Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр
(назва освітнього ступеня)

на тему: **Асинхронний електропривід насоса з тиристорним регулятором напруги**

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи ЕТ-42
спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

(підпис) Паранюк С. Ю. (прізвище та ініціали)

Керівник (підпис) Наконечний М. С. (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль (підпис) Мовчан Л. Т. (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри (підпис) Коваль В. П. (прізвище та ініціали)

Рецензент (підпис) Дідич І. С. (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2026

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Коваль В. П.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 20___ р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

студенту Паранюку Сергію Юрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Асинхронний електропривід насоса з тиристорним регулятором напруги

Керівник роботи Наконечний Мирослав Степанович, кандидат технічних наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «*31*» *грудня* 2025 року № *4/7-1163*

2. Термін подання студентом завершеної роботи червень 2026 року

3. Вихідні дані до роботи Параметри насосної установки
.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)
1 Аналітичний розділ
2 Розрахунково-дослідницький розділ
3 Проектно-конструкторський розділ
4 Безпека життєдіяльності, основи охорони праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	Гурик О. Я., кандидат технічних наук, доцент кафедри МТ		
Нормоконтроль	Мовчан Л. Т., кандидат технічних наук, доцент кафедри ЕІ		

7. Дата видачі завдання 26 січня 2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	01.02.2026	
2	Аналітичний розділ	03.02.2026	
3	Розрахунково-дослідницький розділ	10.02.2026	
4	Проектно-конструкторський розділ	15.02.2026	
5	Проектно-конструкторський розділ	08.06.2026	
6	Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	10.06.2026	
7	Оформлення пояснювальної записки	15.06.2026	
8	Оформлення графічного матеріалу	20.06.2026	

Студент _____ Паранюк С. Ю.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Наконечний М. С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТ-42 - Т.: ТНТУ, 2026.

Стор. 64; рис. 24; табл. 12; джерел 10;

У кваліфікаційній роботі проведено розробку та дослідження регульованого електропривода насосної установки на основі системи «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун» (ТРН–АД) із заданими показниками якості керування.

Регулювання кутової швидкості асинхронного двигуна реалізовано шляхом зміни кута керування тиристорів, увімкнених за зустрічно-паралельною схемою у кожну фазу статора. Застосування даної системи забезпечує не лише плавний пуск електроприводу, а й ефективне керування частотою обертання ротора із досягненням заданих показників якості як у динамічних (перехідних), так і в усталених режимах роботи.

У результаті проведених досліджень спроектовано та розраховано регульований асинхронний електропривод насосної установки на базі тиристорного регулятора напруги (ТРН), який повністю задовольняє вимогам технічного завдання. Розроблена система характеризується високими техніко-експлуатаційними властивостями, зокрема: оптимальними показниками якості перехідних, підвищеними енергетичними показниками в усіх діапазонах регулювання.

Ключові слова: АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ВІДЦЕНТРОВИЙ НАСОС, ТИРИСТОРНИЙ РЕГУЛЯТОР НАПРУГИ, ПЛАВНИЙ ПУСК, ПУСКОВИЙ СТРУМ, ЕНЕРГЕТИЧНІ ВТРАТИ.

.

ЗМІСТ

ВСТУП 6
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ 8
1.1 Конструктивні особливості та принцип дії відцентрових насосів 8
1.2 Основні вимоги до відцентрових насосів 10
1.3 Аналіз способів пуску асинхронного двигуна 11
1.4 Тиристорний способів регулювання кутової швидкості вала насоса 15
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ 19
2.1. Розрахунок потужності двигуна та його попередній вибір 19
2.2. Розрахунок і вибір основних силових елементів регульованого електроприводу 21
2.3. Тепловий розрахунок і вибір радіатора 23
2.4. Вибір апаратури управління та захисту 27
2.5 Розрахунок і вибір типу перетину кабелю 30
2.6 Визначення параметрів Т-подібної схеми заміщення 31
2.7 Штучні механічні та електромеханічні характеристики 36
3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ 42
3.1 Імітаційне моделювання системи за допомогою програми Matlab Simulink 42
3.2 Моделювання системи плавного пуску ТРН-АД у Matlab Simulink 45
3.3 Дослідження споживаної потужності при різних заданих значень інтенсивності 48
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ 56
4.1 Засоби та заходи електробезпеки, що використовуються за нормального режиму роботи електроустановок 56
4.2 Причини ураження електричним струмом 59
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 61
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 62

