликати специфічні взаємодії з моделлю джерела живлення, що вимагає комплексної оцінки сумісності з судновими дизель-генераторами [13, 14].

Альтернативні підходи – PWM-чоппери, перетворювачі частоти (VFD, інверторні приводи) і IGBT-реалізації – дозволяють досягати ще більш точного управління струмом і швидкістю, знижувати рівень гармонік (за рахунок відповідних фільтрів) і забезпечувати функції плавного пуску з одночасним регулюванням швидкості у широкому діапазоні. Однак ці рішення зазвичай дорожчі, складніші в реалізації й експлуатації та вимагають додаткових заходів з охолодження й захисту, що не завжди прийнятно для суден з обмеженими масо-габаритними ресурсами [15, 16]. Порівняльні дослідження вказують, що для чисто пускових задач (без необхідності постійного регулювання швидкості) використання тиристорного soft-starter'а є доцільнішим з точки зору співвідношення «ефективність – вартість – габарити» [10, 17].

Цифрові підходи до керування (мікроконтролери, ПЛК, цифрова обробка сигналів) відкрили нові можливості: реалізацію адаптивних режимів

					171.6321м.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

пуску, інтегрованої діагностики, накопичення і передачі експлуатаційних даних, віддалений моніторинг та оновлення алгоритмів. У наукових публікаціях описано використання нечітких регуляторів, нейромережових схем та комбінованих PID-фазових алгоритмів для оптимізації процесу пуску з урахуванням реальних умов навантаження [18, 19, 20]. Особливо цінними є дослідження, які демонструють, що адаптивні алгоритми дозволяють зберігати обмеження пускового струму при зміні входної напруги або моменту навантаження, що є типовим для морської експлуатації. Разом із тим такі цифрові системи вимагають підвищеної уваги до питань надійності, алгоритмічної стійкості та кібербезпеки, якщо передбачена інтеграція з судовими інформаційними мережами.

Методологічно значна частина робіт присвячена математичному моделюванню процесів пуску та експертизам у середовищі MATLAB/Simulink. Моделі дозволяють досліджувати вплив параметрів стартера (кут відкриття, темп наростання напруги тощо) на струм, крутний момент і час розгону, здійснювати оптимізацію алгоритмів без дорогих натурних випробувань [21, 22]. Практичні випробування на лабораторних стендах і польові дослідження підтверджують, що при правильній побудові моделі розрахунки достатньо добре корелюють з експериментом, що дозволяє використовувати моделювання як базу для конфігурації системи перед впровадженням на судні [23, 24].

У численних роботах аналізуються також питання взаємодії стартових пристроїв з джерелами живлення. Для судових дизель-генераторів характерні великі внутрішні опори та обмежена динаміка регулювання напруги під навантаженням; це спричинює додаткові умови щодо допустимого падіння напруги при пуску і, як наслідок, обмежує допустимі режими запуску двигунів. У літературі наголошується на необхідності моделювання взаємодії стартера, двигуна і джерела живлення як єдиної

системи та проведення аналізу у сценаріях, близьких до реальних експлуатаційних умов [13, 25].

Незважаючи на великий масив досліджень, залишаються відкриті питання. По-перше, вкрай бракує публікацій із детальними експериментальними дослідженнями на реальних суднових установках, що обумовлено складністю та вартістю таких дослідів. По-друге, недостатньо опубліковано робіт, які виконують комплексну техніко-економічну оцінку варіантів (включаючи питання масо-габаритів, вартості впровадження, технічного обслуговування та життєвого циклу) у контексті конкретних класів суден. По-третє, питання гармонійних спотворень та їхнього впливу на інші бортові системи потребують додаткових досліджень, зокрема з урахуванням сумісності з існуючими фільтрами та системами захисту суднових електромереж.

Слід відзначити, що для задачі зниження пускового струму потужних суднових асинхронних двигунів у складі насосних агрегатів найбільш практичним та економічно обґрунтованим є використання тиристорних soft-starter'ів з цифровим (мікроконтролерним) керуванням, які поєднують можливість значного обмеження струму (типові значення 30–70% залежно від схеми і налаштувань), відносну простоту реалізації та можливість інтеграції функцій діагностики і моніторингу. Однак для забезпечення повної безпеки та ефективності такого рішення необхідні подальші дослідження, що передбачають моделювання взаємодії зі специфічними судновими генераторами, натурні випробування та техніко-економічну оцінку впровадження в умовах морської експлуатації.

1.2. Теоретичні відомості про системи плавного пуску

Під час застосування вентильних перетворювачів регулювання електропривода відбувається шляхом зміни тривалості увімкненого та вимкненого станів силових напівпровідникових ключів (тиристорів,

					171.6321м.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

симісторів, транзисторів), підключених до статорних чи роторних кіл асинхронного двигуна. Це призводить до чергування різних схем живлення машини та до варіювання часових інтервалів їхньої роботи. Таким чином, напівпровідникові перетворювачі виступають як дискретні пристрої, що здійснюють імпульсний вплив на асинхронний електродвигун.

У топологіях перетворювачів для керування роторними та статорними колами асинхронних машин використовуються різні типи напівпровідникових елементів (повністю або частково керовані) та методи керування. Частоту перемикання вентильних елементів доцільно порівнювати з частотою змінної напруги. Керовані вентиля можуть вмикатись як у кола змінного, так і постійного струму. У першому випадку можливо застосувати окремий елемент для комутації кожної напівхвилі змінної напруги (наприклад, тиристор), або ж один елемент для перемикання обох напівхвиль (наприклад, симістор чи уніполярний ключ, підключений по діагоналі однофазного мостового випрямляча). У другому випадку комутуючий пристрій встановлюється на виході трифазного випрямляча мостового типу.

Виходячи з наведених ознак, напівпровідникові перетворювачі умовно поділяються на такі групи:

1. Перетворювачі на базі вентильних елементів з обмеженою керованістю (тиристорів чи симісторів), що підключаються до кіл змінного струму і функціонують у режимі природної комутації. Такі пристрої реалізують фазове керування у статорних чи роторних колах асинхронного двигуна. Частота комутації тут жорстко пов'язана з частотою мережі. Керування здійснюється за рахунок зміни кута вмикання вентилів, який відраховується від нульового перетину фазної напруги.

2. Перетворювачі на основі повністю керованих вентильних елементів (тиристорів зі штучною комутацією або потужних транзисторів). Цей клас формує системи імпульсного регулювання у статорних або роторних колах

					171.6321м.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

двигуна. Найчастіше використовуються схеми з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), де при фіксованому періоді перемикання вплив на привід досягається шляхом зміни тривалості провідного стану ключа. У цьому випадку керуючим параметром є відносний час провідності. Якщо раніше імпульсні системи застосовувались переважно у колах постійного струму, то з появою силових транзисторів стало можливим їх ефективне використання і у колах змінного струму. Співвідношення частоти комутації та частоти мережі у широтно-імпульсних перетворювачах може бути різним, проте до даної групи належать системи, де виконується умова перевищення частоти комутації над частотою живлення.

На рис. 3.1 подані схеми фазового керування статорними колами. У такому випадку робоча частота залишається сталою протягом функціонування перетворювача і дорівнює частоті живильної мережі. Схеми на рис. 3.1 відрізняються кількістю фаз статора, що комутуються в процесі регулювання двигуна, а також конфігурацією однофазного комутаційного вузла.

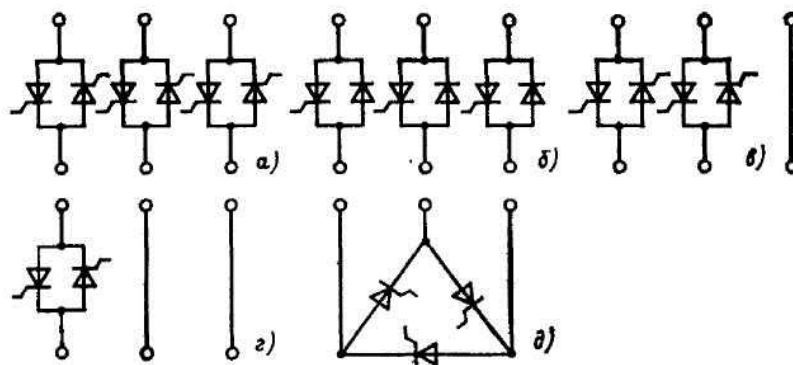


Рисунок 1.1 – Схеми напівпровідникових перетворювачів для керування АД:

а – 3ТТ; б – 3ТД; в – 2ТТ; г – 1ТТ; д – КТК

У ряді варіантів використовуються два тиристори, з'єднані зустрічно-паралельно та включені відповідно у три (схема 3ТТ, рис. 3.1, а), дві (схема 2ТТ, рис. 3.1, в) або одну (схема 1ТТ, рис. 3.1, г) фазу обмоток статора. Замість такої структури ТТ може застосовуватися один симістор.

Використання симісторів принципово не змінює побудову основних кіл двигуна, проте оскільки симістор проводить струм упродовж усього періоду мережевої напруги, виникають додаткові вимоги до системи керування, яка має формувати імпульси протягом кожного напівперіоду, причому їхня полярність і форма визначаються параметрами самого симістора. Варто зазначити, що допустима швидкість наростання прямої напруги в симісторів у кілька разів нижча, ніж у тиристорів, що суттєво ускладнює їх використання в реверсивних електроприводах.

У схемі рис. 3.1, б застосований тиристорно-діодний комутатор (схема ЗТД), який підключається до всіх трьох фаз статора. Перетворювачі рис. 3.1, а–г можуть встановлюватися як між мережею живлення та статорними обмотками, так і з боку виходів обмоток статора. Другий варіант можливий лише за умови, що виведені всі шість кінців статорних обмоток, що конструктивно реалізується не у кожному типі асинхронних двигунів. Тому перший спосіб увімкнення є більш універсальним і зручним, оскільки додатково дозволяє (хоч і з ускладненням схеми) змінювати порядок підключення фаз двигуна до трифазної мережі.

На рис. 3.1, д, представлена схема кільцевого тиристорного комутатора (КТК), дія якого на електродвигун подібна до схеми рис. 3.1, б. Проте його можна підключати лише зі сторони статорних обмоток. При з'єднанні обмоток статора в зірку без нейтрального проводу при фазовому керуванні в статорних колах можливе чергування трьох режимів:

3Ф-М – до мережі підключені всі три фази статора, і струм протікає по кожній з них;

2Ф-М – до мережі приєднані лише дві фази, і струм протікає по обмеженій кількості обмоток;

0Ф-М – усі фази статора від'єднані від живильної мережі, струм у них відсутній.

					171.6321м.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

Отже, при роботі на регульовальних характеристиках струм у фазах статора має переривчастий характер, а прикладена до них напруга є несинусоїдальною.

1.3. Огляд існуючих промислових зразків систем плавного пуску асинхронних двигунів

Пристрій плавного пуску Altistart 01 (ATS01N1) (рис. 1.2) використовується для керованого запуску та зупинки асинхронних двигунів, а також для зниження пускового моменту. Його застосування забезпечує більш м'який і стабільний пуск, що дозволяє уникнути різких механічних навантажень, які прискорюють зношення вузлів. Це сприяє зменшенню витрат на обслуговування, скорочує час простоїв обладнання та підвищує його надійність. Altistart 01 ефективно знижує кидки струму та обмежує момент при запуску механізмів, де не потрібен високий пусковий момент.



Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд пристрою Altistart 01

Пристрої плавного пуску та гальмування Altistart 01 мають такі елементи оснащення:

- регулятор (потенціометр) для встановлення часу пуску;
- регулятор часу гальмування;
- регулятор початкової напруги, що налаштовується залежно від навантажувального моменту двигуна;

					171.6321м.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

- зелений індикатор, який показує наявність живлення;
- жовтий індикатор, що сигналізує про подачу на двигун номінальної напруги;
- клемник для підключення:
- двох дискретних входів (команди «пуск» / «зупинка»);
- одного дискретного входу для активації функції BOOST;
- одного дискретного виходу для індикації завершення пуску;
- одного релейного виходу, який сигналізує про несправність живлення або зупинку двигуна після завершення гальмування.

На рис. 1.3 наведена монтажна схема пристрою.

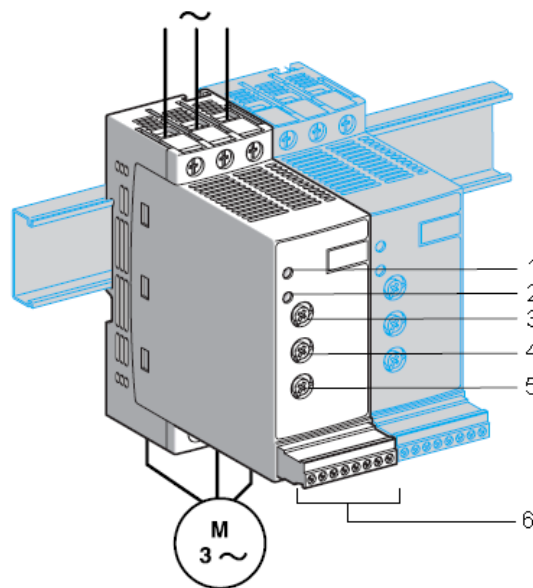


Рисунок 1.3 – Варіант монтажу пристрою плавного пуску ALTISTART 01

На рис. 1.3 елементи пристрою позначені наступним чином:

- 1 – зелений індикатор: «пристрій під напругою»;
- 2 – жовтий індикатор: «двигун живиться номінальною напругою»;
- 3 – потенціометр для встановлення часу пуску;
- 4 – потенціометр регулювання початкової напруги відповідно до моменту навантаження двигуна;
- 5 – потенціометр для налаштування часу гальмування;
- 6 – з'єднувальний клемник.

					171.6321м.КР.ПЗ.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		17

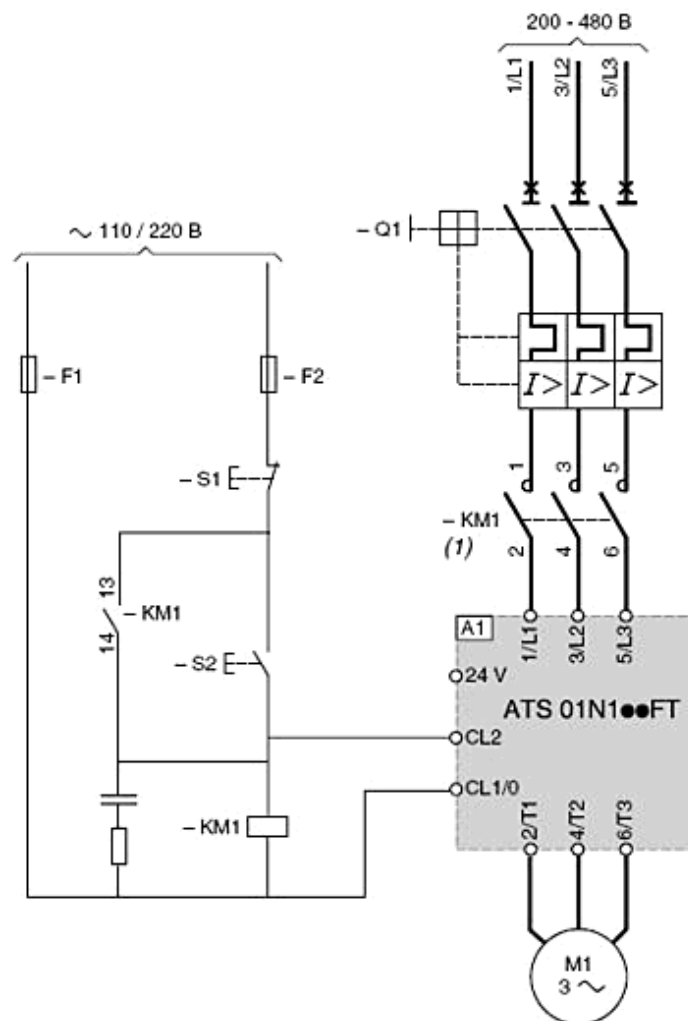


Рисунок 1.4 – Схема підключення пристрою ALTISTART 01

На схемі рис. 1.4 використані наступні позначення: A1 – пристрій плавного пуску; Q1 – автоматичний вимикач; KM1 – контактор; F1 та F2 – запобіжувачі ланцюгів керування; S1, S2 – кнопки зупинки та пуску.

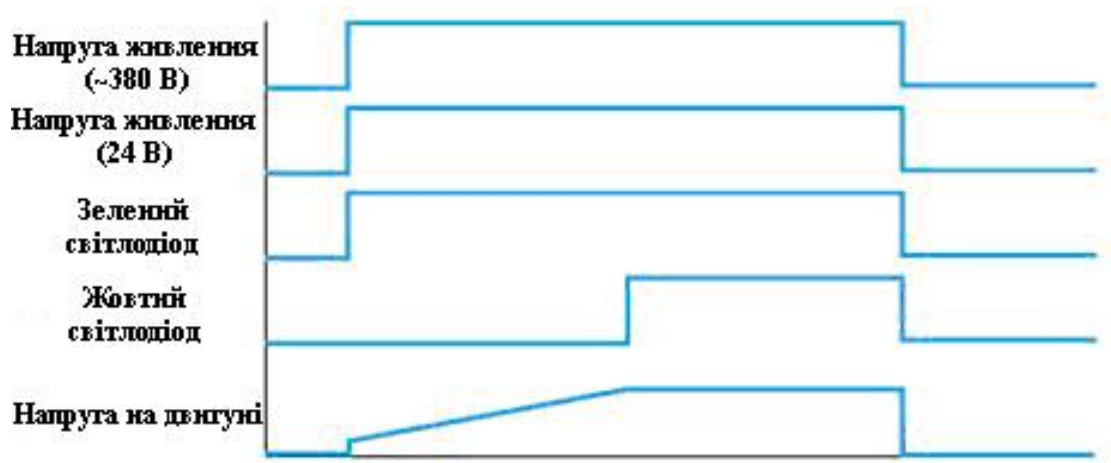


Рисунок 1.5 – Часова діаграма роботи пристрою

1.4. Система плавного пуску асинхронних двигунів Altistart 48

Пусковий пристрій Altistart 48 (рис. 1.6) постачається у готовому до роботи вигляді та відповідає класу захисту двигуна 10. Він оснащений вбудованим терміналом для налаштування параметрів, програмованих функцій та системи захисту.



Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд пристрою плавного пуску асинхронних двигунів Altistart 48

Основні функції електропривода:

- унікальний алгоритм керування моментом (патент Schneider Electric), реалізований у пристрої плавного пуску;
- підтримка крутного моменту двигуна під час розгону, що значно зменшує ударні навантаження;
- зручне регулювання параметрів розгону та пускового моменту;
- функція «байпас» — можливість обходу пристрою обхідним контактором КМЗ після пуску з одночасним збереженням електронного захисту;
- робота в широкому діапазоні частот при живленні від електроагрегатів;
- можливість підключення до двигунів із з'єднанням обмоток «трикутником» (послідовно з кожною обмоткою).

					171.6321м.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Функції захисту:

- непрямий тепловий захист;
- аналіз сигналів від терморезисторів (позисторів);
- контроль тривалості пуску;
- попередній підігрів двигуна;
- захист від перевантаження та недовантаження у сталому режимі роботи.

Функції для інтеграції в системи автоматизації:

- 4 дискретні входи, 2 дискретні виходи, 3 релейні виходи, 1 аналоговий вихід;
- знімні клемники для входів та виходів системи керування;
- можливість налаштування під другий двигун і легка адаптація параметрів;
- відображення електричних величин, навантаження та часу роботи;
- послідовний інтерфейс RS485 для підключення до мережі Modbus.

Підключення:

Схема підключення показана на рис. 1.7.

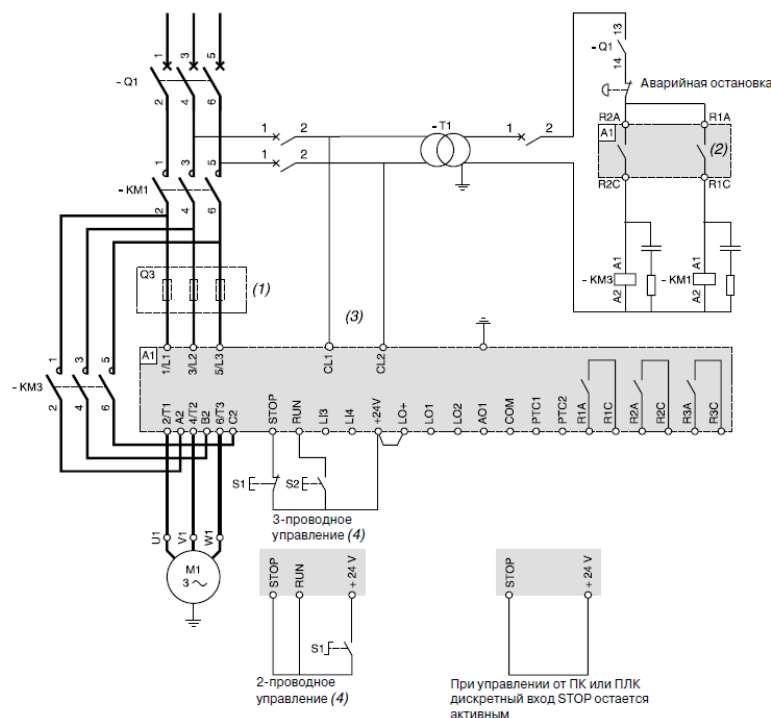
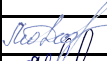


Рисунок 1.7. Схема підключення системи Altistart 48

Зв'язок із ПК здійснюється за принципом «головний – підлеглий» (master-slave): ініціатором обміну виступає тільки ПК, тоді як Altistart 48 відповідає на запити або виконує задані дії. Для передачі даних використовується протокол Modbus RTU.