ВСТУП

Відцентрові насоси є одними з найпоширеніших машин, які масово використовуються у системах водопостачання, водовідведення, теплоенергетиці, а також у хімічній та інших галузях промисловості. Насосні агрегати працюють у тривалому режимі навантаження (S1), що характеризується помірним навантаженням на валу та вентиляторною характеристикою статичного моменту опору. Для таких умов найдоцільнішим є застосування асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором завдяки їхній простоті, надійності та низькій вартості.

Проте використання найпоширенішого прямого пуску асинхронних двигунів має серйозні недоліки. Він супроводжується великим пусковим струмом, який може перевищувати номінальний у 5-7 разів, а також значним ударним струмом та надлишковим пусковим моментом. Такі перевантаження викликають великі механічні напруження в обладнанні, а раптова зупинка або різкий старт призводять до виникнення небезпечних гідравлічних ударів у трубопровідних системах та їхнього прискореного зносу.

Хоча для вирішення цих проблем часто використовують перетворювачі частоти, вони є дороговартісними та надлишковими для систем, що не потребують широкого діапазону регулювання швидкості під час звичайної роботи. Значно ефективнішим і економічно вигіднішим варіантом для безударного пуску та захисту гідравлічного комплексу є використання пристроїв плавного пуску на базі тиристорних регуляторів напруги (ТРН). ТРН характеризуються простотою конструкції, меншими габаритами, високою надійністю та значно нижчою вартістю порівняно з частотними перетворювачами. Тому розробка та дослідження систем керування на основі комплексу «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун» (ТРН–АД) для відцентрових насосів є актуальним завданням, що сприяє підвищенню енергоефективності та надійності роботи технологічного обладнання.

Метою роботи є дослідження асинхронного електроприводу відцентрового насоса з тиристорним регулятором напруги.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– проаналізувати способи керування швидкістю та пуском асинхронного електродвигуна;

– розглянути вимоги до електроприводу відцентрового насоса;

– провести техніко-економічне обґрунтування вибору тиристорного 12 регулятора напруги як варіанту керування асинхронним електродвигуном насоса.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Конструктивні особливості та принцип дії відцентрових насосів

Серед динамічних гідромашин відцентрові насоси займають провідне місце за поширеністю. Їхнє застосування охоплює найрізноманітніші галузі: від систем міського водопостачання та водовідведення до теплової, атомної і хімічної енергетики, а також аерокосмічної індустрії.

Базова конструкція агрегату включає спіралеподібний корпус, усередині якого на валу жорстко зафіксовано робоче колесо. Це колесо утворене двома дисками, між якими розміщені криволінійні лопаті. Їхній вигин завжди спрямований у бік, протилежний напрямку обертання ротора. Інтеграція насоса до гідравлічної системи, зокрема до всмоктувальної та нагнітальної магістралей, забезпечується за допомогою відповідних вхідних та вихідних патрубків.

Функціонування пристрою базується на дії відцентрових сил. Робочий цикл починається виключно після попереднього заповнення робочої камери рідиною (рисунок 1.1).

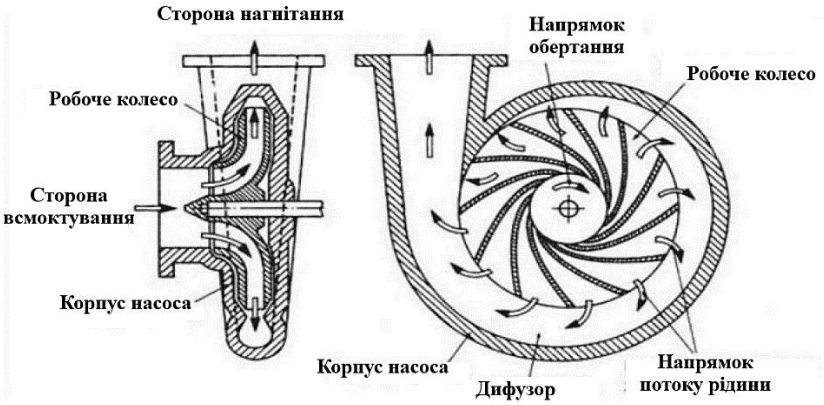

Рисунок 1.1 – Конструктивна схема відцентрового насоса

Перекачувана рідина через всмоктувальний патрубок подається вздовж осі до центру обертового колеса, після чого потрапляє у міжлопатеві канали. Завдяки високій швидкості обертання генерується відцентрова сила, яка

відкидає потік від центру до периферійних стінок корпусу. Цей процес призводить до створення розрідження (зони зниженого тиску) у центральній частині колеса та формування високого тиску на периферії.

Саме ця різниця тисків змушує рідину виштовхуватися у напірний трубопровід, тоді як розрідження в центрі забезпечує безперервне підсмоктування нових порцій рідини з магістралі. Отже, робота насоса полягає у безперервній трансформації кінетичної енергії потоку в потенціальну енергію тиску.

Залежно від необхідних параметрів, обладнання може виготовлятися в одноступеневому (з одним робочим колесом) або багатоступеневому (з кількома колесами) виконанні. Незалежно від кількості ступенів, фундаментальний принцип переміщення рідини залишається незмінним.

Для систематизації відцентрових насосів використовують розширену класифікацію, яка базується на низці технічних критеріїв. Зокрема, за кількістю ступенів машини поділяються на одноступеневі та багатоступеневі, а за просторовою орієнтацією осі обертання — на горизонтальні або вертикальні. Залежно від створюваного тиску агрегати бувають низьконапірними (до 0,2 МПа), середньонапірними (від 0,2 до 0,6 МПа) та високонапірними (понад 0,6 МПа).

За схемою підведення середовища розрізняють моделі з одностороннім входом або двостороннім (подвійного всмоктування). Конструкція роз'єму корпусу може передбачати горизонтальну або вертикальну площину, а метод відведення рідини реалізується у вигляді спірального або лопатевого (напрямного апарата) відводу. Крім того, за показником швидкохідності насоси класифікують на тихохідні, нормальні та високошвидкісні.[1]

Широка сфера застосування зумовлює поділ обладнання за функціональним призначенням: водопровідні, каналізаційні, пожежні, хімічні, нафтові, землесосні, терморегулюючі тощо. За типом з'єднання з приводом пристрої можуть бути приводними (передача обертового моменту через шків чи редуктор) або мати пряме підключення до електродвигуна

через пружні, магнітні чи інші види муфт. За позиціонуванням відносно рівня рідини виділяють поверхневі, напівзанурювальні (глибинні) та повністю занурювальні насоси.

1.2 Основні вимоги до відцентрових насосів

Насосні агрегати належать до механізмів, що працюють у тривалому режимі навантаження (S1), який характеризується значною кількістю мотогодин на рік за обмеженої частоти пусків. Навантаження на валу приводного двигуна є помірним, без значних динамічних перевантажень. Необхідний діапазон регулювання частоти обертання, як правило, не перевищує значень 1:3. Момент статичного опору механізму має вентиляторну характеристику, тобто є пропорційним квадрату кутової швидкості (а споживана потужність — кубу швидкості). Електропривод відцентрового насоса має функціонувати в умовах підвищеної температури та вологості навколишнього середовища, а також забезпечувати максимальний рівень безвідмовності. За таких умов найбільш доцільним є застосування асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором (АД КР). Цей тип машини відрізняється конструктивною простотою, високою надійністю, відсутністю щітково-колекторного вузла та відносно низькою вартістю.

На основі проведеного аналізу сформульовано технічні вимоги до проектованого електроприводу відцентрового насоса. Система електроприводу повинна забезпечувати:

- діапазон регулювання частоти обертання: не менше ніж 1:3;
- коефіцієнт перевантажувальної здатності: не нижче за 1,5;
- плавний пуск насосного агрегату та стабільний розгін до заданої робочої швидкості;
- зупинку системи шляхом гальмування вибігом;

- кліматичне виконання й категорію розміщення: УХЛ4 (або УХЛ3 відповідно до умов експлуатації);
- ступінь захисту оболонки обладнання: не нижче ніж IP44 згідно з ДСТУ.