					171.6321м.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

					171.6321м.КР.ПЗ.Р2			
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата				
Розробник		Борщевський В.В.			Розробка апаратної частини системи керування	Літ.	Арк.	Аркуші
Консультант							22	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Ушкаренко О.О.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

2.1. Формулювання вимог до системи плавного пуску асинхронного двигуна

Розробка апаратної частини системи керування процесом пуску потужних суднових асинхронних двигунів ґрунтується на поєднанні сучасних досягнень у галузі цифрової схемотехніки, програмованих логічних інтегральних схем, мікропроцесорних засобів та силової електроніки, що забезпечують реалізацію високошвидкісних і надійних алгоритмів у режимі реального часу. Одним із ключових напрямів у даній сфері є використання ПЛІС, що дозволяють виконувати паралельну обробку сигналів, реалізовувати апаратні фільтри та модулі захисту, а також істотно знижувати затримки у каналах керування. У цьому контексті значну роль відіграють навчальні та методичні видання [26], де викладено основи проєктування цифрових пристроїв, а також [27], яке зосереджене на практичних аспектах використання мови опису апаратури для створення високопродуктивних цифрових систем. Розширення підходів до побудови програмованих електронних систем збору та обробки інформації представлено у праці [28], де сформульовано методологічні основи інтеграції програмованих модулів у складні багатокomпонентні системи керування та наведено практичні рекомендації щодо організації обміну даними, що є критично важливим у суднових енергетичних комплексах.

Дослідження сучасних проблем функціонування енергетичних систем свідчить про високу чутливість процесів розподілу потужності до динамічної нестабільності приводних двигунів. Зокрема, у роботі [29] показано, що коливання швидкості вала здатні знижувати точність розподілу активної потужності між паралельно працюючими генераторами, а також запропоновано апаратно-програмні методи компенсації цього ефекту, що може бути використано при формуванні системи пуску та синхронізації суднових двигунів. Формальне представлення елементів автоматизованого

					171.6321м.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

робочого місця оператора, наведене у праці [30], дозволяє встановити загальні вимоги до побудови апаратних модулів інтерфейсу та забезпечення надійності, що безпосередньо впливає на ергономіку та ефективність керування складними енергетичними об'єктами.

Окрему увагу слід приділити роботам, присвяченим оптимізації структури системи керування індукційними двигунами. У дослідженні [31] запропоновано методи мінімізації складності моделі керування з одночасним підвищенням її адекватності, що сприяє ефективнішій реалізації алгоритмів на обмежених ресурсах мікропроцесорних платформ. Стаття [32] розкриває аналітичні підходи до опису процесів керування індукційними двигунами і синхронними генераторами, що дозволяє формалізувати апаратні вимоги до системи, визначити критичні часові параметри та уточнити умови стійкості, які повинні бути враховані при апаратному проєктуванні.

Таким чином, аналіз наведених джерел [26-32] дає змогу стверджувати, що ефективна система керування пуском потужних суднових асинхронних двигунів повинна базуватися на реалізації високошвидкісних підсистем обробки та захисту, мікропроцесорних контролерів для виконання адаптивних алгоритмів та оптимізованих моделей керування, а також апаратних інтерфейсів, здатних забезпечити надійний моніторинг і взаємодію з оператором у складних умовах суднової експлуатації.

До функцій системи керування тиристорами входить забезпечення надійної і стабільної роботи тиристорів при роботі асинхронного двигуна на природних і регульовальних характеристиках і регулювання кута α в необхідному діапазоні.

Для визначення вимог до системи керування при керуванні асинхронним двигуном необхідно врахувати наступні обставини:

1. кут φ асинхронного двигуна, що залежить від s , змінюється в широкому діапазоні. Для різних двигунів, що працюють на різних режимах, $0 < \varphi < 90^\circ$;

					171.6321м.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

2. для схем з'єднання обмоток статора при забезпеченні всіх режимів доцільно робити синхронізацію керуючого імпульсу щодо напруги тієї фази мережі, у яку включений тиристор. З урахуванням сказаного кут α відраховується від моменту проходження через нуль відповідної фазної напруги;

3. вимоги до параметрів керуючого імпульсу залежать від схеми з'єднання обмоток статора.

При з'єднанні обмоток статора в зірку з нульовим проводом комутація струму в кожній фазі відбувається незалежно. Для роботи двигуна на природних характеристиках необхідно забезпечити кут $\alpha = \varphi$. При малій ширині керуючих імпульсів ($2-5^\circ$) у процесі зміни фазового зрушення струму щодо напруги в діапазоні $\varphi_1 = \varphi_{\min}$ до $\varphi_2 = 90^\circ$ необхідно коректувати момент подачі керуючих імпульсів (стежити за фазою струму), щоб не була порушена нормальна комутація. Здійснити таку корекцію без значного ускладнення системи неможливо. Більш простим способом забезпечення стабільності і надійності відмикання тиристорів є формування керуючих імпульсів значної ширини. Очевидно, якщо в розглянутому випадку ширина імпульсу $\gamma = 90^\circ - \varphi_{\min}$, то при $\alpha = \varphi_{\min}$ забезпечується робота електропривода на природних характеристиках у всіх режимах.

У реальних електроприводах $\varphi_{\min} = 20 \div 30^\circ$, тому необхідно забезпечити $\gamma > 60^\circ$; звичайно система керування реалізує ширину імпульсу $\gamma \approx 70 \div 90^\circ$.

При живленні асинхронного двигуна переривчастим струмом ($\alpha > \varphi$) тиристори відмикаються переднім фронтом імпульсу, і ширина його в цьому випадку не має значення.

Трохи інша картина спостерігається при з'єднанні обмоток статора в зірку без нульового проводу. У цьому випадку при безперервному струмі тиристори комутирують відповідні фазні напруги, тому вимоги щодо величини γ і початкового кута відкриття тиристорів ($\alpha_{\text{поч}} = \varphi_{\min}$) залишаються тими ж, що і для схеми з нульовим проводом. З появою режиму

					171.6321м.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

переривчатого струму, коли $\alpha > \varphi$, мають місце ділянки, де вентилі комутирують лінійну напругу. У цьому випадку протікання струму в навантаженні можливо тільки при одночасному відкритті двох тиристорів.

При з'єднанні обмоток статора в трикутник вимоги до фазировки і ширини керуючого імпульсу аналогічні схемі з'єднання обмоток статора в зірку без нульового проводу.

Таким чином, для всіх розглянутих схем з'єднання обмоток статора необхідною умовою надійної комутації струму у всьому діапазоні зміни α є наявність керуючого імпульсу, ширина якого $\gamma > 60^\circ$, а зрушення переднього фронту кута α відраховується від нуля фазної напруги. Внаслідок того, що кожен тиристор у фазі комутирує відповідну (позитивну або негативну) напівхвилю напруги, то керуючі імпульси повинні надходити на нього з частотою мережі живлення, тобто кутове зрушення між імпульсами дорівнює 2π , причому ці імпульси синхронізовані щодо фазної напруги тієї фази, у яку включений тиристор.

Для зменшення розмірів системи керування і зниження його потужності можна формувати серію або пачку високочастотних імпульсів, загальна тривалість якої $\gamma > 60^\circ$. При цьому тривалість кожного імпульсу в пачці повинна перевищувати час, протягом якого тиристор переходить із закритого стану у відкритий, тобто струм у навантаженні досягає значення струму утримання $I_{\text{упр}}$ тиристора, величина якого для вітчизняних силових тиристорів приблизно дорівнює 300-500 мА. Тривалість паузи між сусідніми імпульсами в пачці не повинна бути великою, щоб уникнути появи значної несиметрії в кутах відкриття тиристорів різних фаз двигуна. Якщо прийняти тривалість імпульсу і паузи однаковою і вибрати частоту їх проходження $f = 4 \div 6$ кГц, що відповідає тривалості одиночного імпульсу порядку 80-100 мкс, то буде забезпечено надійне відкривання тиристорів за час дії кожного з імпульсів, а можлива асиметрія кутів відкриття по фазах не перевищить 2° , що не зробить істотного впливу на роботу системи.

					171.6321м.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

При керуванні тиристорами доцільно формувати загальну ширину серії імпульсів $\gamma = \pi - \alpha$, що запобігти наявності сигналу керування в негативні напівперіоди напруги живлення. Величина $\gamma = \pi - \alpha$ забезпечить надійну роботу асинхронного електропривода як при безперервних струмах у двигуні ($\gamma > 90^\circ$ при $\alpha = 10 \div 20^\circ$), так і в режимі переривчастого струму. В останньому випадку при з'єднанні обмоток статора в зірку без нульового проводу тривалість імпульсу повинна бути не менш 60° , що при $\alpha = 10 \div 20^\circ$ визначає максимальний кут $\alpha = 120^\circ$, який цілком достатній для цієї схеми з'єднання статорних обмоток.

Використання тиристорів для керування асинхронними двигунами дозволяє створювати швидкодіючі замкнуті системи управління, у яких формування режимів здійснюється за допомогою зворотних зв'язків по струму, швидкості, прискоренню та положенню.

Зокрема, пуск двигуна може виконуватися із застосуванням зворотного зв'язку по струму статора. Використання токового відсічення дозволяє зменшити перехідні струми, що у декілька разів перевищують номінальні, знижуючи втрати в двигуні, дає змогу обирати тиристори меншої потужності або ефективно керувати двигунами великої потужності. Схема замкнутої САР зі зворотним зв'язком по струму статора приведена на рис. 2.1.

					171.6321м.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

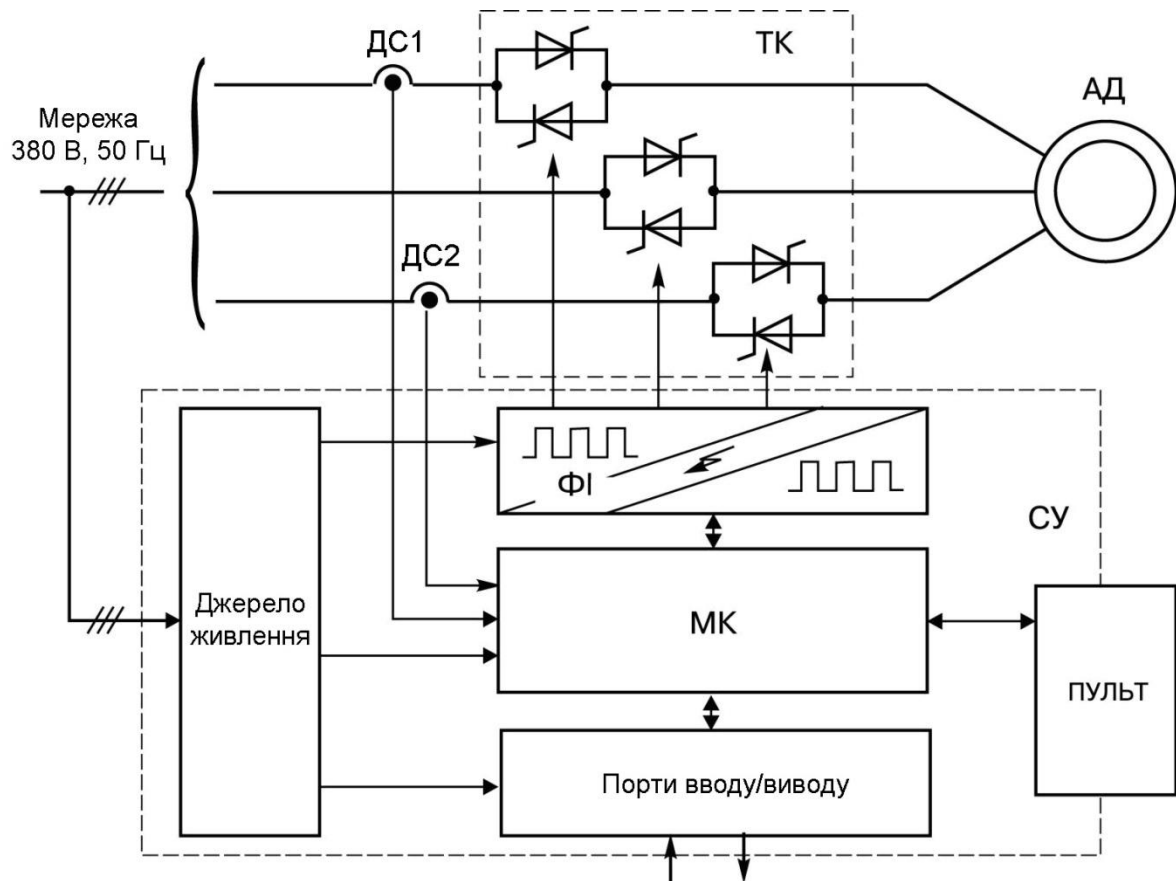


Рисунок 2.1 – Схема замкнутої системи автоматичного регулювання з введенням зворотного зв'язку по струму статора;

U_{IS3} - напруга завдання на струм статора; U_{IS} - напруга зворотного зв'язку по струму статора; ДС – датчик струму, РС – регулятор струму; ПК – пристрій керування

Для одержання функціональної схеми замкнутої системи автоматичного регулювання з введенням зворотного зв'язку по струму статора використаємо схему заміщення асинхронного двигуна (рис. 2.1).

Електромагнітний момент можна записати як:

$$M_{EM} = f_1(I_2'^2),$$

$$I_2' = f_2(U_{o.\phi}).$$

Залежність між швидкістю і ковзанням ротора може бути представлена рівнянням:

$$\omega = \omega_c (1 - s),$$

і, отже,

$$\frac{d\omega}{dt} = -\omega_c \frac{ds}{dt}.$$

При постійному моменті інерції ротора двигуна рівняння руху системи двигун-навантаження набуде виду:

$$M_{EM} - M_C = J \frac{d\omega}{dt}.$$

При підстановці рівнянь маємо:

$$M_C - M_{EM} = J\omega_c \frac{ds}{dt}.$$

Використовуючи наведені вище рівняння, одержуємо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} M_{EM} = f_1(I_2'^2) \\ I_2' = f_2(U_{\phi}) \\ f_1(s) = \frac{m_1 R_2'}{s \cdot \omega_c} \\ f_2(s) = \frac{1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x')^2}} \\ M_C - M_{EM} = J\omega_c \frac{ds}{dt} \end{cases}$$

Система рівнянь дає можливість побудувати функціональну схему заміщення асинхронного двигуна.

На основі функціональної схеми заміщення асинхронного двигуна функціональна схема замкненої системи автоматичного регулювання з введенням зворотного зв'язку по струму фази статора набуде наступного виду (рис. 2.2).

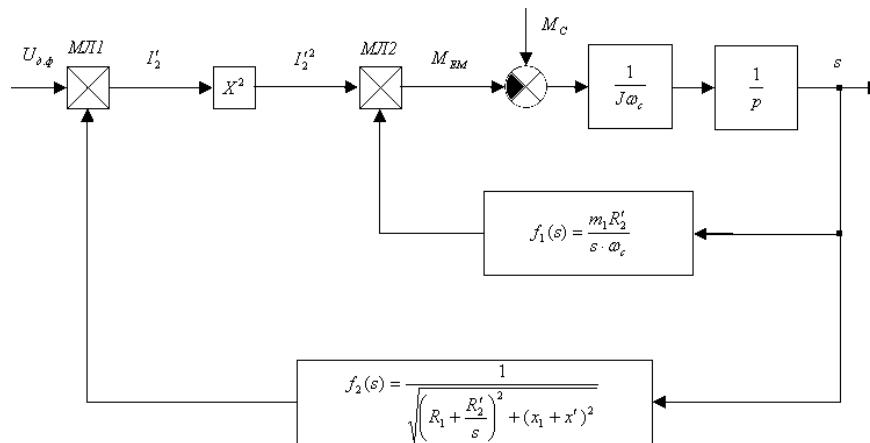


Рисунок 2.2 – Функціональна схема заміщення асинхронного двигуна

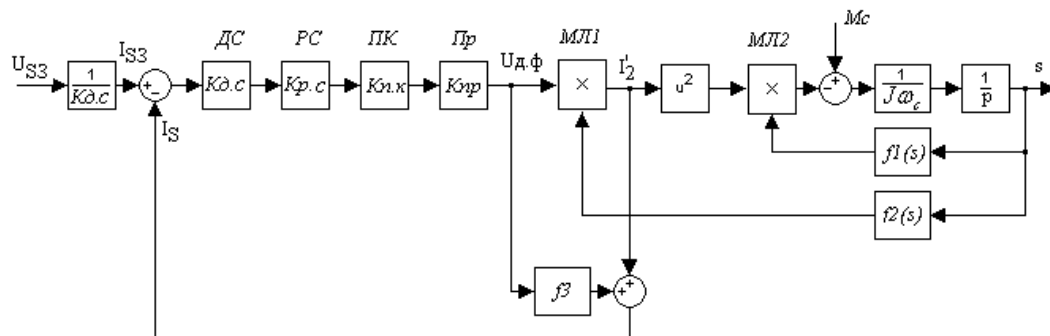


Рисунок 2.3 – Функціональна схема замкненої системи автоматичного регулювання з введенням зворотного зв'язку по струму статора асинхронного двигуна

2.2. Розрахунок основних елементів системи керування

Принципова схема керування пуском асинхронного двигуна наведена на рис. 2.4. Функціонально система складається з кількох основних блоків: синхронізації та контролю напруги живлення; підсилення сигналів від струмових датчиків; формування керуючих імпульсів; мікропроцесорного модуля; індикації та управління; блоку живлення.

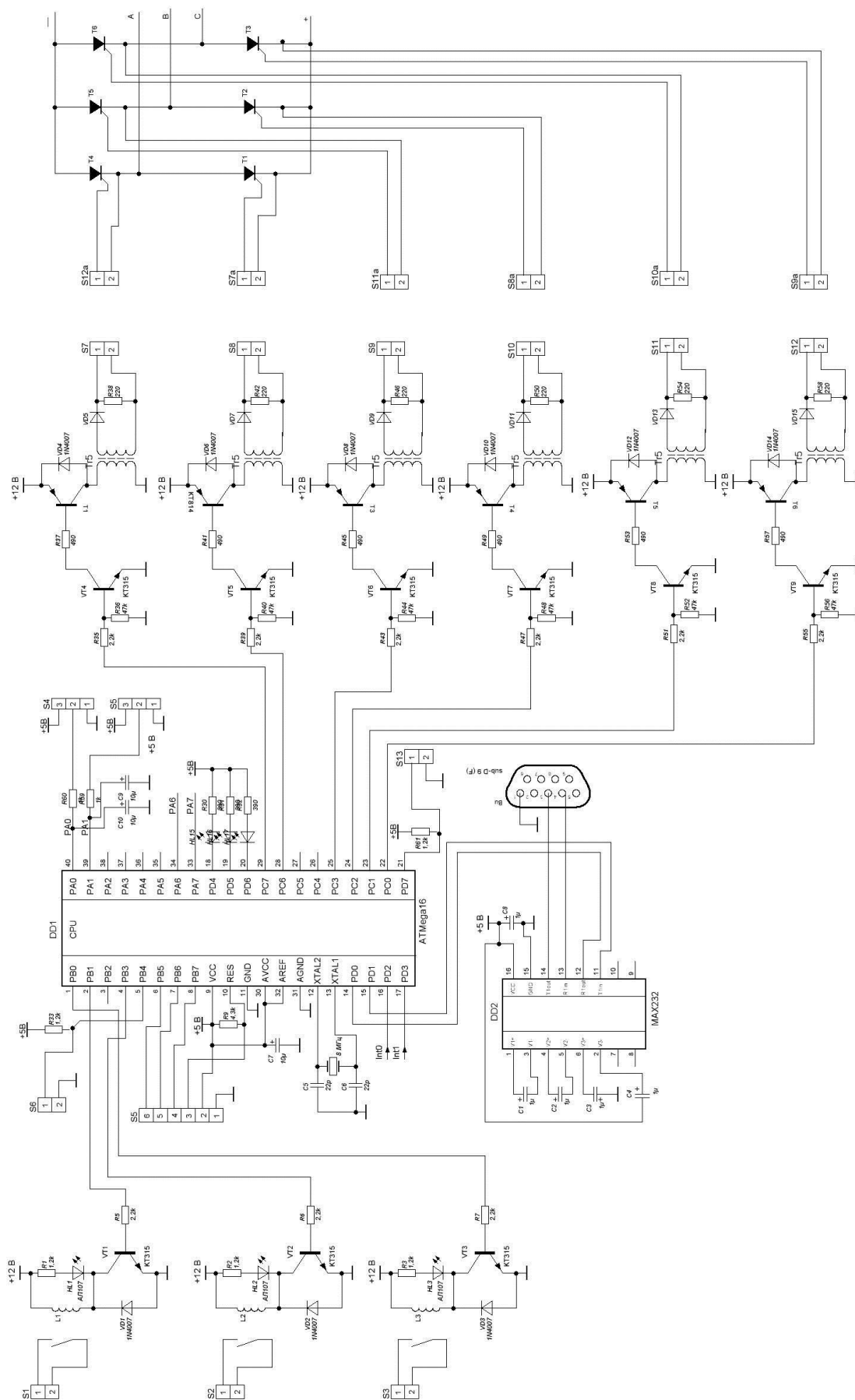


Рисунок 2.4 – Принципова схема системи керування

Для синхронізації системи керування з фазною напругою мережі використовується блок синхронізації, показаний на рис. 2.5. Його основу складають два ідентичних нуль-детектори. Розглянемо роботу одного з них, побудованого на операційному підсилювачі DA1.1 за схемою гістерезисного неінвертуючого компаратора. Опорна напруга на інвертуючому вході встановлюється дільником R28–R29. Вхідний змінний сигнал подається на неінвертуючий вхід через дільник R3–R4 та формується щодо схемної землі дільником R1–R2. Для коректної роботи детектора сигнал зміщується на величину опорної напруги за допомогою дільника R3–R4.