1.3 Аналіз способів пуску асинхронного двигуна

Існує ціла низка способів пуску асинхронного електродвигуна, основними з яких є: прямий пуск, зміна кількості пар полюсів, використання системи з перетворювачем частоти, а також система плавного пуску з використанням тиристорного регулятора напруги.

Вимоги до пуску асинхронного електродвигуна:

- Під час пуску АД повинен розвивати достатньо великий пусковий момент, щоб ротор установки міг закрутитися та досягти номінальної частоти обертання;
- Пусковий струм повинен бути обмежений таким значенням, щоб не сталося пошкодження двигуна та порушення нормального режиму роботи мережі;
- Схема пуску повинна відрізнятися простотою, а кількість і вартість пускових пристроїв — бути відносно невеликими.

Прямий пуск асинхронного двигуна.

Прямий пуск (пуск безпосереднім підключенням до мережі) залишається одним із найпоширеніших методів введення асинхронного електродвигуна в експлуатацію. Комутаційно-захисна апаратура в такому разі складається з лінійного контактора, а також теплового або електронного реле перевантаження. Головним недоліком цього способу є високе значення пускового струму порівняно з іншими методами пуску. Кратність пускового струму відносно номінального становить $I_{пуск} / I_{ном} = 6...7$. Крім того, у початковий момент перехідного процесу виникає ударний (надперехідний) струм, який може перевищувати номінальне значення у 14 разів, що

зумовлено перехідними процесами у магнітному колі машини під час подачі повної напруги на знеструмлений двигун. Ці показники залежать від габариту та конструктивних особливостей машини, причому потужні двигуни характеризуються більшою кратністю пускових та ударних струмів.[2]

Під час прямого пуску пусковий момент двигуна також є значним і в більшості випадків перевищує статичний момент опору механізму. Надлишковий динамічний момент призводить до виникнення значних механічних напружень у трансмісії, кінематичних передачах та робочих органах агрегатів. Проте існують технічні умови, за яких цей метод пуску є оптимальним, а іноді — єдино можливим за вимогами технологічного процесу.

Пуск перемиканням схеми з'єднання обмоток «зірка-трикутник»

Пуск із перемиканням обмоток зі схеми «зірка» на «трикутник» дозволяє знизити пусковий струм і початковий пусковий момент двигуна. Комутаційне обладнання зазвичай містить три контактори, реле перевантаження та реле часу (таймер), яке задає тривалість роботи у схемі «зірка» (пусковий режим). Обов'язковою умовою застосування цього методу є те, що в усталеному номінальному режимі обмотки статора двигуна повинні бути з'єднані за схемою «трикутник».

У цьому режимі пусковий струм знижується приблизно до 33% від значення при прямому пуску, а стартовий крутний момент аналогічно зменшується втричі (становить близько 33% від моменту прямого пуску). Цей спосіб пуску є ефективним лише за умови низького початкового статичного моменту опору з боку приводного механізму. Якщо електродвигун суттєво навантажений, його динамічний момент може виявитися недостатнім для розгону до кутової швидкості, за якої має відбутися перемикання на схему «трикутник». Наприклад, під час пуску вентиляторів або насосів момент опору на початку розгону є незначним і зростає пропорційно квадрату швидкості. У разі досягнення 80–85% від

номінальної частоти обертання двигуна момент опору механізму зрівнюється з моментом двигуна у схемі «зірка», і подальший розгін припиняється. Для досягнення номінальної швидкості необхідне перемикання на схему «трикутник», що супроводжується значними комутаційними піками механічних навантажень у трансмісії та кидками струму в мережі. У певних ситуаціях цей перехідний піковий струм може навіть перевищити пусковий струм прямого пуску. Якщо в момент пуску статичний момент опору на валу перевищує 30–50% від номінального моменту двигуна, реалізація пуску за схемою «зірка-трикутник» стає неможливою.

Запуск із використанням перетворювача частоти

Наразі найефективнішим способом запуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором є запуск із використанням перетворювача частоти.