Значення опорної напруги визначає максимальну амплітуду вхідного сигналу:

$$U_{BX,max} = U_{REF} \quad (2.1)$$

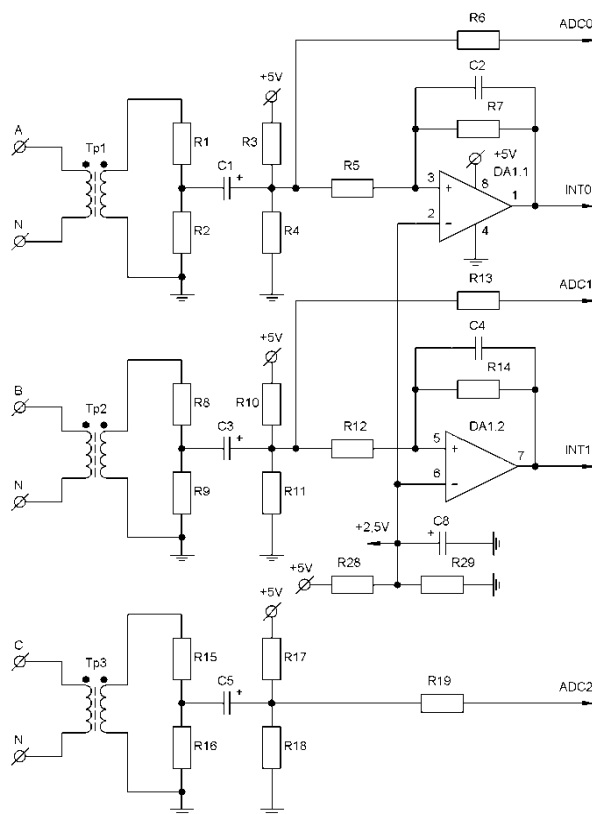


Рисунок 2.5 – Принципова схема блоку синхронізації з мережею і контролю напруги мережі живлення

Використовуючи рівняння (2.1) можна розрахувати опори дільника $R1$ - $R2$:

$$U_{BX.\max} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\phi}}{k_{mp}} \cdot k_3 \cdot \frac{R2}{R1 + R2}, \quad (2.2)$$

де U_{ϕ} – діюче значення фазної напруги мережі, k_{mp} – коефіцієнт трансформації напруги трансформатора $Tr1$, k_3 – коефіцієнт запасу по напрузі (1.15 ÷ 1.20).

Для усунення впливу дільника $R1$ - $R2$ на вхід нуль-детектора використовується додатковий відокремлюючий конденсатор $C1$.

Величини опорів $R5$, $R7$ визначають ширину гістерезису U_{HYS} і порогови спрацювання компаратора U_{TL} , U_{TH} (рис. 2.6).

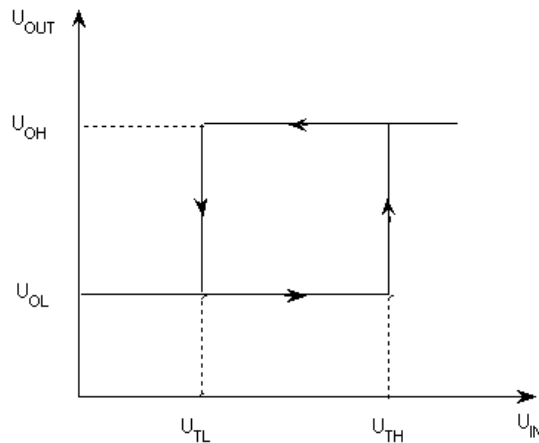


Рисунок 2.6 – Діаграма роботи компаратора з гістерезисом (U_{OH} , U_{OL} – напруги насичення компаратора)

Значення напруг U_{HYS} , U_{TL} і U_{TH} розраховуються по наступних формулах:

$$U_{TL} \approx \frac{(R5 + R7) \cdot U_{REF} - R5 \cdot U_{DD}}{R3}, \quad (2.3)$$

$$U_{TH} \approx \frac{(R5 + R7) \cdot U_{REF}}{R7}, \quad (2.4)$$

$$U_{HYS} = U_{TH} - U_{TL}, \quad (2.5)$$

$$U_{HYS} \approx \frac{R5}{R7} \cdot U_{DD}, \quad (2.6)$$

де U_{DD} – напруга живлення.

Ємність $C2$ застосовується для частотної корекції ширини наявного гістерезису. Конденсатор, включений у ланцюг додатного зворотного зв'язку, додає ще один полюс у передатній функції, що створює залежність ширини гістерезису від частоти вхідного сигналу.

Для сигналів з частотами $f < f_p$ ($f_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R7 \cdot C2}$) ширина зони гістерезису визначається за рівнянням (2.5). Якщо частота вхідного сигналу $f > f_p$, тоді напруги U_{HYS} розраховується по такій формулі:

$$U_{HYS} \cong \left[\frac{R5}{Z} \times U_{DD} \right], \quad (2.7)$$

де $Z = R7 \parallel C2 = \frac{R7}{1 + R7 \cdot C2 \cdot p}$, $p = j\omega$.

Введення в схему частотної корекції дозволяє ефективно усунути вплив високочастотних перешкод, що виникають при роботі тиристорного перетворювача.

Контроль і вимірювання значення струму статора здійснюється за допомогою схеми, що наведена на рис. 2.7.

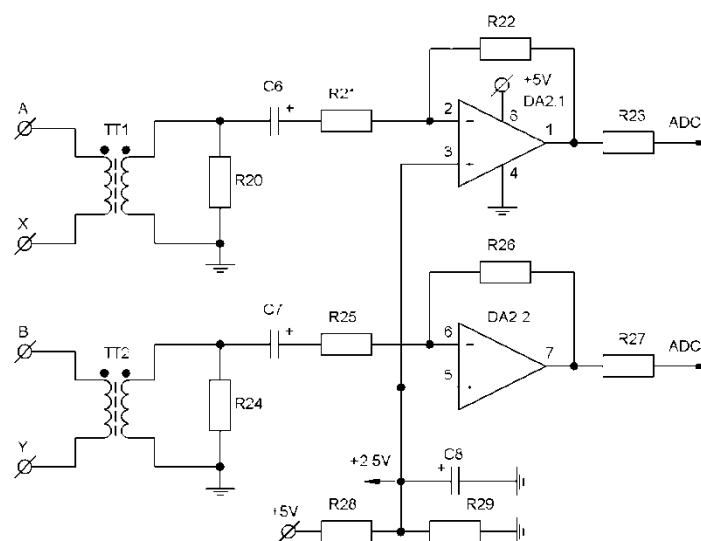


Рисунок 2.7 – Блок підсилення сигналів, що отримуються з датчиків струму

В якості датчика струму використовується трансформатор струму з шунтом, включеним у вторинну обмотку. Розглянемо роботу підсилювача сигналу, який зібрано на операційному підсилювачі *DA2.1*. Напруга, що знімається з шунта *R20*, подається на вхід операційного підсилювача *DA2.1*, зібраного за схемою інвертуючого підсилювача. Підсилювальний каскад має коефіцієнт підсилення по напрузі, що дорівнює:

$$K = -\frac{R22}{R21}. \quad (2.8)$$

Для того, щоб мати можливість підсилювати обидві напівхвилі вхідного змінного сигналу, необхідно сформувати штучну робочу точку. Значення напруги в цій робочій точці складає $U_{REF} = 2.5V$ і задається дільником напруги *R28-R29*, а її стабілізація здійснюється за допомогою конденсатора *C8*.

Оскільки у вхідному сигналі напруги відносно потенціалу робочої точки є постійна складова напруги, а її присутність на вході операційного підсилювача може перевести (і, скоріш за все, переведе) його в стан насичення, то для її усунення застосовується додатковий відокремлюючий конденсатор *C6*. Ланцюг *R21-C6-R22* разом з операційним підсилювачем утворюють фільтр верхніх частот з частотою зрізу:

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R21 \cdot C6}. \quad (2.9)$$

Для того, щоб уникнути спотворення вихідного сигналу напруги розрахована частота зрізу фільтру верхніх частот повинна бути на 2 порядки менше базової частоти вхідного сигналу:

$$f_{-3dB} = \frac{f_{\phi}}{100}. \quad (2.10)$$

При $f_{\phi} = 50$ Гц маємо $f_{-3dB} = 0.5$ Гц.

Максимальне значення напруги на виході операційного підсилювача визначається наступним чином:

					171.6321м.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$U_{\max} \approx \frac{K \cdot R_{20} \cdot I_{1\max} \cdot \sqrt{2}}{k_{mp.m}}, \quad (2.11)$$

де $I_{1\max}$ – максимальне діюче значення першої гармоніки струму обмотки статора асинхронного двигуна, $k_{mp.m}$ – коефіцієнт трансформації струму в трансформаторі $ТТ1$.

Мікропроцесорний модуль включає мікроконтролер DD1 та інтерфейсну мікросхему DD2. Спеціально розроблені інтерфейсні мікросхеми забезпечують перетворення напруги +5 В у +10 В за допомогою генератора і помножувача напруги, інвертування +10 В у –10 В та адаптацію рівнів сигналів послідовного інтерфейсу. Для роботи мікросхеми MAX232 необхідне підключення додаткових зовнішніх конденсаторів, що незначно ускладнює конструкцію, але компенсується її функціональними перевагами.

Мікроконтролер DD1 (ATmega16) підключено за типовою схемою, рекомендованою виробником. Вихідні драйвери послідовних портів дозволяють безпосередньо керувати транзисторами VT1–VT6. Режим роботи системи вибирається за допомогою кнопок SB0–SB3, а поточна інформація відображається на LCD-модулі, який використовує контролер HD44780.

Блок живлення модуля включає трансформатор Tr4 із діодним мостом VD1–VD4 та інтегральний стабілізатор DA3 для формування стабільної напруги +5 В. Габаритна потужність трансформатора становить 5–10 Вт, а вторинна обмотка забезпечує вихідну напругу 15–20 В.

2.3. Розрахунок надійності системи керування

Для визначення імовірності безвідмовної роботи системи керування пуском асинхронного двигуна необхідно знати потоки відмов кожного з елементів що входять до схеми. Потоки відмов таких елементів зведені в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Потоки відмов елементів системи

					171.6321м.КР.ПЗ.Р2	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

Елементи	$\lambda_i \cdot 10^5$, годин ⁻¹	Кількість
Напівпровідникові прилади	0,5	20
Резистори	0,25	46
Конденсатори	0,15	25
Кварцовий резонатор	0,03	1

Сумарна інтенсивність відмов визначається по формулі:

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^n n_i \cdot \lambda_i, \quad (2.12)$$

де n_i – кількість елементів, λ_i – інтенсивність відмов елементів.

Тоді $\lambda_0 = 2.498 \times 10^{-4}$ (годин⁻¹).

Середній час безвідмовної роботи розраховується як

$$m_t = \frac{1}{\lambda_0}. \quad (2.13)$$

Використовуючи формулу (2.13) маємо $m_t = 4003$ годин.

Ймовірність безвідмовної роботи системи визначається по формулі:

$$P(t) = e^{-\lambda_0 \cdot t}. \quad (2.14)$$

На рис. 2.8 представлений графік ймовірності безвідмовної роботи системи.

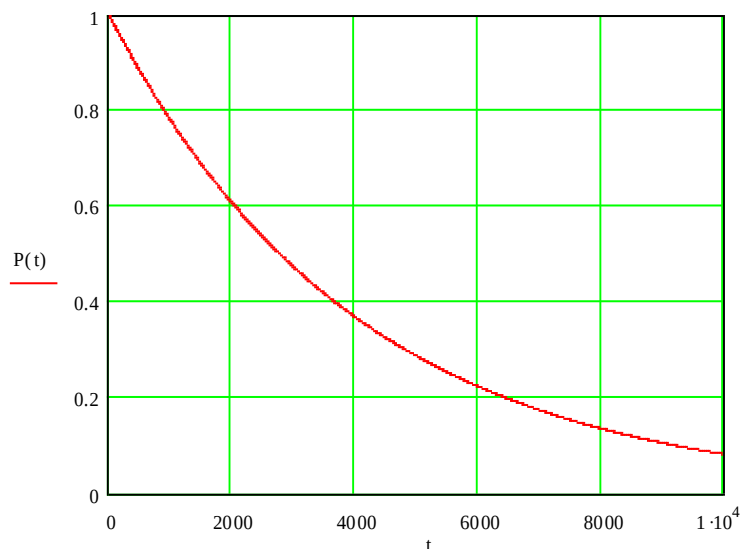


Рисунок 2.8 – Графік ймовірності безвідмовної роботи системи

Тривалість безвідмовної роботи оцінюється при ймовірності безвідмовного функціонування 0,25. Відповідно до цього визначення, її обчислюють за формулою:

$$t = -\frac{1}{\lambda_0} \cdot \ln(P_{0,25}) . \quad (2.15)$$

Тоді $t=5550$ годин.

2.4. Розробка моделі та моделювання роботи системи плавного пуску асинхронного двигуна

На рис. 2.9 наведено модель для дослідження процесу пуску асинхронного двигуна.

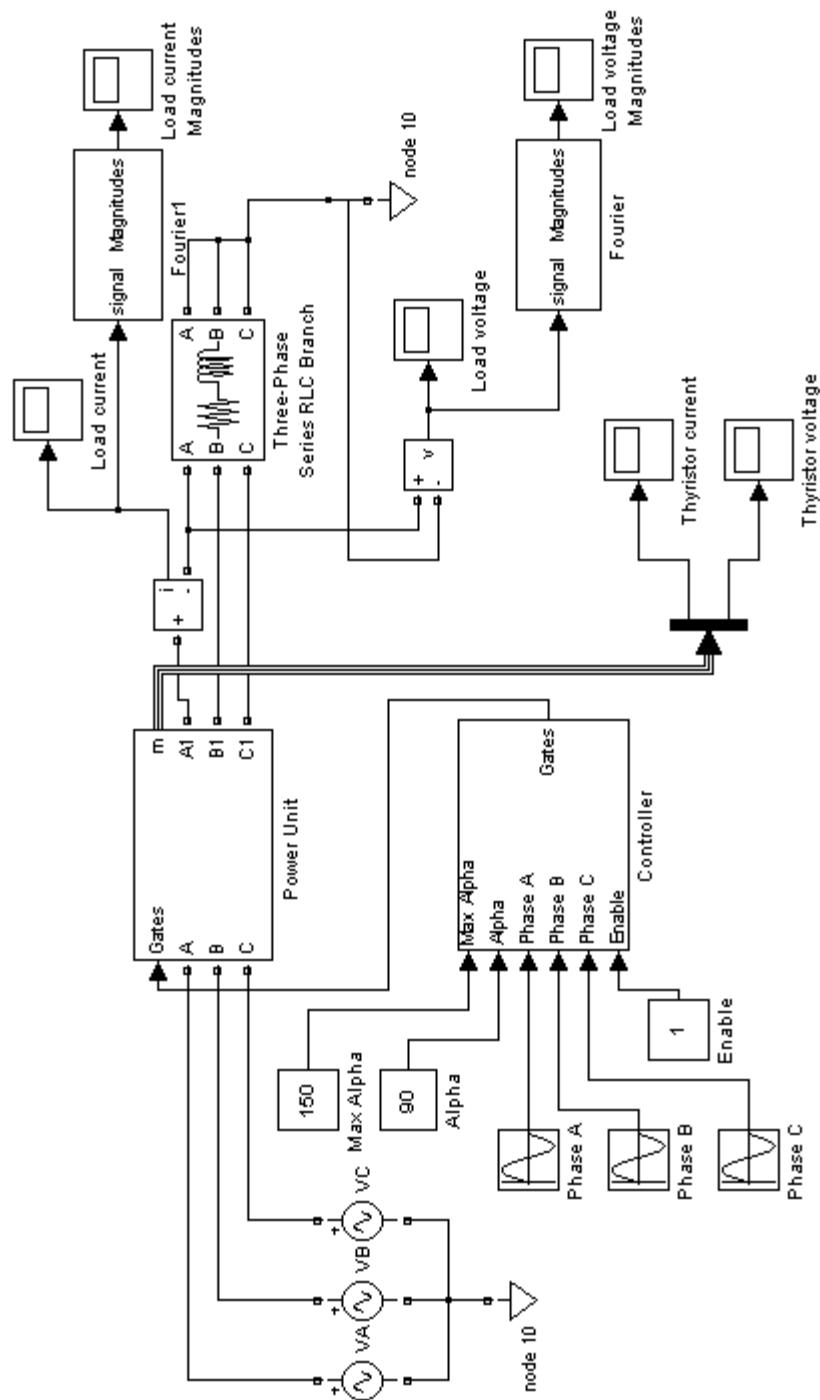


Рисунок 2.9 – Модель для дослідження роботи системи керування

На рис. 2.10 наведено модель силового блоку.

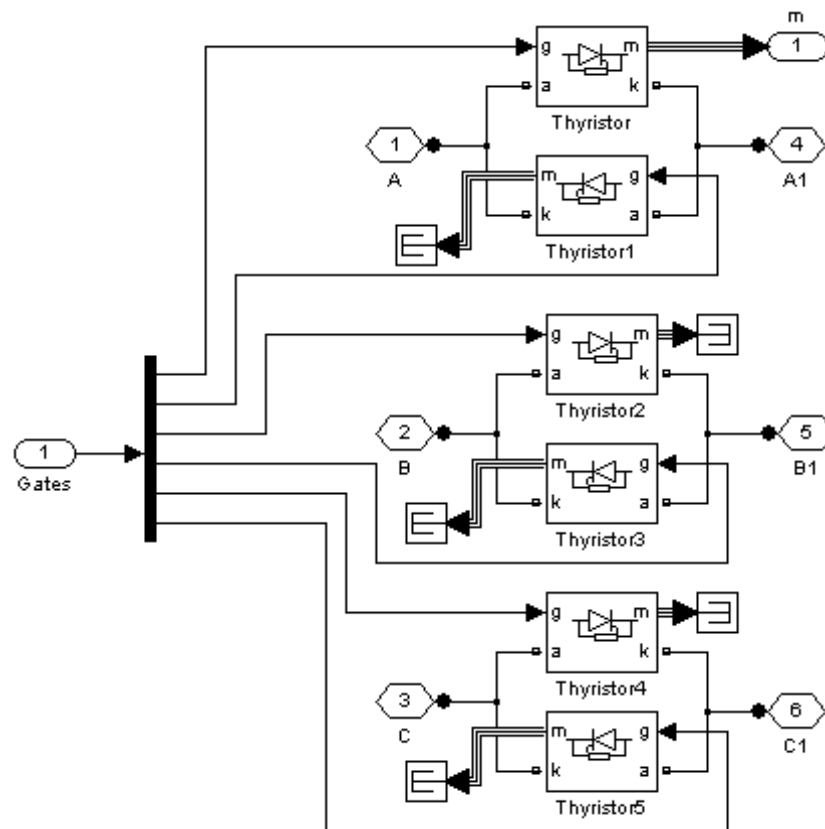


Рисунок 2.10 – Модель силового блоку системи керування процесом пуску асинхронного двигуна

Результати моделювання пуску асинхронного двигуна з вентиляторним навантаженням на валу представлені на рис. 2.1.

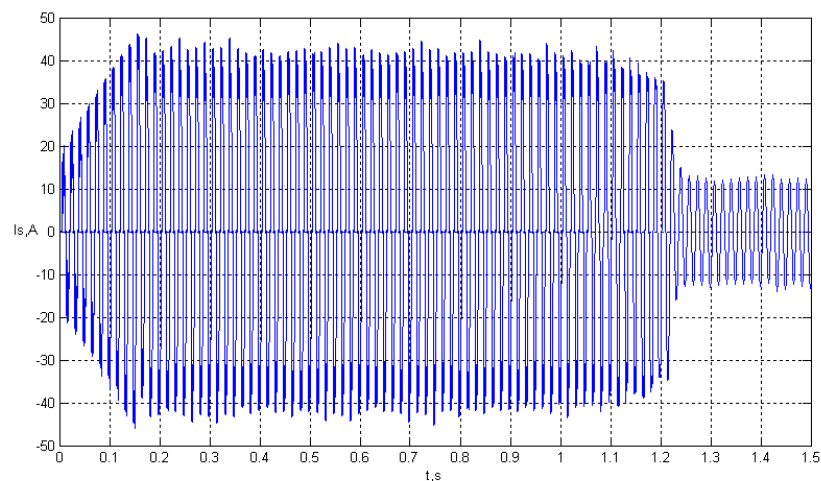


Рисунок 2.11 – Осцилограма струму статора при пуску асинхронного двигуна

Результати моделювання кривої напруги при з'єднанні обмоток статора асинхронного двигуна в зірку без нульового проводу наведено на рис. 2.12.

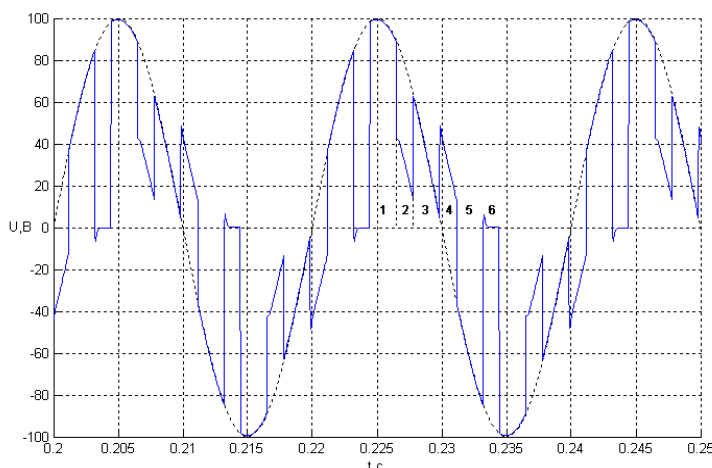
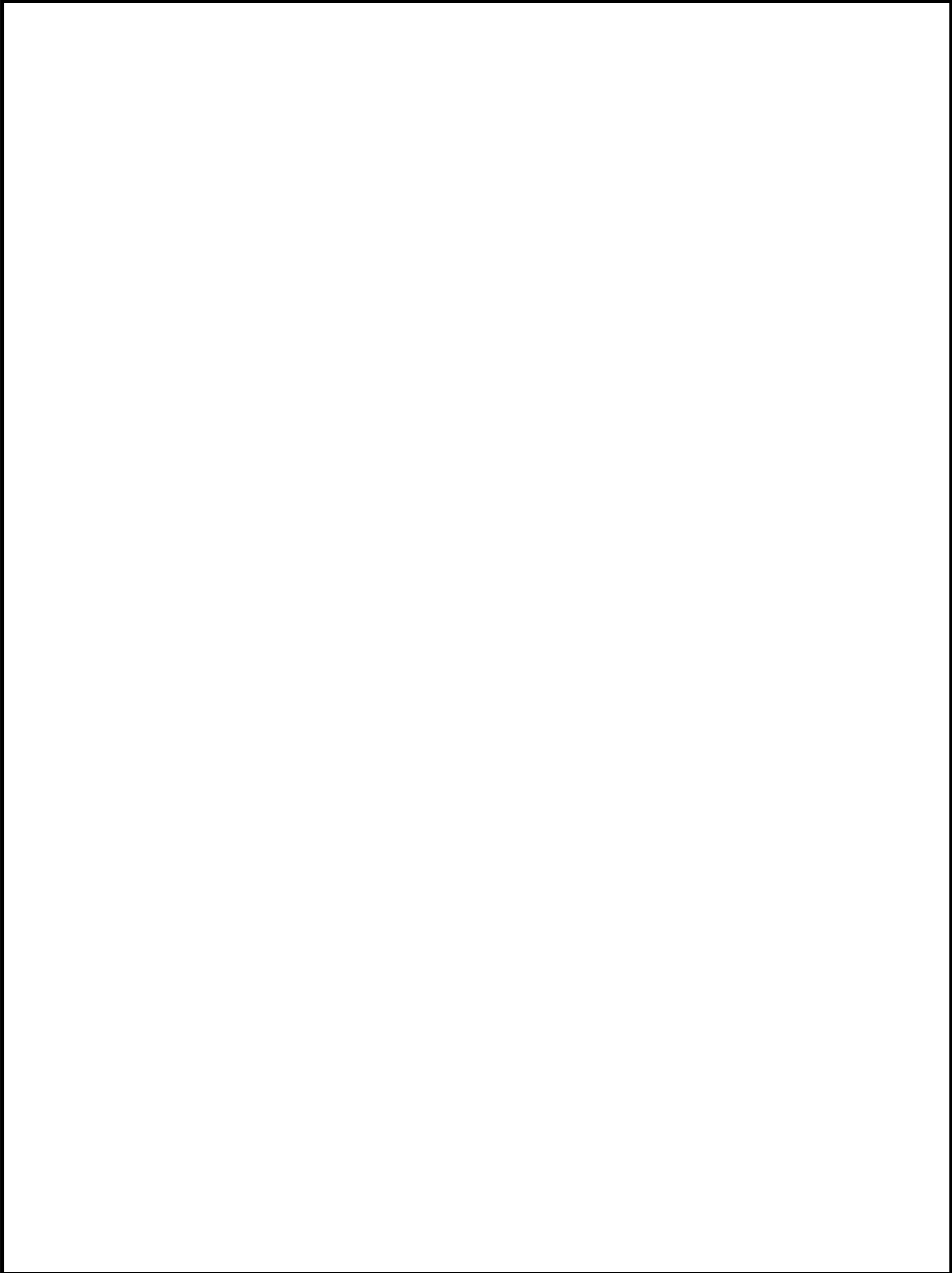


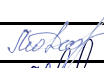
Рисунок 2.12 – Форма напруги на асинхронному двигуні при $\varphi = 60^\circ$, $\alpha = 80^\circ$

Висновки до розділу

У розділі розроблено модель суднової електроенергетичної системи та отримано осцилограми струмів і напруг під час пуску асинхронного двигуна потужного насоса. Досліджено вплив зворотного зв'язку та створено функціональну схему замкнутої системи автоматичного регулювання зі зворотним зв'язком по струму статора. Моделювання показало, що застосування зворотного зв'язку обмежує пусковий струм, але збільшує час розгону.

Розроблено принципову схеми суднового електроприводу, виконано розрахунок елементів. Використання мікропроцесорних засобів перенесло частину керуючих функцій у програмну частину, що зменшило кількість елементів, вартість, масо-габаритні показники та підвищило надійність. Для роботи системи в умовах низької якості електроенергії застосовано спеціальні схемотехнічні рішення (нуль-детектори з частотною корекцією, низькочастотні фільтри).



					171.6321м.КР.ПЗ.РЗ			
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробник		Борщевський В.В.			Програмне забезпечення для керування системою плавного пуску асинхронного двигуна	Літ.	Арк.	Аркуші
Консультант							42	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Ушкаренко О.О.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ КЕРУВАННЯ СИСТЕМОЮ ПЛАВНОГО ПУСКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

3.1. Опис процесу роботи з програмними засобами керування промисловими системами плавного пуску асинхронних двигунів

Програмне забезпечення PowerSuite, головне вікно якої представлено на рис. 3.1, призначене для автоматизації процесу налаштувань та роботи з системою плавного пуску Altistart 48, опис якої було наведено в Розділі 1.

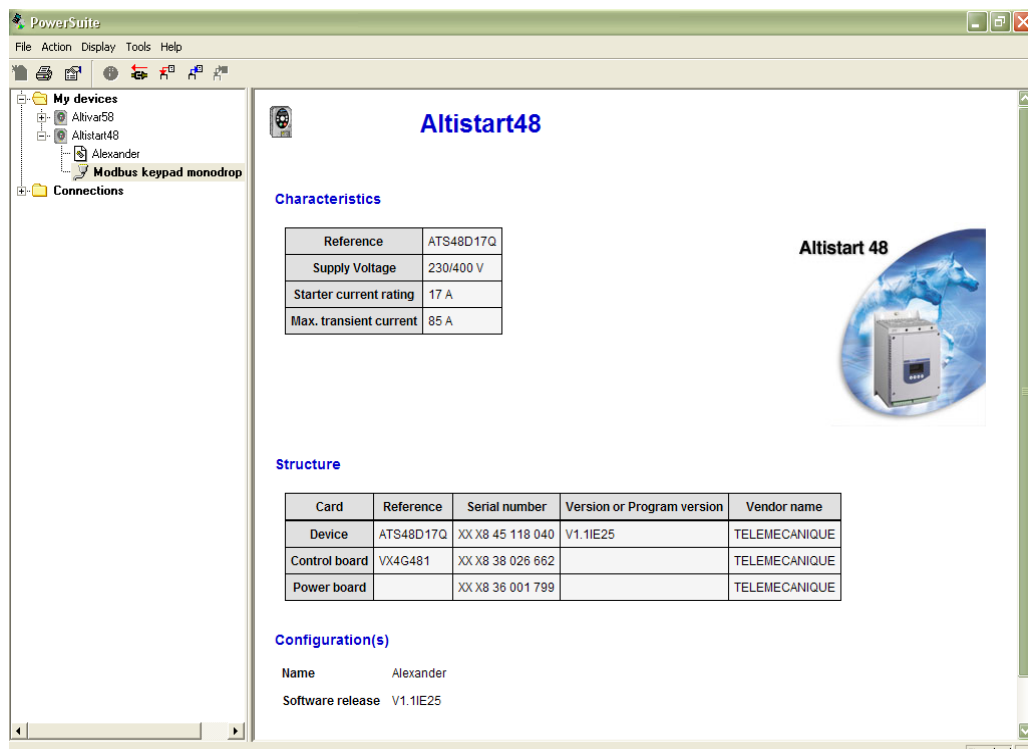


Рисунок 3.1 – Головне вікно програми Power Suite

Робота з пристроєм Altistart 48 через програмне забезпечення Power Suite включає наступні кроки:

1. Вибір обладнання

У лівій частині головного вікна відображається перелік підключених пристроїв. Для роботи необхідно обрати саме Altistart 48.

Для встановлення зв'язку потрібно вибрати опцію Modbus keypad monodrop.

2. Налаштування параметрів з'єднання

Перед підключенням слід задати параметри зв'язку. Для цього потрібно виділити пункт Serial monodrop і вибрати Modify.

Параметри порту налаштовуються згідно з рис. 3.2.

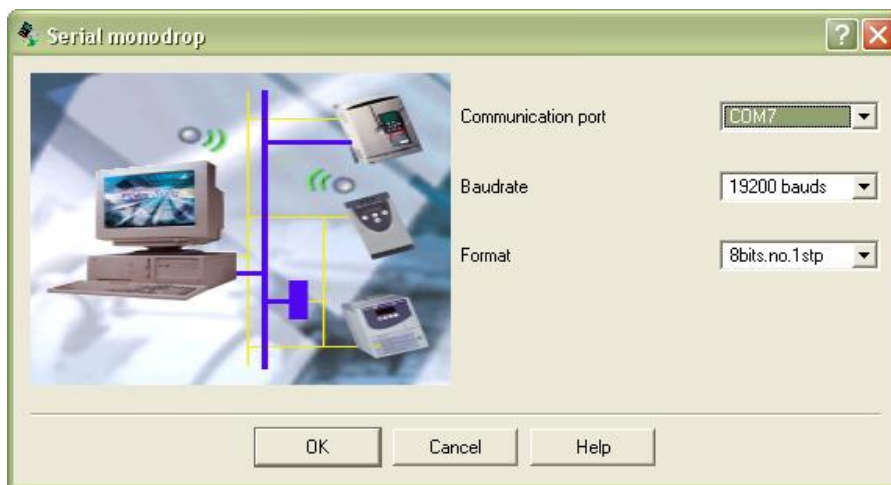


Рисунок 3.2 – Налаштування параметрів з'єднання

3. Встановлення зв'язку з пристроєм

Після натискання кнопки Connect на панелі інструментів відкриється вікно-попередження (рис. 3.3) про можливі ризики дистанційної роботи з перетворювачем. Для продовження роботи натиснути комбінацію клавіш Alt+F.

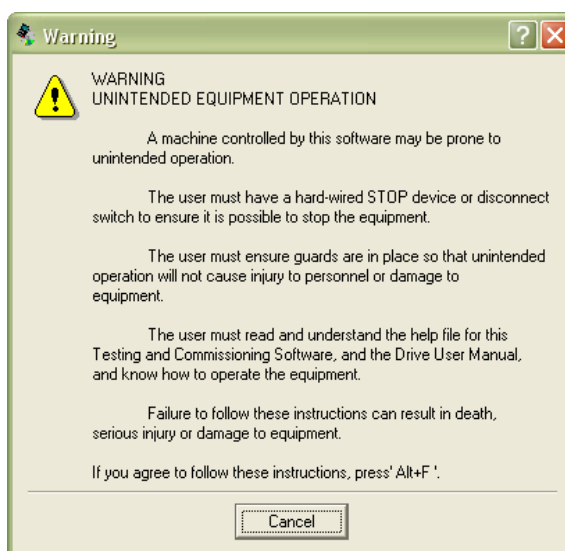


Рисунок 3.3 – Діалогове вікно-попередження

4. Активація пристрою та тестовий запуск

У вікні (рис. 3.4) необхідно активувати перетворювач, змінивши положення перемикача Command з «INACTIVE» на «ACTIVE». Після підтвердження (Alt+F) можна виконати пробний пуск двигуна натисканням кнопки Test Run.

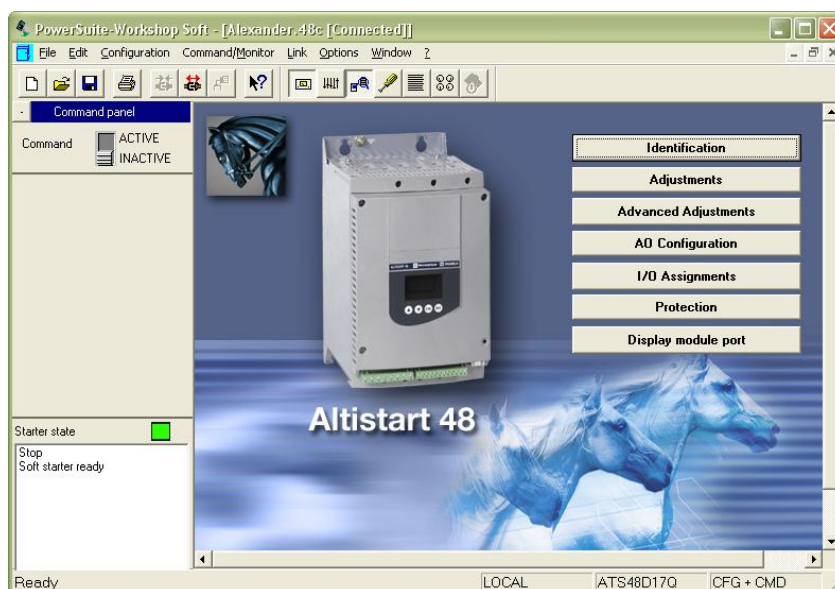


Рисунок 3.4 – Головне вікно програми

Після виходу двигуна на максимальну напругу загориться сигнальна лампа (12) на панелі стенду (рис. 3.5). Для зупинки використовується кнопка Test Stop.



Рисунок 3.5 – Лабораторний стенд для дослідження процесів плавного пуску асинхронних двигунів

Позначення елементів стенду:

					171.6321м.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- 1 – автоматичний вимикач живлення стенду;
- 2 – кнопка зупинки двигуна;
- 3 – індикатор справної роботи двигуна;
- 4 – ключ запуску двигуна;
- 5 – тумблер увімкнення функції BOOST;
- 6 – аварійний вимикач для екстреної зупинки двигуна;
- 7 – індикатор готовності Altistart 48 до роботи;
- 8 – вимикач для пуску другого асинхронного двигуна безпосередньо від мережі;
- 9 – індикатор аварійного стану Altistart 48;
- 10 – кнопка «ПУСК» для керування Altistart 48;
- 11 – кнопка «СТОП» для керування Altistart 48;
- 12 – індикатор роботи від мережі (засвічується після завершення плавного пуску двигуна);
- 13 – цифровий амперметр;
- 14 – стрілковий амперметр;
- 15 – система Altistart 48.

Особливості роботи:

На амперметрах (13 і 14) фіксується величина пускового струму. Керування запуском та зупинкою здійснюється кнопками (10 – «ПУСК», 11 – «СТОП»). Поточний стан системи Altistart 48 визначається за індикаторами:

(12) – сигналізує завершення плавного пуску та перехід на живлення від мережі;

(9) – відображає аварійний стан пристрою.

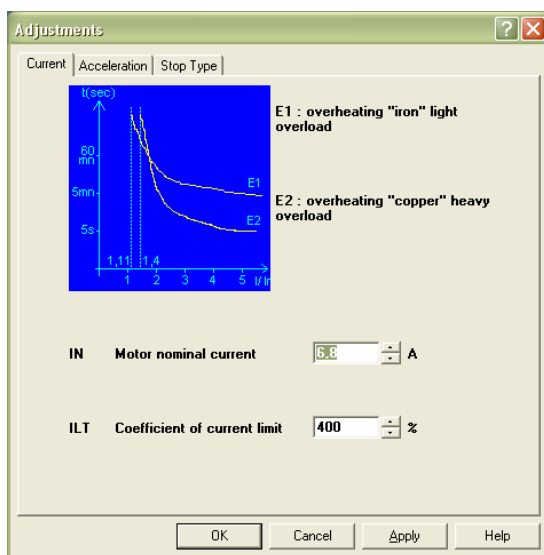
5. Ідентифікація параметрів двигуна та налаштування параметрів пуску та гальмування

Після натискання на кнопку Identification відкриється діалогове вікно з основними параметрами двигуна. У меню Adjustments задаються:

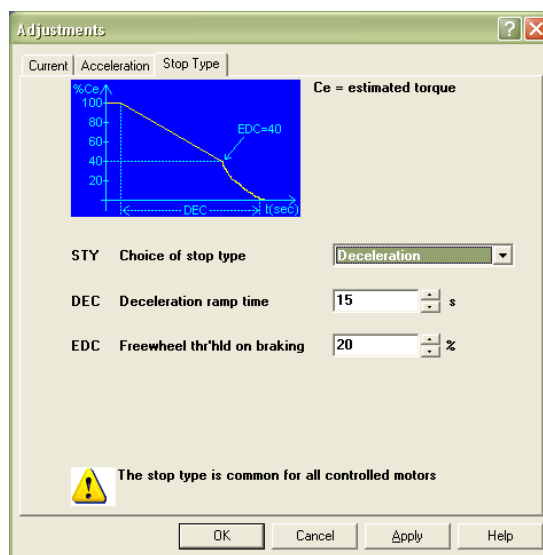
– номінальний струм двигуна;

					171.6321м.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

- обмеження пускового струму (% від номінального);
- тип зупинки:
- Freewheel – вільний пробіг,
- Deceleration – гальмування,
- Stop with braking – зупинка з примусовим гальмуванням (рис. 3.6).



(а)



(б)

Рисунок 3.6 – Діалогові вікна налаштування параметрів пуску та зупинки асинхронного двигуна

Після встановлення параметрів необхідно дослідити різні режими гальмування, порівняти їх особливості й зробити висновки, у яких випадках доцільно застосовувати кожен з них.

7. Налаштування входів та виходів

Для цього використовується меню «I/O Assignments» (рис. 3.7).

У вкладці Logic Inputs задаються функції для входів LI1–LI4. Входи LI1 та LI2 можуть виконувати лише функції пуску та зупинки двигуна. Для вибраного входу у вікні Possible assignment можна призначити доступні функції. Аналогові виходи налаштовуються у вікні (рис. 3.8).

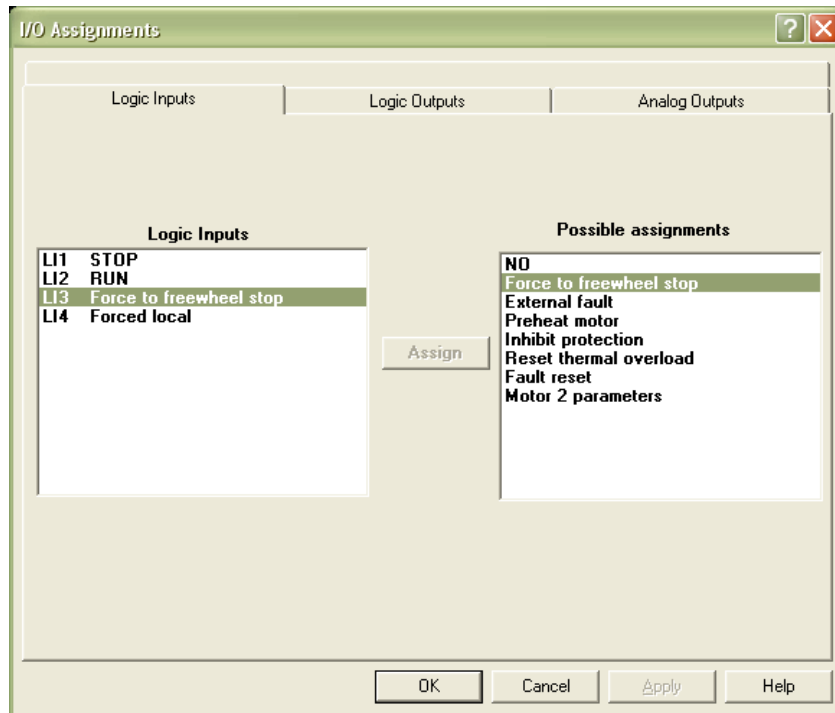


Рисунок 3.7 – Діалогове вікно для налаштування функцій дискретних входів

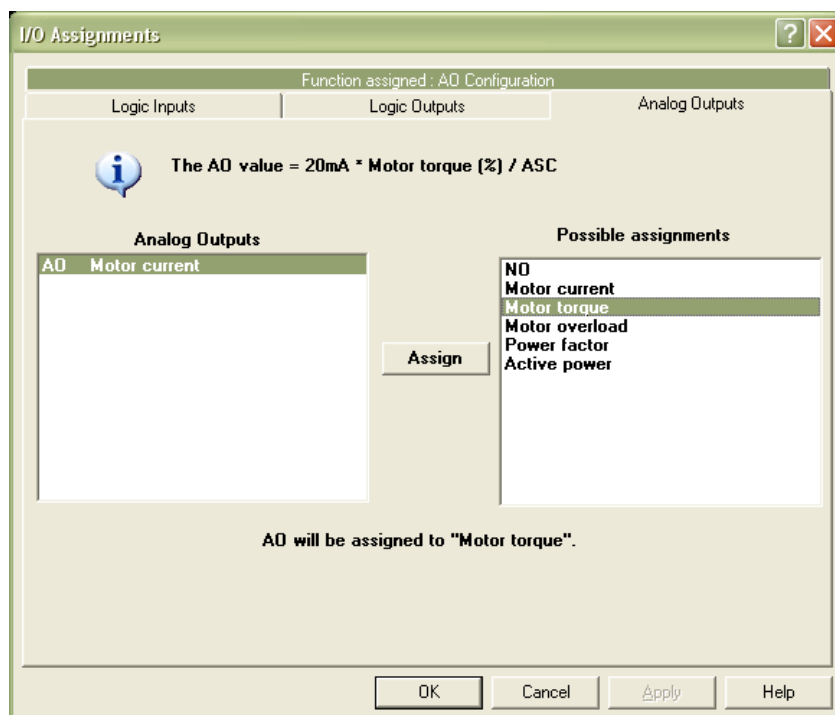


Рисунок 3.8 – Вікно призначення функції аналоговому виходу

8. Використання панелі приладів

Кнопка Display meters відкриває вікно (рис. 3.9), де відображаються контрольовані параметри роботи двигуна.