Частотний перетворювач (ЧП) складається з двох блоків. Перший блок перетворює напругу змінного струму на постійний струм, а другий перетворює напругу постійного струму назад на змінну, але з регульованою частотою 0–250 Гц. Так як швидкість обертання двигуна є функцією частоти, це дозволяє керувати швидкістю роботи двигуна шляхом зміни частоти напруги на виході ПЧ, що є великою перевагою, якщо потрібно регулювати швидкість обертання двигуна.[3]

У більшості випадків ЧР використовується лише для запуску та зупинки електродвигуна, незважаючи на те, що швидкість двигуна не потрібно регулювати під час звичайної роботи. Безумовно, це вимагає використання більш дорогого обладнання, ніж це необхідно

Завдяки регулюванню частоти номінальний крутний момент можна досягти на низькій швидкості, при цьому пусковий струм становить 1–1,5 від номінального струму двигуна. Іншою корисною функцією є м'яка зупинка, яка, наприклад, необхідна для зупинки насосів, коли при звичайній зупинці може виникнути проблема гідроудару в трубопроводі. Функція м'якої зупинки також корисна при зупинці стрічкових конвеєрів під час

транспортування крихких матеріалів, які можуть бути пошкоджені при різкій зупинці стрічки.

Як правило, разом із перетворювачем частоти встановлюються фільтри, щоб зменшити рівень випромінювання та генерованих гармонік.

Пуск із використанням пристрою плавного пуску (софтстартера)

Для низки технологічних агрегатів критично важливим є забезпечення плавного наростання електромагнітного моменту двигуна під час розгону або його контрольоване зниження при зупинці. Для вирішення цієї задачі доцільно застосовувати спеціалізовані пускові пристрої, які мінімізують динамічні кидки струму й моменту, знижуючи тим самим збурення в живильній мережі та механічні навантаження на елементи привода. Одним із таких ефективних рішень є пристрій плавного пуску (ППП).

Експлуатаційні характеристики ППП суттєво відрізняються від показників інших методів пуску. Силова схема цього пристрою базується на тиристорних модулях, увімкнених в основний контур живлення, а регулювання напруги на обмотках статора здійснюється за допомогою мікропроцесорної системи керування. В основу функціонування ППП покладено принцип прямої залежності: за зниженої діючої вартості напруги на статорі двигуна пусковий струм і розвинений електромагнітний момент також пропорційно зменшуються.

На початковій стадії пуску на двигун подається мінімальна напруга, величина якої є достатньою лише для компенсації зазорів у редукторах або попереднього натягу приводних пасів чи ланцюгів. Це дозволяє повністю усунути ударні динамічні зусилля (ривки) в кінематичних передачах на початку руху.

Суттєвою перевагою даного методу є можливість точного формування механічної характеристики та регулювання моменту незалежно від поточного навантаження на валу. За потреби система дозволяє досягти повного пускового моменту, проте головною відмінністю залишається мінімізація

динамічних ударів у приводному механізмі, що в результаті зменшує експлуатаційні витрати на технічне обслуговування та ремонт обладнання.

Важливою функцією софтстартера є також режим плавного уповільнення (м'якої зупинки). Цей режим є незамінним для насосних та вентиляторних установок, оскільки у разі використання прямого пуску або схеми «зірка-трикутник» раптова зупинка приводного двигуна призводить до виникнення небезпечних гідравлічних ударів у трубопровідних системах та підвищеного зносу пожежних й технологічних магістралей.

1.4 Тиристорний способів регулювання кутової швидкості вала насоса

Сучасний стан розвитку силової електроніки характеризується наявністю великої кількості різноманітних схем увімкнення тиристорів, які дозволяють здійснювати комутацію статорних кіл асинхронного двигуна (АД) та регулювати величину підведеної до нього напруги [4]. Вибір топології силової частини асинхронного електроприводу з тиристорним керуванням є принциповим етапом проектування. Саме структура головних кіл визначає функціональну здатність системи реалізовувати необхідні режими роботи, а також формує її регулювальні та техніко-економічні показники. Ці фактори є вирішальними під час визначення галузі застосування таких електроприводів та обґрунтування доцільності їхнього промислового впровадження. У зв'язку з цим, під час порівняльного аналізу різних схем напівпровідникових перетворювачів напруги необхідно враховувати низку критеріїв, найважливішими з яких є такі:

 Ступінь керованості асинхронного двигуна (можливість реалізації режимів пуску-гальмування: обертання в одному або двох напрямках, реверс, динамічне гальмування та гальмування противключенням, кероване формування перехідних процесів; можливість регулювання швидкості);

- Кількість силових напівпровідникових елементів, що входять до схеми тиристорного керування, та умови їхньої роботи (струми, що

протікають через напівпровідниковий прилад; прямі та зворотні напруги, що виникають під час роботи);

- Можливість роботи при різних схемах з'єднання обмоток статора (зірка з нульовим проводом і без нього, трикутник);

- Простота реалізації різних режимів (отримання їх без додаткових силових комутуючих апаратів; відсутність спеціальних вимог до системи керування вентилями та застосування аналогічних схем для регулювання кожного з тиристорів);

- Гармонічний склад напруги, прикладеної до АД (форма механічних характеристик, межі та можливості регулювання швидкості, енергетичні показники);

У даному випадку така структура регулятора напруги має певні переваги і використовується в установках, що не потребує великого числа регулювань (насоси, вентилятори), але вимагають безударного запуску. Як згадано вище, прямий пуск може знизити напругу, особисто в потужних асинхронних двигунах, створити ударний струм у мережі, негативно вплинути на роботу інших споживачів енергії та призвести до аварій. У порівнянні з ЧЗ тиристорний перетворювач може забезпечити ефективний плавний пуск двигуна, менші габаритні розміри та значно знижену вартість. Капітальні витрати на використання пристрою плавного пуску для автоматизації не високі, ніж при використанні перетворювача частоти.

Для регулювання напруги на статорних обмотках АД найчастіше застосовують тиристорні регулятори напруги (ТРН), які характеризуються високою експлуатаційною надійністю, простотою обслуговування, високим коефіцієнтом корисної дії (ККД), значною швидкодією та відносно низькою капіталомісткістю. Варіант трифазної топології ТРН для керування напругою на статорі АД, сформований на основі базових однофазних схемних рішень, наведено на рисунку 1.2 (а).

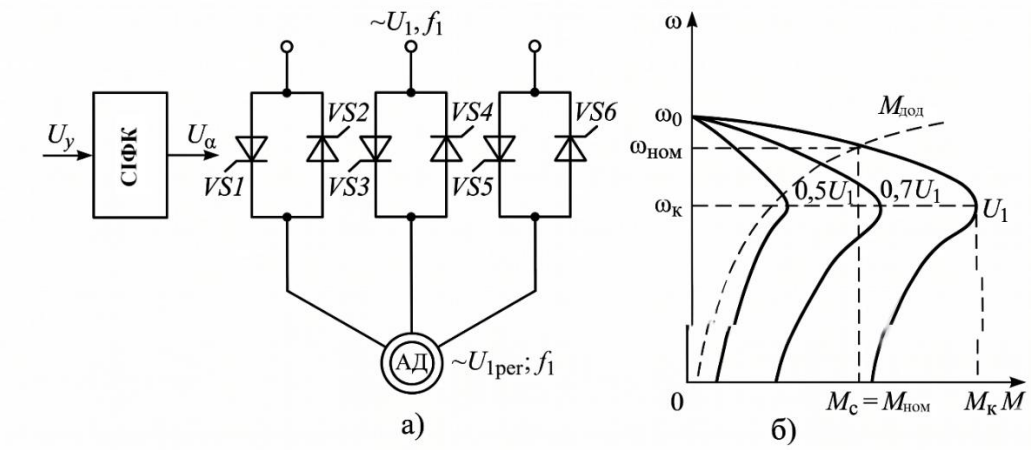

Рисунок 1.2 – Система тиристорного регулятора напруги АД: а – функціональна трифазна схема; б – механічні характеристики