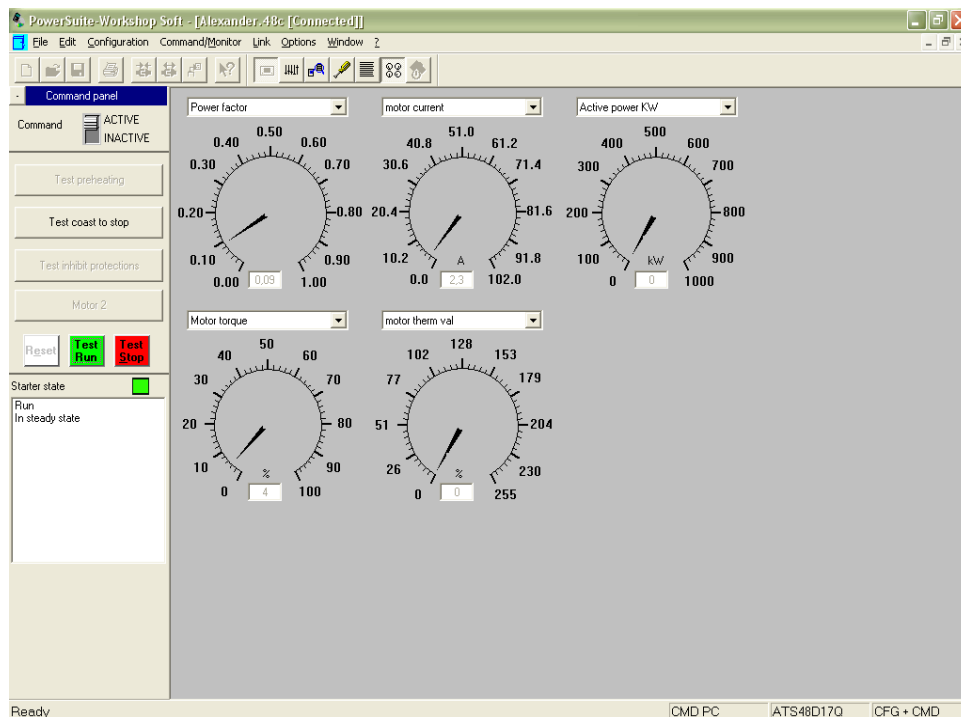


Рисунок 3.9 – Панель приладів для відображення контрольованих параметрів

9. Повний доступ до параметрів пристрою

Кнопка Display list of parameters відкриває вікно (рис. 3.10), яке дозволяє змінювати всі налаштування Altistart 48. Детальний опис кожного параметра міститься в технічній документації.

PowerSuite-Workshop Soft - [Alexander.48c [Connected]]					
All parameters					
Code	Label	Alexander.48c Value	Default value	Logic address	
Identification					
	Reference ATS48	ATS48D17Q			
	Supply voltage	230/400 V			
	Starter rated current	17.0 A			
	Rated continuous current	85.0 A			
Adjustments					
IN	Motor nominal current	14.8 A	14.8 A	4026	
ILT	Coefficient of current limit	400 %	400 %	4039	
ACC	Acceleration ramp time	15 s	15 s	4043	
TQ0	Initial torque on starting	20 %	20 %	4037	
STY	Choice of stop type	Freewheel stop	Freewheel stop	4029	
DEC	Deceleration ramp time	15 s	15 s	4044	
EDC	Freewheel th'ld on braking	20 %	20 %	4038	
BRC	Int level of braking torque	50 %	50 %	4041	
EBA	Pseudo DC braking level	20 %	20 %	4042	
Advanced Adjustments					
IN2	Motor 2 nominal current	14.8 A	14.8 A	4300	
IL2	Motor 2 current limit	400 %	400 %	4304	
AC2	Motor 2 Acceleration time	15 s	15 s	4305	
TQ2	Motor 2 starting torque	20 %	20 %	4302	
DE2	Motor 2 deceleration time	15 s	15 s	4306	
ED2	Freewheel level dec2	20 %	20 %	4303	
IPR	Motor preheat level	0 %	0 %	4045	
TPR	Time before preheat	5 min	5 min	4046	
CLP	Torque control	Activated	Activated	4107	
LSC	Stator loss compensation	50 %	50 %	4027	
BST	Voltage boost level	Disabled	Disabled	4028	
TLI	Torque limit	Disabled	Disabled	4036	
TIG	Braking loop gain	40 %	40 %	4047	
TL2	Motor 2 Torque limit	Disabled	Disabled	4301	
TI2	Motor 2 decel loop gain	40 %	40 %	4307	

Рисунок 3.10. Вікно налаштування параметрів Altistart 48

3.2. Аналіз спектрального складу напруг статора асинхронного двигуна при його запуску

При з'єднанні обмоток статора в схему зірка без нейтрального проводу робота всіх фаз взаємопов'язана, і для протікання струмів у навантаженні необхідне одночасне відкривання тиристорів у двох або трьох фазах. Аналіз показує, що можна виділити три характерні режими роботи, які визначаються кутом відкриття тиристорів. У першому режимі, коли кут відкриття малий, кожна пара тиристорів незалежно комутує фазну напругу, в результаті по навантаженню тече безперервний синусоїдальний струм, а до нього прикладена фазна напруга. Другий режим відповідає умовам, коли кут відкриття перевищує певне граничне значення. У цьому випадку напівперіод фазної напруги на навантаженні складається з шести ділянок: на трьох ділянках одночасно відкриті тиристори у всіх трьох фазах, і до навантаження прикладена фазна напруга мережі; на двох ділянках відкриті тиристори у двох фазах, і до навантаження прикладена половина лінійної напруги; на одній ділянці всі тиристори закриті і напруга дорівнює нулю. Третій режим виникає при ще більших кутах відкриття, коли відсутні ділянки одночасної роботи тиристорів у всіх трьох фазах. У цьому випадку у фазній напрузі на навантаженні є лише дві ділянки, де напруга дорівнює половині лінійної (або), і дві ділянки, коли вона дорівнює нулю.

Характерна форма кривої напруги для з'єднання обмоток статора в зірку без нульового проводу наведена на рисунку 3.11.

					171.6321м.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

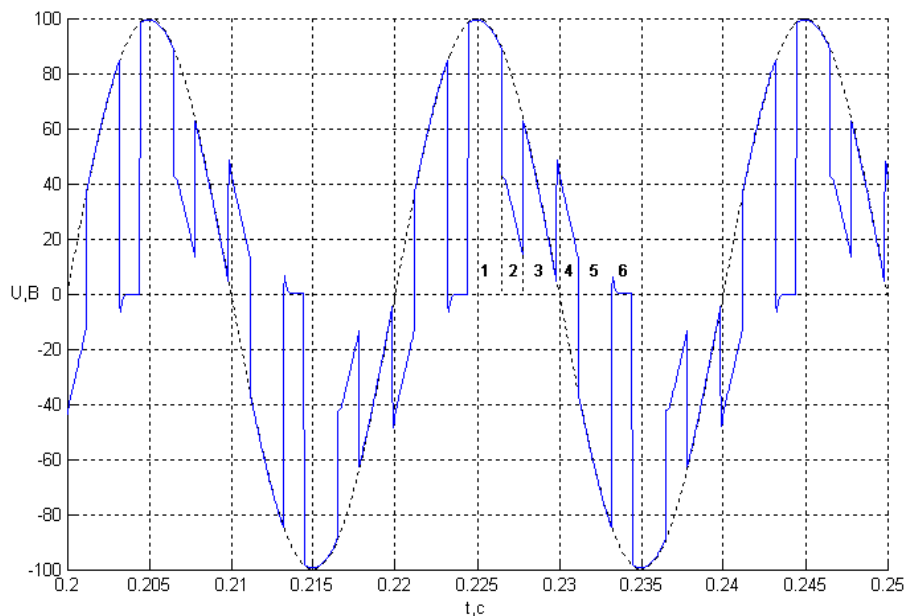


Рисунок 3.11 – Осцилограма напруги на навантаженні при з'єднанні обмоток статора асинхронного двигуна в зірку без нульового проводу при $\varphi = 60^\circ$ та $\alpha = 80^\circ$

Максимальний кут відкриття тиристорів $\alpha_{\text{макс}} = 150^\circ$, тобто третій режим реалізується при зміні α в діапазоні $\alpha_{\text{зр}} < \alpha < 150^\circ$. Дійсно, при $\alpha > \alpha_{\text{зр}}$ тиристори у фазах комутують лінійну напругу, зокрема у фазі А процес протікання струму починається при включенні напруги u_{ab} . При синхронізації керуючих імпульсів відносно фазової напруги u_a кут відкриття тиристорів по лінійній напрузі $\alpha_d = \alpha + 30^\circ$, тому що u_{ab} випереджає u_a на 30° . Тому при $\alpha = 150^\circ$, $\alpha_d = 180^\circ$, тобто тиристори повністю закриті протягом усього періоду напруги живлення, а напруга на навантаженні дорівнює нулю. Таким чином, процес регулювання напруги від номінального до нульового значення відбувається для даної схеми з'єднання обмоток статора при зміні α в межах $\varphi < \alpha < 150^\circ$. На рис. 3.12 та рис. 3.13 представлені осцилограми напруги на двигуні під час розгону. Масштаб по вісі у складає 1:20.

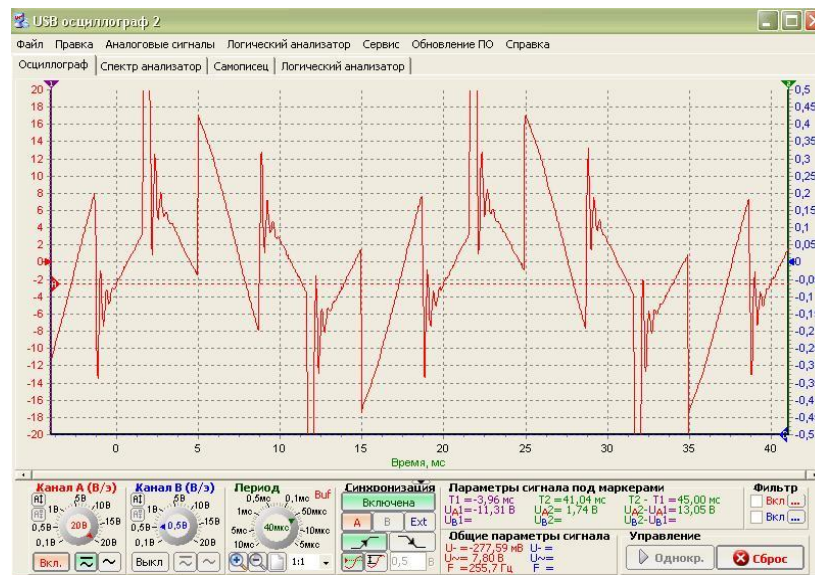


Рисунок 3.12 – Осцилограма статорної напруги під час розгону двигуна



Рисунок 3.13 – Осцилограма статорної напруги при завершенні розгону двигуна

Якщо перевести осцилограф в режим запису та зняти осцилограму напруги на двигуні від початку запуску до моменту досягнення напругою максимального значення, то можна визначити, з якого початкового значення кута α_n відбувається запуск. Також було повторено цей дослід з увімкненою функцією бустера.

Використовуючи елементи керування, що розташовані в нижній частині діалогового вікна програми керування USB-осцилографом, треба встановити зручні для спостереження значення по вісям. На рис. 3.14 показаний спектральний склад напруги при пуску двигуна.

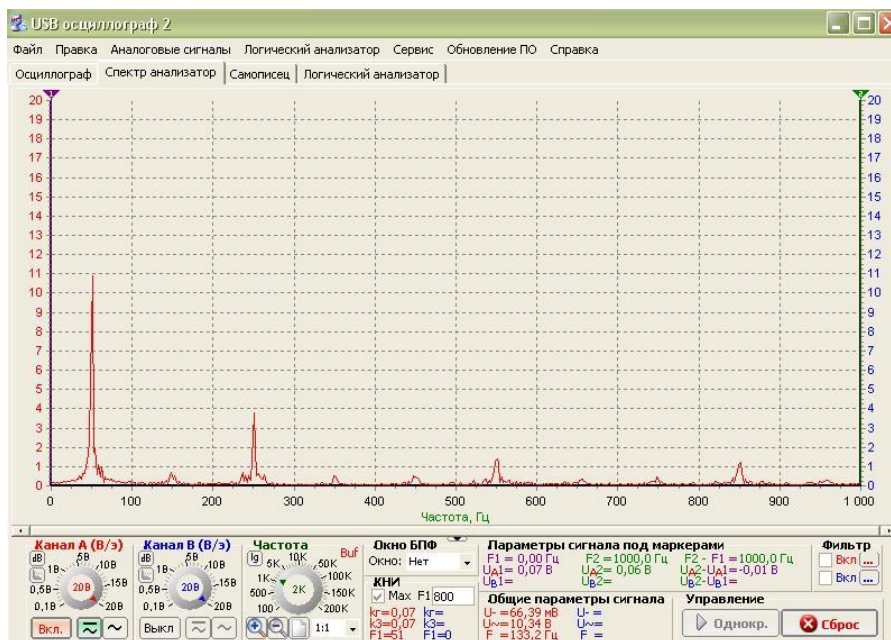


Рисунок 3.14 – Спектральний склад напруги на двигуні під час розгону

Через симетрію кривих струму і напруги щодо вісі абсцис постійні складові й парні гармоніки в розкладанні відсутні. З'єднання обмоток статора в зірку без нульового проводу виключає в кривій струму гармоніки, кратні трьом.

3.3. Розробка блок-схем алгоритмів програмного забезпечення для мікроконтролера

При роботі тиристорного регулятора напруги важливо враховувати, що повний діапазон зміни кута відкриття тиристорів досягається лише за умови правильної синхронізації схеми керування. Якщо синхронізація порушена, можуть виникнути два небажані випадки: або тиристори взагалі не відкриваються і керування відсутнє, або ж регулятор не забезпечує повний діапазон регулювання напруги на навантаженні.

На рис. 3.15 та рис. 3.16 представлені блок-схеми обробки зовнішніх переривань, в яких відбувається запуск таймера-лічильника для контролю правильності підключення фаз та синхронізації з напругою мережі.

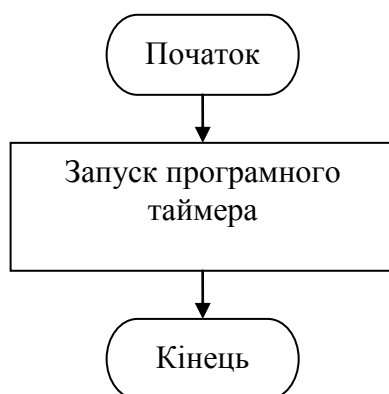


Рисунок 3.15 – Блок-схема обробки першого зовнішнього переривання

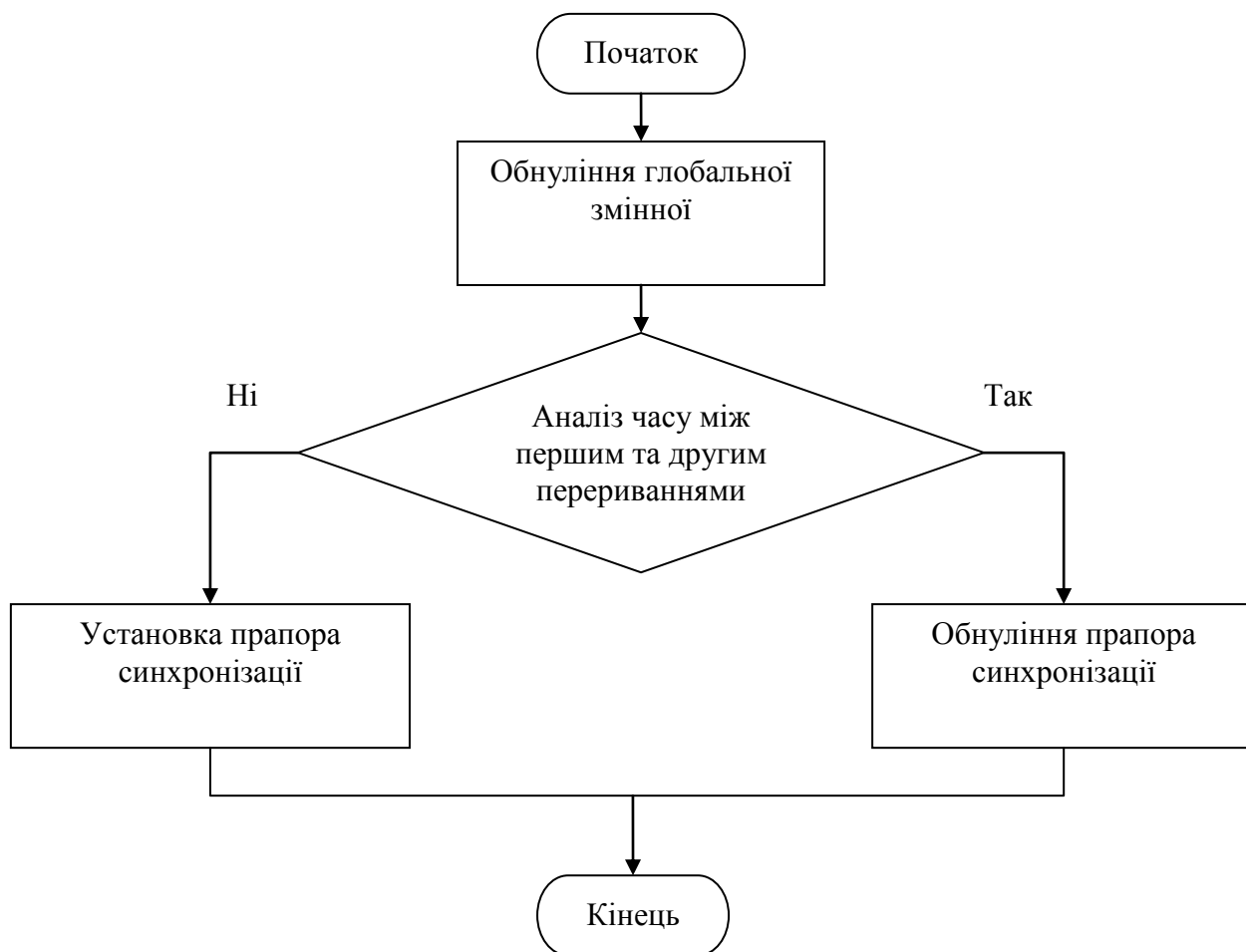


Рисунок 3.16 – Блок-схема алгоритму функції-оброблювача другого зовнішнього переривання

Блок-схема алгоритму функції синхронізації з напругою мережі представлена на рис. 3.17.

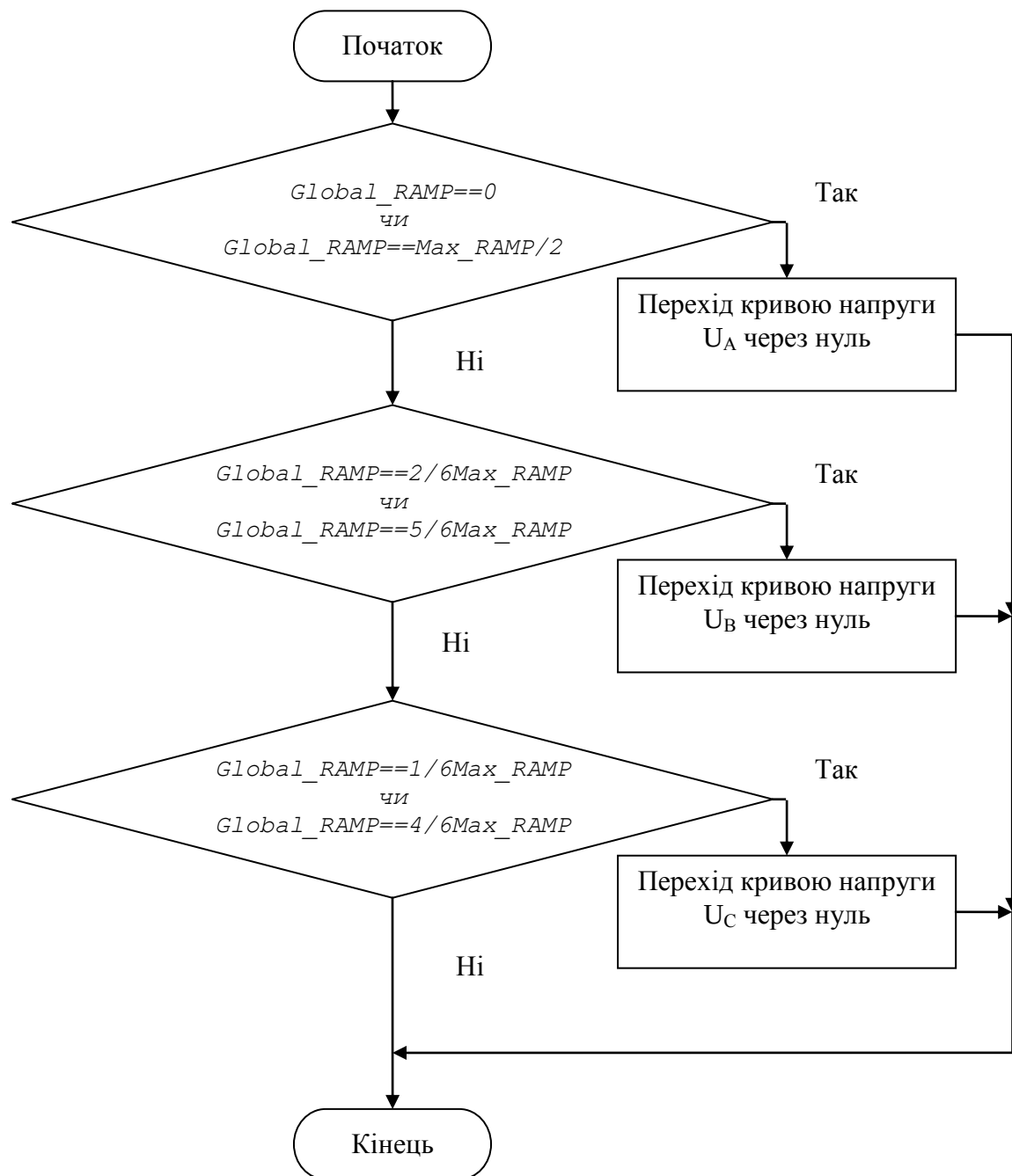


Рисунок 3.17 – Блок-схема функції синхронізації системи з напругою мережі

Для стабільної роботи системи керування всі програмні лічильники та виконання процедури синхронізації потрібно прив'язати до обробника переривання від апаратного таймера або лічильника. Наприклад, при частоті

таймера 20 кГц забезпечується точність цифрової імітації фазового контролю на рівні 0,9 електричних градусів.

Канал системи керування є синхронним пристроєм, робота якого визначається тактовим генератором з частотою 20 кГц. Основу схеми становлять лічильник з насиченням та асинхронним обнулінням Counter і цифровий компаратор Comp2.

Процес формування пачки високочастотних керуючих імпульсів полягає в наступному. У початковий момент на шині встановлюється значення необхідного кута відкриття тиристора, а системна функція SynchronizeDevice() обнуляє лічильник Counter та тригер Flip_Flop. Значення на шині визначає загальну ширину серії керуючих імпульсів як MAX_ALPHA мінус Global_Alpha.

При генерації кожного тактового імпульсу лічильник Counter збільшує значення RAMP на 1 до верхньої межі насичення. Якщо Global_Alpha більше RAMP, на виході компаратора з'являється логічна одиниця, яка встановлює тригер в одиничний стан, дозволяючи формування пачки високочастотних керуючих імпульсів. Змінна Enable виконує роль релейного входу, який дозволяє або забороняє роботу тиристора.

Логічна змінна pin описується рівнянням $pin = (MAX_ALPHA > RAMP) \&\& Flip_Flop \&\& Enable \&\& Divider_f_4$. Змінна Divider_f_4 змінює своє значення через кожні чотири періоди тактового генератора і використовується для формування високочастотного заповнення керуючого імпульсу.

Роботу тактового генератора можна інтерпретувати як виконання оброблювача переривання апаратного таймера/лічильника. Блок-схема цього оброблювача наведена на рисунку 3.18.

					171.6321м.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

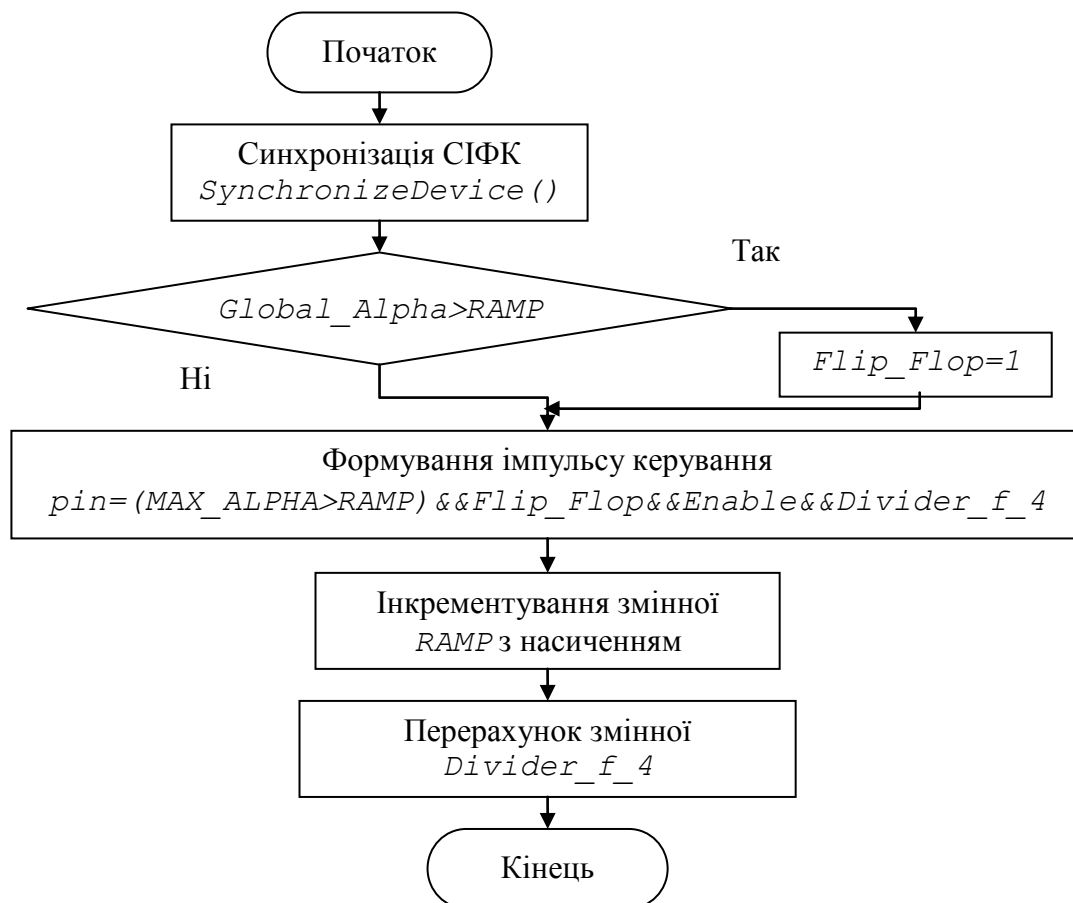


Рисунок 3.18 – Блок-схема функції-обробника переривання таймера/лічильника

3.4. Дослідження сплесків потужності при пуску потужного суднового асинхронного двигуна

Діалогове вікно програми, за допомогою якої можна отримати значення потужності та спостерігати за осцилограмами струму та напруги, що споживається двигуном під час запуску, показано на рис. 3.19.

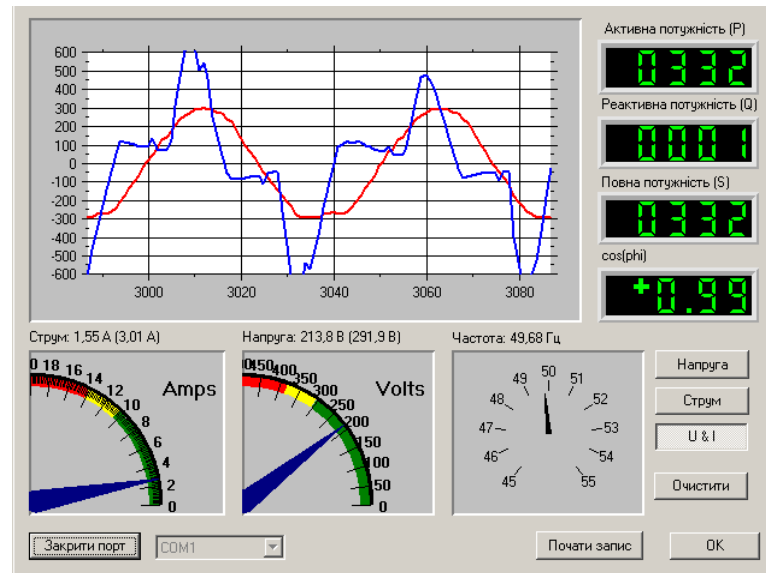


Рис. 3.19. Осцилограми струму та напруги під час розгону двигуна

На діалоговому вікні якому розташовані основні елементи керування та відображаються отримані данні (рис. 3.20).

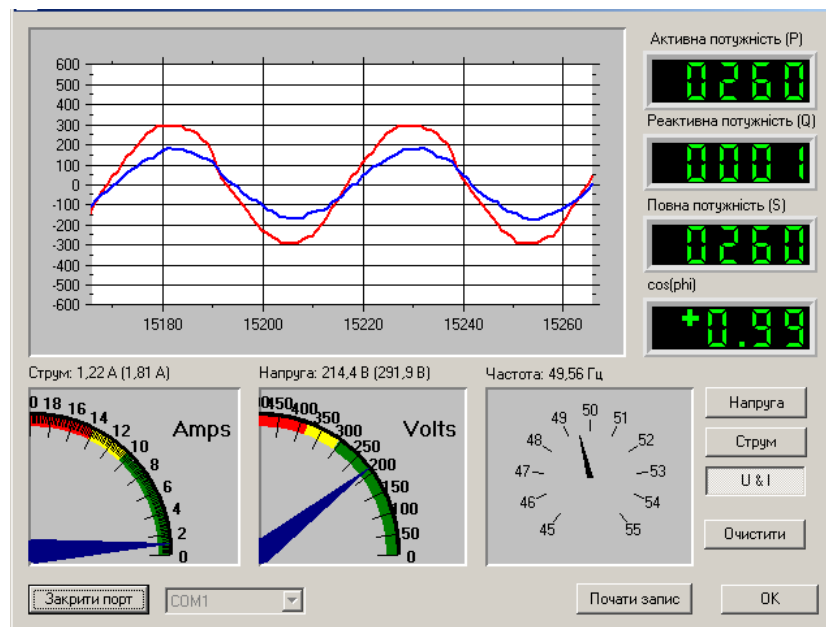


Рис. 3.20. Осцилограми струму та напруги в нормальному режимі роботи

Для запису даних у файл потрібно натиснути на кнопку «Почати запис». Дані зберігаються у файлі формату CSV. У якості розділювачів використовується символ “,” (крапка з комою). Побудувати графіки зміни параметрів можна в табличному редакторі MS Excel. На рис. 3.21

представлена експериментально отримана залежність потужності, що споживається двигуном під час розгону (тривалість розгону 2 секунди).

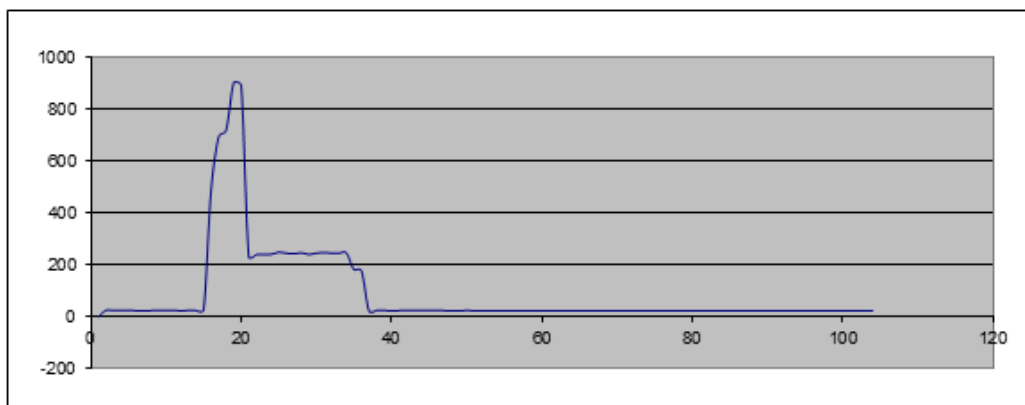


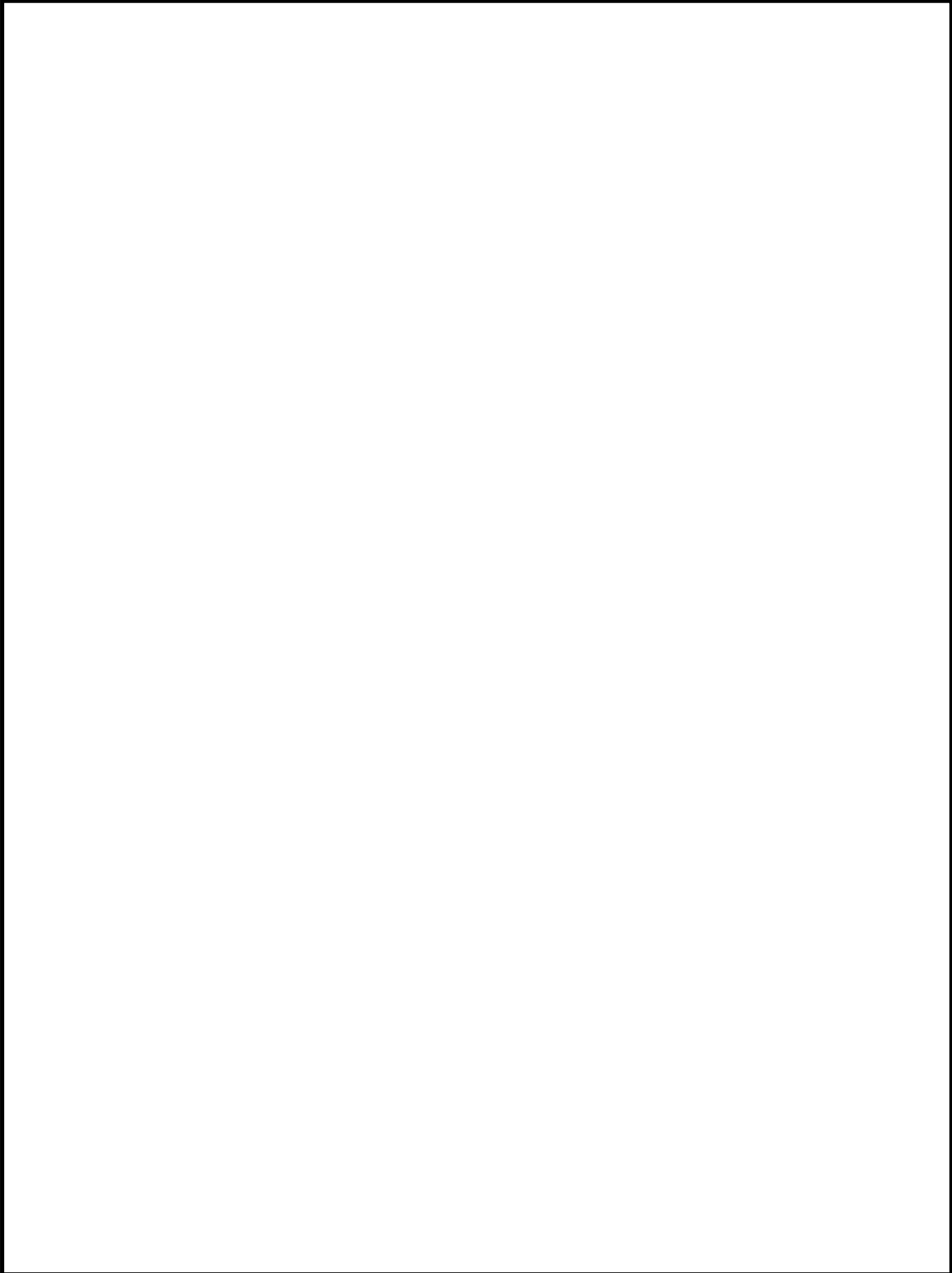
Рис. 3.21. Графік активної потужності при часі розгону 1 секунда

Висновки по розділу

У ході роботи над цим розділом магістерської кваліфікаційної роботи були розроблені алгоритми для програми керуючого мікроконтролера та автоматизованого робочого місця оператора. Для забезпечення взаємодії між системою керування та комп'ютером розроблено протокол обміну даними на основі Modbus ASCII – промислового стандарту, широко застосовуваного в автоматизації.

Основною складністю при розробці програмного забезпечення для мікроконтролера є його відлагодження, оскільки за допомогою стандартних приладів неможливо відстежити стан внутрішніх регістрів. При виникненні непередбачуваної поведінки програми важко визначити, чи причина полягає в помилці коду, чи в апаратній частині, що змінила характер входних сигналів.

З'єднання системи з комп'ютером значно спростило процес налагодження: з'явилася можливість моніторингу внутрішніх регістрів мікроконтролера та аналізу поведінки системи в реальному часі, що суттєво підвищило ефективність роботи з програмним забезпеченням.



					171.6321м.КР.ПЗ.Р4			
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата				
Розробник		Борщевський В.В.			Охорона праці	Літ.	Арк.	Аркуші
Консультант		Губальцев А. М.					60	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Ушкаренко О.О.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Вступ

Одним із пріоритетних завдань держави є забезпечення охорони життя та здоров'я громадян у процесі їхньої трудової діяльності, що передбачає створення безпечних та нешкідливих умов праці. За даними Всесвітньої організації охорони праці, смертність внаслідок нещасних випадків на виробництві сьогодні займає третє місце після серцево-судинних та онкологічних захворювань, при цьому переважно потерпають люди працездатного віку до 40 років. Аналіз української статистики свідчить, що основними причинами смертності чоловіків працездатного віку є нещасні випадки, отруєння та травми, що становлять 30–35 % усіх випадків смертності у цій категорії.

Охорона праці виконує важливу соціальну функцію, оскільки жодні трудові досягнення не можуть компенсувати людині втрату здоров'я чи життя. Водночас вона має й значну економічну вагу: забезпечення безпечних умов праці сприяє підвищенню продуктивності, зменшенню витрат на лікування та компенсаційні виплати за шкідливі та важкі умови праці. За оцінками фахівців Міжнародної організації праці (МОП), економічні втрати, пов'язані з нещасними випадками на виробництві, складають приблизно 1 % світового валового національного продукту. За статистикою МОП, щорічно в світі реєструється близько 125 млн нещасних випадків на виробництві, з яких близько 220 тис. закінчуються смертю. При цьому рівень виробничого травматизму та професійної захворюваності значно вищий у країнах, що розвиваються, порівняно з промислово розвиненими державами.

Згідно з оцінками іноземних експертів, які працювали в Україні в рамках програми МОП, високий рівень смертності на виробництві зумовлений п'ятьма основними факторами: недостатньою підготовкою робітників та керівників з питань охорони праці; відсутністю належного контролю за станом безпеки на робочих місцях та дотриманням нормативів; недостатнім

					171.6321м.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

забезпеченням працівників засобами індивідуального захисту; повільним впровадженням колективних засобів безпеки; а також експлуатацією зношеного та технічно несправного обладнання.

Правову основу охорони праці в Україні становлять Конституція України, Закони України “Про охорону праці”, “Про охорону здоров’я”, “Про пожежну безпеку”, “Про використання ядерної енергії та радіаційний захист”, “Про забезпечення санітарного та епідеміологічного благополуччя населення”, а також Кодекс законів про працю України. Основним нормативно-правовим актом у цій сфері є Закон України “Про охорону праці”, дія якого поширюється на всі підприємства, установи та організації незалежно від форми власності та виду діяльності, а також на всіх працівників і залучених до праці осіб.

Охорона праці визначається як комплекс правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на забезпечення безпеки, збереження здоров’я та підтримання працездатності людини в процесі виконання трудових функцій.

4.2. Мікроклімат на робочому місці

Кліматичні умови суттєво впливають на надійну роботу електронної техніки та ефективність праці персоналу. Для забезпечення комфортних та безпечних умов на робочих місцях встановлено нормативи виробничого мікроклімату. Основні параметри мікроклімату на ділянці збору електронного обладнання наведені в таблиці 4.1.

					171.6321м.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

Таблиця 4.1 – Основні параметри мікроклімату

Період року	Параметри повітряного середовища								
	Фактичні			Оптимальні			Припустимі		
	t, °C	Відносна вологість, %	Швидкість. Повітря, м/с	t, °C	Відносна вологість, %	Швидкість. Повітря, м/с	t, °C	Відносна вологість, %	Швидкість. Повітря, м/с
Холодний	18	66	0,2	20-22	40-60	0,2	18-22	70	0,3
Теплий	24	60	0,3	20-25	40-60	0,4	28	60-65	0,5

При виготовленні системи плавного пуску суднового асинхронного двигуна виділяють такі основні технологічні операції: нанесення малюнка друкованих плат, травлення плат у розчині хлорного заліза (FeCl_3), свердління отворів, монтаж електронних компонентів на друкованих платах та покриття плат вологостійким поліуретановим лаком.

У процесі виконання цих операцій в атмосферу виділяється ряд речовин, багато з яких є потенційно небезпечними для здоров'я людини. Найбільш шкідливі з них наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Шкідливі речовини

Речовина	Забруднюючі компоненти	Характер дії, області поразки	Клас небезпеки	Гранично допустима концентрація в повітрі		Викид в робочій зоні, мг/м ³
				Разова мг/м ³	Середньодобова, мг/м ³	
Припої олов'яно-свинцеві ПОС-40 ПОС-60	Pb(свинець)	Центральна нервова система, полові органи	I	-	0,0003	0,0001
	Sn(олово)					
	Ni(нікель)	Канцероген	I	0,0002	0,0002	-
	каніфоль	Дихальні шляхи	IV	0,3	0,3	0,2
Флюси	Етиловий спирт	Центральна нервова система	IV	0,1	0,1	-
Лаки	Полімери	Центральна нервова система	IV	0,35	0,35	0,05

Як свідчить таблиця 4.2, концентрації шкідливих речовин в атмосфері лабораторії, де виконується розробка системи, не перевищують встановлені гранично допустимі значення. Варто зазначити, що виділення шкідливих речовин відбувається лише під час виробництва системи плавного пуску суднового асинхронного двигуна, і не спостерігається під час її налагодження та експлуатації.

Хоча середньодобові викиди свинцю та олова не перевищують нормативні межі, слід враховувати їхню здатність, як і здатність інших важких металів, накопичуватися в організмі людини, що може призвести до серйозних ушкоджень здоров'я при тривалому впливі.

4.3. Розрахунок освітлення

Розрахунок освітлення виконується для лабораторії кафедри ПЕЕТ, де передбачено створення системи плавного пуску потужного суднового асинхронного двигуна. До системи освітлення в лабораторії висуваються такі основні вимоги: забезпечення відповідного рівня освітленості робочих місць залежно від характеру зорової роботи, рівномірний розподіл яскравості на робочих поверхнях і в навколишньому просторі, відсутність різких тіней та засліплюючих блисків, стабільність освітленості протягом робочого часу, оптимальна спрямованість світлового потоку від приладів, а також довговічність, економічність, безпечність з електро- та пожежної точки зору, естетичність, зручність і простота експлуатації.

Освітлення лабораторії передбачає використання природного, штучного та комбінованого освітлення. Природне освітлення проєктується відповідно до діючих будівельних норм і правил, з урахуванням орієнтації світлопроємів переважно на північ і північний захід. Коефіцієнт природної освітленості (КПО) у зоні зі стійким сніговим покривом має бути не менше 1,2%, на інших ділянках території – не менше 1,5%. Ці нормативи застосовуються для будівель, розташованих у III світловому кліматичному поясі; для інших

					171.6321м.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

поясів КПО визначається за загальноприйнятою методикою відповідно до БНіП «Природне і штучне освітлення».

Штучне освітлення лабораторії поділяється на загальне та місцеве. Для загального освітлення використовуються люмінесцентні лампи, що забезпечують рівномірне освітлення всього приміщення.

Розрахунок штучного освітлення проводиться для приміщення лабораторії розмірами: довжина $A = 7$ м, ширина $B = 6$ м, висота $H = 2,7$ м. Висота робочої поверхні $h_p = 1$ м. Стеля пофарбована в білий колір, стіни обклеєні світлими шпалерами, що створює світлу розрахункову поверхню. Напруга мережі живлення приймається $U_c = 220$ В. Розрахунки забезпечують рівень освітленості, достатній для проведення всіх технологічних операцій з розробки та налагодження системи плавного пуску асинхронного двигуна.

Прийmemo коефіцієнт мінімальної освітленості $E_{\min} = 150$ лкс. Вибираємо світильник типу УСП з двома люмінесцентними лампами ЛБ40, вмонтований у стелю.

Відстань від стелі до робочої поверхні :

$$H_0 = H - h_p = 2,7 - 1 = 1,7 \text{ м.}$$

Висота підвісу світильника над освітлюваною поверхнею h і відстань від стелі до робочої поверхні H_0 рівні, тобто $h = H_0 = 1,7$ м

Для досягнення найбільшої освітленості при розміщенні світильників приймаємо значення: $L/h = 1,5$

Тоді відстань між центрами світильників

$$L = 1,5 \cdot h = 1,5 \cdot 1,7 = 2,55 \text{ м}$$

Визначимо індекс приміщення

$$i = \frac{A \cdot B}{h(A + B)} = \frac{7 \cdot 6}{1,7 \cdot 13} = 1,9$$

При $i = 1,9$; $\rho_n = 70$ %; $\rho_z = 50$ %; $\rho_p = 30$ % для світильника типу УСП коефіцієнт використання світлового потоку $\eta = 0,47$.

					171.6321м.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Світловий потік лампи ЛБ40 дорівнює $\Phi_{\text{л}} = 3040$ лм. K_z – коефіцієнт запасу, що для приміщення, лабораторії дорівнює 1,5 для люмінесцентних ламп. Коефіцієнт нерівномірності для люмінесцентних ламп Z приймаємо 1,1.

Визначимо кількість світильників для забезпечення необхідної освітленості:

$$N = \frac{E_{\min} \cdot S \cdot K_z \cdot Z}{n \cdot \Phi_{\text{л}} \cdot \eta} = \frac{150 \cdot 42 \cdot 1.5 \cdot 1.1}{2 \cdot 3040 \cdot 0.47} = 3.64$$

де $E_{\min}$ – рівень мінімальної освітленості за нормами, n – кількість ламп у світильнику, S – площа лабораторії.

Приймаємо 4 світильники (2 ряди по 2 світильники).

Загальна потужність освітлювальної установки

$$P = P_{\text{л}} \cdot N \cdot n = 40 \cdot 4 \cdot 2 = 320 \text{ Вт}$$

Комбіноване освітлення. При ньому світильники встановлюються у верхній частині приміщення паралельно стіні з віконними прорізами, що дозволяє відключати їх послідовно в залежності від зміни природного освітлення.

Виконання складальних робіт вимагає додаткового місцевого освітлення, що концентрує світловий потік безпосередньо на знаряддя і предмети праці.

4.4. Заходи щодо техніки безпеки

Мікроклімат на робочому місці. Для забезпечення комфортних і безпечних умов праці відповідно до встановлених виробничих норм необхідно регулювати температуру повітря в лабораторії залежно від сезону за допомогою кондиціонерів, вентиляторів, центральної системи опалення або нагрівальних приладів. Це дозволяє підтримувати оптимальні параметри мікроклімату для роботи з потужними судновими асинхронними двигунами та електронним обладнанням.

					171.6321м.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Забруднення повітря. У процесі виконання виробничих і монтажних робіт слід організувати ефективну вентиляцію приміщення та місцеві витяжки на робочих місцях. За необхідності використовуються спеціалізовані повітроочисні пристрої для видалення шкідливих речовин і пилу, що забезпечує безпечні умови праці.

Виробниче освітлення. Для усунення стробоскопічного ефекту існуючі світильники з газорозрядними лампами рекомендується розподілити на три групи та підключити до різних фаз трифазної мережі. Завдяки фазовому зсуву струмів у ланцюгах різних груп світильників їхні світлові коливання взаємокомпенсуються, що забезпечує практично постійний рівень освітленості в часі.

При експлуатації персональних електронно-обчислювальних машин (ПЕОМ) загальне освітлення слід організувати у вигляді суцільних або переривчастих ліній світильників, розташованих збоку від робочих місць і паралельно лінії зору оператора при рядному розташуванні ПЕОМ. У разі периметрального розміщення комп'ютерів лінії світильників слід розташовувати локально над робочим столом ближче до переднього краю, зверненого до користувача.

Необхідно обмежити прямі відблиски від джерел освітлення, при цьому яскравість світлих поверхонь у полі зору не повинна перевищувати 200 кд/м². Для зменшення відбитих відблисків на робочих поверхнях важливо правильно підбирати типи світильників та розташовувати робочі місця щодо джерел природного і штучного освітлення. Яскравість відбитих відблисків на екрані повинна бути не більше 40 кд/м², а при застосуванні систем відбитого освітлення яскравість стелі не повинна перевищувати 200 кд/м².

Електробезпека. Забезпечення електробезпечності досягається відповідною конструкцією електрообладнання, застосуванням технічних засобів захисту, а також організаційними і технічними заходами. Конструкція

					171.6321м.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

обладнання має відповідати умовам експлуатації, запобігати контакту персоналу зі струмоведучими частинами та захищати устаткування від проникнення сторонніх предметів і води. Основними технічними засобами захисту є захисне заземлення та занулення. Контур заземлення був виконаний під час будівництва лабораторії відповідно до будівельних норм, тому додатковий розрахунок опору не потрібен. Організаційні та технічні заходи включають навчання, інструктаж, допуск до роботи після медичного огляду, виконання спеціальних технічних заходів під час робіт з електрообладнанням і дотримання особливих правил при роботі з частинами, що перебувають під напругою.

					171.6321м.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської кваліфікаційної роботи проведено аналіз суднових систем плавного пуску асинхронних електроприводів, що дозволив визначити, що проектована система відноситься до класу аналого-цифрових комплексів. Використання сучасних мікроконтролерів забезпечило значне спрощення апаратної частини системи керування та перенесло більшість обробки даних на програмний рівень. Розроблена система є автоматизованою системою реального часу з можливістю комп'ютерного керування, що забезпечує підвищену точність і гнучкість управління процесом пуску.

Основними результатами роботи є розробка технічної пропозиції щодо створення апаратно-програмного комплексу суднової системи пуску потужних асинхронних двигунів та створення формалізованого алгоритму й керуючого програмного забезпечення, яке забезпечує контроль процесу пуску, налаштування параметрів пуску, збір, передачу та обробку даних під час роботи двигуна, а також відображення інформації як на панелі керування, так і на центральному пульті керування. Розроблена система дозволяє підвищити надійність та ефективність роботи суднових електроприводів великої потужності, забезпечуючи безпечне і точне управління процесом пуску в реальних умовах експлуатації.

Роботу було апробовано на XVIII Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології і автоматизація – 2025», опубліковано тези доповіді:

Борщевський В.В. Моделювання процесів зміни навантаження в суднових електроенергетичних системах / В.В. Борщевський, О.О. Ушкаренко // Матеріали XVIII міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології і автоматизація – 2025». Одеса, 30-31 жовтня 2025 р. Одеса, Видавництво ОНТУ, 2025 р.

					171.6321м.КР.ПЗ.Висновки	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Fitzgerald A.E., Kingsley C., Umans S.D. Electric Machinery. 7th ed. New York: McGraw-Hill, 2014. 722 p. ISBN 978-0-07-338046-9.
2. Boldea I., Nasar S. A. Electric Drives. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2016. 672 p. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781315368573/electric-drives-ion-boldea-syed-nasar>
3. Rashid M.H., Narendra Kumar, Ashish R. Kulkarni. Power Electronics: Devices, Circuits, and Applications. 4th ed. Harlow: Pearson, 2013. 1027 p. ISBN 978-0-273-76908-8.
4. Muhammad H. Rashid. Power Electronics Handbook: devices, circuits, and applications. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2011. 1409 p. ISBN 978-0-12-382036-5.
5. Качков В.В., Кутковецький В.Я., Пікало В.І. Гребні електричні установки. Миколаїв: НКІ, 1989. 28 с.
6. Системи керування електроприводів = Electric Drives Control Systems : навч. посібник / І. С. Білюк, С. О. Гаврилов, О. В. Савченко, А. М. Фоменко, Д. Ю. Шарейко. Миколаїв : НУК, 2023. 172 с.
7. Chapman S. J. Electric Machinery Fundamentals. 4-th ed. New York: McGraw-Hill, 2005. 773 p. ISBN 0-07-246523-9
8. Fitzgerald A. E., Kingsley C., Umans S. D. Electric Machinery (Fundamentals of Electric Machinery). 6-th ed. New York: McGraw-Hill, 2003. 703 p. ISBN 0-07-366009-4
9. Лавріненко Ю. М., Марченко О. С., Савченко П. І., Синявський О.Ю., Войтюк Д.Г., Лисенко В.П. Електропривод: підручник. Київ: «Ліра-К», 2009. 504 с. Режим доступу: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2016/Lavrin_2009_504.pdf

					171.6321м.КР.ПЗ.Джерела	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

10. Deraz S.A., Azazi H.Z. Current-limiting soft starter for three-phase induction motor drive system using PWM AC chopper. IET Power Electronics. 2017. Vol. 10, No. 8. P. 899-908. DOI: 10.1049/iet-pel.2016.0762

11. Knežević I., Čalasan M., Dlabac T. Novel analytical approaches for induction machine direct start-up speed–time curve modeling under fan load. Electrical Engineering. 2023. Vol. 106. P. 1925-1938. DOI: 10.1007/s00202-023-02039-3

12. Shrish Pandey, Bahadure Sushant. Two-phase soft start control of three-phase induction motor // In Proc. Of The 2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS), 2016. P. 1-6. DOI: 10.1109/ICPES.2016.7584127

13. Jackson Orok, Okpo Ekom, Umoette Anyanime. Comparative Analysis of Direct and Soft Starting Method for Induction Motor on Difference Load Levels. Journal of Engineering Research and Reports. 2024. Vol. 26. P. 308-322. DOI: 10.9734/jerr/2024/v26i101308

14. Возняк О. М., Штуць А. А., Тихонов В. К., Voznyak O., Shtuts A., Tykhonov V. Дослідження пускових режимів асинхронних двигунів та розробка пристрою плавного пуску // Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2022. № 3(118). С. 110-122.

15. Leila Lestiana, Muchlas Muchlas, Tole Sutikno. Microcontroller-based soft starter and overcurrent detector for enhancing performance of induction motor. Signal Image Process. Lett. 2024. Vol. 6 (1). P. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.31763/simple.v6i1.92>

16. Sapkota Y., Devkota S., Borra V., Cortes P., Li F., Itapu S. Harmonic content analysis of a soft starting variable frequency motor drive based on FPGA // Proceedings of the 2023 IEEE 3rd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET). 2023. P. 1-5. DOI: 10.1109/SeFeT57834.2023.10245108

					171.6321м.КР.ПЗ.Джерела	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

17. Abdel Menaem A., Beryozkina S., Safaraliev M. Intelligent current-speed soft-starting controller for an induction motor drive system // Journal of Energy Systems. 2024. Vol. 8. P. 221-236. DOI: 10.30521/jes.1533403

18. Adhi Kusmantoro, Theodora Indriati, Sigit Ristanto. Soft starter induction motor three phase with fuzzy logic controller inside delta // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12, No. 19. P. 8338-8345.

19. Said A. Deraz, Haitham Z. Azazi. Current limiting soft starter for three phase induction motor drive system using PWM AC chopper // IET Power Electronics. 2017. Volume 10, Issue 11. P. 1298-1306. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2016.0762>

20. Konuhova M. Induction motor dynamics regimes: a comprehensive study of mathematical models and validation // Applied Sciences. 2025. Vol. 15(3), 1527. P. 1-21. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15031527>

21. Ramezani Amin, Mohammadimehro Mohsen. Soft Starter Modeling for an Induction Drive Starting Study in an Industrial Plant // Proceedings of the UKSim 5th European Symposium on Computer Modeling and Simulation, EMS 2011, Madrid, Spain, November 16-18, 2011. P. 245-250. DOI: 10.1109/EMS.2011.57

22. Okonkwo Chibuzor, Uche Uju, Nwajuonye Raymond. Improvement of Three Phase Induction Motor Performance Using Voltage and Frequency Speed Control Techniques // Journal of Engineering Research and Reports. 2022. P. 19-31. DOI: 10.9734/jerr/2022/v22i417532

23. Zhu Min. The application of the intelligent soft starter to the pump load // In Proc. of The 3rd International Conference on Anti-counterfeiting, Security, and Identification in Communication. 2009. P. 628-630. DOI: 10.1109/ICASID.2009.5277020

24. Losiewicz Z., Mironiuk W., Cioch W., Sendek-Matysiak E., Homik W. Application of Generator-Electric Motor System for Emergency Propulsion of a

					171.6321м.КР.ПЗ.Джерела	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Vessel in the Event of Loss of the Full Serviceability of the Diesel Main Engine // Energies. 2022. Vol. 15, No. 8. P. 1-19. DOI: 10.3390/en15082833

25. Xu Luona, Wei Baoze, Yu Yun, Guerrero Josep, Vasquez Juan C. Coordinated Control of Diesel Generators and Batteries in DC Hybrid Electric Shipboard Power System // Energies. 2021. Vol. 14, No. 19. DOI: 10.3390/en14196246

26. Рябенський В.М. MAX+plus II. Основи проектування цифрових пристроїв на ПЛІС / В.М. Рябенський, О.О. Ушкаренко. К.: «Корнійчук», 2004. 253 с.

27. Рябенський В.М. Verilog. Практика проектування цифрових пристроїв на ПЛІС. : навч. посібник / В.М. Рябенський, О.О. Ушкаренко. Миколаїв : Іліон, 2007. 324 с.

28. Рябенський В.М. Програмовані електронні системи керування, збору та обробки інформації : підручник / В.М. Рябенський, О.О. Ушкаренко. Миколаїв : НУК, 2019. 490 с.

29. Abdullah Eial Awwad, Alaa Al-Quteimat, Mahmoud Al-Suod, O.O. Ushkarenko, Atia AlHawamleh. Improving the accuracy of the active power load sharing in paralleled generators in the presence of drive motors shaft speed instability. International Journal of Electronics and Telecommunications. 2021. Vol. 67(3). P. 371–377.

30. Ryabenskiy V.M., Ushkarenko A.O. Formalnoe opisanie elementov avtomatizirovannogo rabocheho mesta operatora elektroenergeticheskoy sistemyi / V.M. Ryabenskiy, A.O. Ushkarenko // Vestnik HGMA. 2014. Vol.1. P. 43-50.

31. Mahmoud M. Al-Suod, Ushkarenko A. O. Optimization of model structure of induction motor control system. WSEAS Transactions on Power Systems. 2017. No. 12. P. 316–323.

32. Mahmoud M. Al-Suod, Ushkarenko A. O. Analytical Representation of Control Processes of Induction Motor and Synchronous Generator in Power Plants. Jordan Journal of Electrical Engineering. 2016. No. 2(4). P. 278–288.

					171.6321м.КР.ПЗ.Джерела	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

Програмний код заголовних файлів

```
#ifndef _ASCII_MT_H_
#define _ASCII_MT_H_

#include <stdint.h>

#define ASCII_MT_CR_CHARACTER      0x0D
#define ASCII_MT_LF_CHARACTER      0x0A
#define ASCII_MT_START_CHARECTER  ':'
#define ASCII_MT_R_CHARACTER       'R'
#define ASCII_MT_W_CHARACTER       'W'
#define ASCII_MT_ASK_CHARACTER     '?'
#define ASCII_MT_ERROR_CHARACTER   '!'

#define READ_IO_OPERATION_MT       0
#define WRITE_IO_OPERATION_MT      1
#define NO_IO_OPERATION_MT         2

#define NUMBER_OF_DATA_BYTES_MT    8

#define FRAME_OK_MT                 1
#define FRAME_FAILD_MT              2

/* public API (renamed with _mt suffix) */
uint8_t  GetSerialTransaction_mt(uint8_t  *RequestAdress,
uint16_t *RequestData);
void  SetSerialTransaction_mt(uint8_t  IOoperation,  uint8_t
RequestAdress, uint16_t RequestData);

/* helper functions exported (also renamed) */
uint8_t ASCIICharToHex_mt(uint8_t byte);
uint8_t HexToASCIIChar_mt(uint8_t byte);

uint8_t GetLoByte_mt(uint8_t Byte);
uint8_t GetHiByte_mt(uint8_t Byte);

uint8_t CalcLRC_mt(uint8_t *Message, uint8_t MessageLenght);
void UnPackDataBuffer_mt(uint8_t *IOBuffer);
void PackDataBuffer_mt(uint8_t *IOBuffer);
uint8_t  ReadDataFrame_mt(uint8_t  *IOBuffer,      uint8_t
*IOoperation);
void  WriteDataFrame_mt(uint8_t  *IOBuffer,      uint8_t
IOoperation);
void TranslateBinToASCII_mt(uint8_t *IOBuffer);
void TranslateASCIIToBin_mt(uint8_t *IOBuffer);
void SendErrorFrame_mt(void);
void SendAskFrame_mt(void);

#endif /* _ASCII_MT_H_ */
```

					171.6321м.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

```

interface_mt.h

#ifndef _INTERFACE_MT_H_
#define _INTERFACE_MT_H_

#include <stdint.h>

#define MAX_INTERFACE_MEMORY_ADRESS_MT          9

#define FAULT_REG_MT                             0
#define CONTROL_REG_MT                          1
#define ALPHA_BEGIN_REG_MT                      2
#define ALPHA_END_REG_MT                       3
#define START_TIME_REG_MT                      4
#define CURRENT_REG_MT                         5
#define GAIN_REG_MT                            6
#define MEMORY_DATA_0_REG_MT                   7
#define MEMORY_DATA_1_REG_MT                   8
#define MEMORY_DATA_2_REG_MT                   9

#define CONTROL_REG_MIN_MT                     0
#define CONTROL_REG_MAX_MT                     2

#define ALPHA_REG_MIN_MT                      0
#define ALPHA_REG_MAX_MT                     180

#define START_TIME_REG_MIN_MT                 1
#define START_TIME_REG_MAX_MT                0xFFFF

#define CURRENT_REG_MIN_MT                    1
#define CURRENT_REG_MAX_MT                   512

#define GAIN_REG_MIN_MT                      1
#define GAIN_REG_MAX_MT                     100

#define CONTROL_REG_DEFAULT_MT                0
#define ALPHA_BEGIN_REG_DEFAULT_MT           160
#define ALPHA_END_REG_DEFAULT_MT              0
#define START_TIME_REG_DEFAULT_MT            0x3E80
#define GAIN_REG_DEFAULT_MT                   50
#define CURRENT_REG_DEFAULT_MT                100

/* public API */
void InitInterfaceMemory_mt(void);
void ExWriteToInterfaceMemory_mt(uint8_t memaddress, uint16_t
memdata);
uint16_t ExReadFromInterfaceMemory_mt(uint8_t memaddress);
void      IntWriteToInterfaceMemory_mt(uint8_t      memaddress,
uint16_t memdata);
uint16_t IntReadFromInterfaceMemory_mt(uint8_t memaddress);
void CheckParameter_mt(uint16_t minvalue, uint16_t maxvalue,
uint16_t *value);

```

					171.6321м.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

```

#endif /* _INTERFACE_MT_H_ */

lcd_mt.h

#ifndef _LCD_MT_H_
#define _LCD_MT_H_

#include <stdint.h>
#include <avr/io.h>

#define MODE_4_BIT_MASK_MT      0xF0

#define LCD_DIR_PORT_MT         DDRB
#define LCD_IP_PORT_MT          PINB
#define LCD_OP_PORT_MT          PORTB

#define LCD_EN_BIT_MT           (1<<2) /* PB2 */
#define LCD_RS_BIT_MT           (1<<0) /* PB0 */
#define LCD_RW_BIT_MT           (1<<1) /* PB1 */

/* basic commands */
#define LCD_ON_MT                0x0C
#define LCD_CURS_ON_MT           0x0D
#define LCD_OFF_MT               0x08
#define LCD_HOME_MT              0x02
#define LCD_CLEAR_MT             0x01
#define LCD_NEW_LINE_MT          0xC0
#define LCD_FUNCTION_SET_MT      0x28 /* 4-bit, 2 lines, 5x8
#define LCD_MODE_SET_MT          0x06

void Init_LCD_mt(void);
uint8_t LCD_Busy_mt(void);
void LCD_WriteControlWithoutBusyChech_mt(uint8_t CMD);
void LCD_WriteControl_mt(uint8_t CMD);
void LCD_WriteData_mt(uint8_t Data);
void LCD_Cursor_mt(char row, char column);
void LCD_DisplayCharacter_mt(char Char);
void LCD_DisplayString_mt(char row, char column, const char
*string);
void SimpleDelay_mt(void);
void Delay15ms_mt(void);
void Delay4_1ms_mt(void);
void Delay100us_mt(void);

#endif /* _LCD_MT_H_ */

keyboard_mt.h
#ifndef _KEYBOARD_MT_H_
#define _KEYBOARD_MT_H_

```

					171.6321м.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ документи	Підпис	Дата		

```

#include <stdint.h>
#include <avr/io.h>

#define KEYBOARD_PORT_MT      PORTD
#define KEYBOARD_PINS_MT      PIND
#define KEYBOARD_DDR_MT       DDRD

#define KEYS_MASK_MT          0xF0
#define ENTER_KEY_MASK_MT     (1<<4)
#define ESCAPE_KEY_MASK_MT    (1<<5)
#define RIGHT_KEY_MASK_MT     (1<<6)
#define LEFT_KEY_MASK_MT      (1<<7)

#define HOLD_TIME_MT          255

#define NO_KEYS_EVENT_MT      0
#define ON_ENTER_EVENT_MT     1
#define ON_ESCAPE_EVENT_MT    2
#define ON_RIGHT_EVENT_MT     3
#define ON_LEFT_EVENT_MT      4
#define ON_RIGHT_HOLD_EVENT_MT 5
#define ON_LEFT_HOLD_EVENT_MT 6

void InitKeyboard_mt(void);
uint8_t GetKeyboardEvent_mt(void);
void SetTempSWTimer_mt(uint8_t time);
uint8_t TempSWTimerOverflow_mt(void);

void timer1_init_mt(void);

#endif /* _KEYBOARD_MT_H_ */

iir_filter_mt.h

#ifndef _IIR_FILTER_MT_H_
#define _IIR_FILTER_MT_H_

#include <stdint.h>

#define IIR_FACTOR_MT         6
#define IIR_DIVIDER_MT        7

void InitIIRFilter_mt(void);
uint16_t ProcessIIRFilter_mt(uint16_t newdata);

#endif /* _IIR_FILTER_MT_H_ */

fir_filter_mt.h

#ifndef _FIR_FILTER_MT_H_
#define _FIR_FILTER_MT_H_

```

					171.6321м.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ документи	Підпис	Дата		

```

#include <stdint.h>

#define FIFO_BUFFER_SIZE_MT      16
#define FIR_FACTOR_MT            4

#define FIFO_BUFFER_MASK_MT      (FIFO_BUFFER_SIZE_MT - 1)
#if (FIFO_BUFFER_SIZE_MT & FIFO_BUFFER_MASK_MT)
#error FIFO buffer size must be power of two
#endif

void InitFIRFilter_mt(void);
uint16_t ProcessFIRFilter_mt(uint16_t newdata);

void WriteToFIFO_mt(uint16_t data);
uint16_t ReadFromFIFO_mt(void);

#endif /* _FIR_FILTER_MT_H_ */

```

					171.6321м.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ДОДАТОК Б

Програмний код реалізації функцій

```
ascii_mt.c

#include <avr/io.h>
#include <string.h>
#include "ascii_mt.h"

#define SERIAL_RX_BUFFER_SIZE 64
static uint8_t serial_rx_buffer[SERIAL_RX_BUFFER_SIZE];
static uint8_t serial_rx_head = 0;
static uint8_t serial_rx_tail = 0;

void uart_push_byte_mt(uint8_t b)
{
    serial_rx_buffer[serial_rx_head++] = b;
    if(serial_rx_head >= SERIAL_RX_BUFFER_SIZE)
serial_rx_head = 0;
}

/* pop byte or return 0xff if empty */
static uint8_t uart_pop_byte_mt(void)
{
    if(serial_rx_tail == serial_rx_head) return 0xFF;
    uint8_t b = serial_rx_buffer[serial_rx_tail++];
    if(serial_rx_tail >= SERIAL_RX_BUFFER_SIZE)
serial_rx_tail = 0;
    return b;
}

uint8_t ASCIICharToHex_mt(uint8_t byte)
{
    if((byte >= '0') && (byte <= '9')) return (uint8_t)(byte
- '0');
    if((byte >= 'A') && (byte <= 'F')) return (uint8_t)(10 +
byte - 'A');
    if((byte >= 'a') && (byte <= 'f')) return (uint8_t)(10 +
byte - 'a');
    return 0xFF; /* invalid */
}

uint8_t HexToASCIIChar_mt(uint8_t byte)
{
    byte &= 0x0F;
    if(byte < 10) return (uint8_t)('0' + byte);
    return (uint8_t)('A' + (byte - 10));
}
```

					171.6321м.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

```

uint8_t GetLoByte_mt(uint8_t Byte){ return Byte & 0x0F; }
uint8_t GetHiByte_mt(uint8_t Byte){ return (Byte >> 4) &
0x0F; }

uint8_t CalcLRC_mt(uint8_t *Message, uint8_t MessageLenght)
{
    uint8_t lrc = 0;
    for(uint8_t i=0;i<MessageLenght;i++) lrc += Message[i];
    return (uint8_t)(-lrc);
}

void PackDataBuffer_mt(uint8_t *IOBuffer)
{
}

uint8_t ReadDataFrame_mt(uint8_t *IOBuffer, uint8_t
*IOoperation)
{
    uint8_t b;
    /* wait for start */
    do {
        b = uart_pop_byte_mt();
        if(b == 0xFF) return FRAME_FAILD_MT; /* no data */
    } while(b != ASCII_MT_START_CHARECTER);

    /* read until CR */
    uint8_t idx = 0;
    while(1){
        b = uart_pop_byte_mt();
        if(b == 0xFF) return FRAME_FAILD_MT;
        if(b == ASCII_MT_CR_CHARACTER) break;
        IOBuffer[idx++] = b;
        if(idx >= 64) return FRAME_FAILD_MT;
    }
    IOBuffer[idx] = 0;
    if(IOBuffer[0] == ASCII_MT_R_CHARACTER) *IOoperation =
READ_IO_OPERATION_MT;
    else if(IOBuffer[0] == ASCII_MT_W_CHARACTER)
*IOoperation = WRITE_IO_OPERATION_MT;
    else *IOoperation = NO_IO_OPERATION_MT;
    return FRAME_OK_MT;
}

void WriteDataFrame_mt(uint8_t *IOBuffer, uint8_t
IOoperation)
{
}

void TranslateBinToASCII_mt(uint8_t *IOBuffer){ }
void TranslateASCIIToBin_mt(uint8_t *IOBuffer){ }
void SendErrorFrame_mt(void){ }

```

					171.6321м.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

```

void SendAskFrame_mt(void){ }

uint8_t GetSerialTransaction_mt(uint8_t *RequestAddress,
uint16_t *RequestData)
{
    uint8_t buff[64];
    uint8_t op;
    if(ReadDataFrame_mt(buff, &op) != FRAME_OK_MT) return
FRAME_FAILD_MT;
    if(op == READ_IO_OPERATION_MT){
        *RequestAddress = (uint8_t)(buff[1] - '0');
        *RequestData = 0;
        return FRAME_OK_MT;
    } else if(op == WRITE_IO_OPERATION_MT){
        *RequestAddress = (uint8_t)(buff[1] - '0');
        *RequestData = (uint16_t)((buff[2] - '0')*10 +
(buff[3] - '0'));
        return FRAME_OK_MT;
    }
    return FRAME_FAILD_MT;
}

void SetSerialTransaction_mt(uint8_t IOoperation, uint8_t
RequestAddress, uint16_t RequestData)
{
}

interface_mt.c

#include "interface_mt.h"

static uint16_t
interface_memory_mt[MAX_INTERFACE_MEMORY_ADRESS_MT + 1];

void InitInterfaceMemory_mt(void)
{
    interface_memory_mt[FAULT_REG_MT] = 0;
    interface_memory_mt[CONTROL_REG_MT] =
CONTROL_REG_DEFAULT_MT;
    interface_memory_mt[ALPHA_BEGIN_REG_MT] =
ALPHA_BEGIN_REG_DEFAULT_MT;
    interface_memory_mt[ALPHA_END_REG_MT] =
ALPHA_END_REG_DEFAULT_MT;
    interface_memory_mt[START_TIME_REG_MT] =
START_TIME_REG_DEFAULT_MT;
    interface_memory_mt[GAIN_REG_MT] = GAIN_REG_DEFAULT_MT;
    interface_memory_mt[CURRENT_REG_MT] =
CURRENT_REG_DEFAULT_MT;
    interface_memory_mt[MEMORY_DATA_0_REG_MT] = 0;
    interface_memory_mt[MEMORY_DATA_1_REG_MT] = 0;
    interface_memory_mt[MEMORY_DATA_2_REG_MT] = 0;
}

```

```

void ExWriteToInterfaceMemory_mt(uint8_t memaddress, uint16_t
memdata)
{
    if(memaddress > MAX_INTERFACE_MEMORY_ADRESS_MT) return;
    /* external write should also validate values */
    switch(memaddress){
        case CONTROL_REG_MT:
            CheckParameter_mt(CONTROL_REG_MIN_MT,
CONTROL_REG_MAX_MT, &memdata);
            break;
        case ALPHA_BEGIN_REG_MT:
        case ALPHA_END_REG_MT:
            CheckParameter_mt(ALPHA_REG_MIN_MT,
ALPHA_REG_MAX_MT, &memdata);
            break;
        case START_TIME_REG_MT:
            CheckParameter_mt(START_TIME_REG_MIN_MT,
START_TIME_REG_MAX_MT, &memdata);
            break;
        case CURRENT_REG_MT:
            CheckParameter_mt(CURRENT_REG_MIN_MT,
CURRENT_REG_MAX_MT, &memdata);
            break;
        case GAIN_REG_MT:
            CheckParameter_mt(GAIN_REG_MIN_MT,
GAIN_REG_MAX_MT, &memdata);
            break;
        default:
            break;
    }
    interface_memory_mt[memaddress] = memdata;
}

uint16_t ExReadFromInterfaceMemory_mt(uint8_t memaddress)
{
    if(memaddress > MAX_INTERFACE_MEMORY_ADRESS_MT) return 0;
    return interface_memory_mt[memaddress];
}

void IntWriteToInterfaceMemory_mt(uint8_t memaddress,
uint16_t memdata)
{
    /* internal write without further validation (but we
still check bounds)
    This is useful for fast internal updates.
    */
    if(memaddress > MAX_INTERFACE_MEMORY_ADRESS_MT) return;
    interface_memory_mt[memaddress] = memdata;
}

uint16_t IntReadFromInterfaceMemory_mt(uint8_t memaddress)

```

					171.6321м.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ документи	Підпис	Дата		

```

    {
        if(memadress > MAX_INTERFACE_MEMORY_ADRESS_MT) return 0;
        return interface_memory_mt[memadress];
    }

    void CheckParameter_mt(uint16_t minvalue, uint16_t maxvalue,
uint16_t *value)
    {
        if(*value < minvalue) *value = minvalue;
        else if(*value > maxvalue) *value = maxvalue;
    }

    lcd_mt.c

#include "lcd_mt.h"
#include <util/delay.h>

static void write_nibble_mt(uint8_t nibble)
{
    LCD_OP_PORT_MT = (LCD_OP_PORT_MT & ~MODE_4_BIT_MASK_MT)
| (nibble & MODE_4_BIT_MASK_MT);
    /* pulse E */
    LCD_OP_PORT_MT |= LCD_EN_BIT_MT;
    _delay_us(1);
    LCD_OP_PORT_MT &= ~LCD_EN_BIT_MT;
    _delay_us(50);
}

void Init_LCD_mt(void)
{
    LCD_DIR_PORT_MT |= (LCD_EN_BIT_MT | LCD_RS_BIT_MT |
LCD_RW_BIT_MT);
    /* set data nibble pins as outputs (upper 4 bits) */
    LCD_DIR_PORT_MT |= MODE_4_BIT_MASK_MT;

    _delay_ms(20);
    /* initialization sequence for 4-bit mode */
    write_nibble_mt(0x30 & MODE_4_BIT_MASK_MT);
    _delay_ms(5);
    write_nibble_mt(0x30 & MODE_4_BIT_MASK_MT);
    _delay_us(200);
    write_nibble_mt(0x20 & MODE_4_BIT_MASK_MT);

LCD_WriteControlWithoutBusyChech_mt(LCD_FUNCTION_SET_MT);
    LCD_WriteControlWithoutBusyChech_mt(LCD_ON_MT);
    LCD_WriteControlWithoutBusyChech_mt(LCD_CLEAR_MT);
    _delay_ms(2);
    LCD_WriteControlWithoutBusyChech_mt(LCD_MODE_SET_MT);
}

uint8_t LCD_Busy_mt(void)

```

```

{
    return 0;
}

void LCD_WriteControlWithoutBusyChech_mt(uint8_t CMD)
{
    /* high nibble */
    LCD_OP_PORT_MT &= ~LCD_RS_BIT_MT; /* command */
    LCD_OP_PORT_MT &= ~LCD_RW_BIT_MT; /* write */
    write_nibble_mt((CMD & 0xF0));
    /* low nibble */
    write_nibble_mt((CMD << 4) & 0xF0);
}

void LCD_WriteControl_mt(uint8_t CMD)
{
    while(LCD_Busy_mt());
    LCD_WriteControlWithoutBusyChech_mt(CMD);
}

void LCD_WriteData_mt(uint8_t Data)
{
    while(LCD_Busy_mt());
    LCD_OP_PORT_MT |= LCD_RS_BIT_MT; /* data */
    LCD_OP_PORT_MT &= ~LCD_RW_BIT_MT; /* write */
    write_nibble_mt(Data & 0xF0);
    write_nibble_mt((Data << 4) & 0xF0);
}

void LCD_Cursor_mt(char row, char column)
{
    uint8_t addr = 0;
    if(row == 0) addr = 0x00 + column;
    else addr = 0x40 + column;
    LCD_WriteControl_mt(0x80 | addr);
}

void LCD_DisplayCharacter_mt(char Char)
{
    LCD_WriteData_mt((uint8_t)Char);
}

void LCD_DisplayString_mt(char row, char column, const char
*string)
{
    LCD_Cursor_mt(row, column);
    while(*string) {
        LCD_DisplayCharacter_mt(*string++);
    }
}

void SimpleDelay_mt(void){ _delay_us(100); }

```

```

void Delay15ms_mt(void){ _delay_ms(15); }
void Delay4_lms_mt(void){ _delay_ms(4); }
void Delay100us_mt(void){ _delay_us(100); }

keyboard_mt.c

#include "keyboard_mt.h"
#include <util/delay.h>

static volatile uint8_t temp_sw_timer_mt = 0;

void InitKeyboard_mt(void)
{
    KEYBOARD_DDR_MT &= ~KEYS_MASK_MT;
    KEYBOARD_PORT_MT |= KEYS_MASK_MT;
    temp_sw_timer_mt = 0;
}

void SetTempSWTimer_mt(uint8_t time)
{
    temp_sw_timer_mt = time;
}

uint8_t TempSWTimerOverFlow_mt(void)
{
    return (temp_sw_timer_mt == 0);
}

uint8_t GetKeyboardEvent_mt(void)
{
    uint8_t pins = (KEYBOARD_PINS_MT & KEYS_MASK_MT);
    uint8_t event = NO_KEYS_EVENT_MT;
    if((pins & ENTER_KEY_MASK_MT) == 0) event =
ON_ENTER_EVENT_MT;
    else if((pins & ESCAPE_KEY_MASK_MT) == 0) event =
ON_ESCAPE_EVENT_MT;
    else if((pins & RIGHT_KEY_MASK_MT) == 0) event =
ON_RIGHT_EVENT_MT;
    else if((pins & LEFT_KEY_MASK_MT) == 0) event =
ON_LEFT_EVENT_MT;

    if(event == ON_RIGHT_EVENT_MT || event ==
ON_LEFT_EVENT_MT) {
        if(temp_sw_timer_mt == 0) temp_sw_timer_mt =
HOLD_TIME_MT;
        else {
            if(--temp_sw_timer_mt == 0) {
                if(event == ON_RIGHT_EVENT_MT) return
ON_RIGHT_HOLD_EVENT_MT;
                else return ON_LEFT_HOLD_EVENT_MT;
            }
        }
    }
}

```

					171.6321м.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

```

        } else {
            temp_sw_timer_mt = 0;
        }
        return event;
    }

void timer1_init_mt(void)
{
}

iir_filter_mt.c

#include "iir_filter_mt.h"

static uint16_t iir_prev_mt = 0;

void InitIIRFilter_mt(void)
{
    iir_prev_mt = 0;
}

uint16_t ProcessIIRFilter_mt(uint16_t newdata)
{
    uint32_t tmp = ((uint32_t)iir_prev_mt *
((1<<IIR_DIVIDER_MT) - 1)) + newdata;
    uint16_t out = (uint16_t)(tmp >> IIR_DIVIDER_MT);
    iir_prev_mt = out;
    return out;
}

fir_filter_mt.c

#include "fir_filter_mt.h"

static uint16_t fifo_mt[FIFO_BUFFER_SIZE_MT];
static uint8_t fifo_wp_mt = 0;
static uint8_t fifo_rp_mt = 0;
static uint32_t fir_sum_mt = 0; /* maintain running sum for
efficiency */

void InitFIRFilter_mt(void)
{
    for(uint8_t i=0;i<FIFO_BUFFER_SIZE_MT;i++) fifo_mt[i] =
0;

    fifo_wp_mt = fifo_rp_mt = 0;
    fir_sum_mt = 0;
}

void WriteToFIFO_mt(uint16_t data)
{
    /* subtract old value, add new */
    uint16_t old = fifo_mt[fifo_wp_mt];
    fir_sum_mt -= old;

```

					171.6321м.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						86
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		


```

        fifo_mt[fifo_wp_mt] = data;
        fir_sum_mt += data;
        fifo_wp_mt = (fifo_wp_mt + 1) & FIFO_BUFFER_MASK_MT;
    }

uint16_t ReadFromFIFO_mt(void)
{
    uint16_t v = fifo_mt[fifo_rp_mt];
    fifo_rp_mt = (fifo_rp_mt + 1) & FIFO_BUFFER_MASK_MT;
    return v;
}

uint16_t ProcessFIRFilter_mt(uint16_t newdata)
{
    WriteToFIFO_mt(newdata);
    uint16_t avg = (uint16_t)(fir_sum_mt /
FIFO_BUFFER_SIZE_MT);
    return avg;
}

```

					171.6321м.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						87
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		