Силова частина тиристорного регулятора напруги містить три пари зустрічно-паралельно з'єднаних тиристорів (VS1 … VS6), увімкнених між відповідними фазами живильної мережі та виводами статора двигуна. Інтеграція двох тиристорів у кожну фазу ТРН за зустрічно-паралельною схемою забезпечує протікання змінного струму в колі навантаження протягом обох напівперіодів мережевої напруги U_1. Комутація тиристорів здійснюється шляхом подачі керуючих імпульсів від системи імпульсно-фазового керування (СІФК), яка забезпечує їхній зсув на кут керування α залежно від величини сигналу завдання (напруги керування) U_y. Зміною кута регулювання α в діапазоні від 0º до 180º забезпечується плавнє варіювання діючого значення фазної напруги на статорі від повного номінального значення U_1 до нуля.

На рисунку 1.2 (б) наведено сімейство механічних характеристик АД за різних рівнів напруги статора. Зі зниженням амплітуди підведеної напруги синхронна кутова швидкість ідеального холостого ходу ω_0 та критичне ковзання s_k залишаються незмінними, проте суттєво зменшується значення критичного (максимального) електромагнітного моменту M_k. Дана залежність обумовлена тим, що розвинений критичний момент асинхронної

машини є прямо пропорційним квадрату діючого значення напруги живлення:

$$M_k \sim U_1^2$$

Відповідно, зниження напруги живлення призводить до інтенсивного спаду максимального моменту та суттєвого погіршення перевантажувальної здатності АД. Аналізуючи форму штучних характеристик, представлених на рисунку 1.2 (б), можна зробити висновок, що якщо критичне ковзання S_k велике, то зміну напруги можна використовувати для регулювання швидкості в невеликих межах. Однак зі зменшенням частоти обертання зростає ковзання s, а отже, і втрати [6].

У порівнянні з ПЧ тиристорний регулятор напруги має низку переваг

- можливість працювати в більш суворих погодних умовах;
- простота конструкції;
- порівняно нескладні алгоритми керування;
- простота обслуговування;
- вартість ТРН у рази менша, при цьому зі збільшенням потужності електроприводу різниця у вартості зростає.

Висновки до розділу

На основі аналізу конструкцій відцентрових насосів, що працюють у тривалому режимі з вентиляторним характером навантаження, показано доцільність застосування асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Порівняльна оцінка пускових систем показала, що для усунення недоліків прямого пуску за обмежених капіталовкладень оптимальним є використання трифазного тиристорного регулятора напруги, який завдяки фазовому керуванню забезпечує плавне формування моменту, безперервний захист і безударний пуск гідравлічного комплексу.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1. Розрахунок потужності двигуна та його попередній вибір

Для проведення необхідних розрахунків в таблиці 2.1 наведено вхідні дані до проекту.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані

Продуктивність, $Q_{НА}$, м/с^2	Напір, Н, м	Швидкість обертання вала, n, об/хв	ККД насоса, $\eta_{НА}$	ККД передачі, $\eta_{П}$	Густина перекачуваної рідини, ρ, кг/м^3
0,0075	25	2835	0,75	1	1000

Потужність двигуна визначається як:

$$P_p = K_З \frac{g \cdot Q \cdot H \cdot \rho}{\eta_{НА} \cdot \eta_{П}} \cdot 10^{-3} = 1.2 \cdot \frac{9.81 \cdot 0.0075 \cdot 25 \cdot 1000}{0.75 \cdot 1} \cdot 10^{-3} = 2.943 \text{ кВт}$$

де Кз — коефіцієнт запасу [у межах (1,1–1,3)].

Вибираємо двигун RA100L2 [3] з параметрами, наведеними в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 — Параметри двигуна

		При номінальному завантажені							
Тип двигуна	$P_Н$, кВт	$n_Н$, об/хв	η .%	$\cos\varphi$ %	M_{max} / M_{min}	$M_П / M_Н$	$M_{min} / M_Н$	$I_П / I_Н$	J, кг·м^2
RA100L2	2	2835	82	86	3,2	2,9	1	8,6	0,0032

На рисунку 2.1 показано загальний вигляд електродвигуна серії RA.

Рисунок 2.1 – Загальний вигляд електродвигуна RA100L2

З огляду на потужність цього двигуна обираємо горизонтальний багатоступеневий насос Calpeda MXH 1604

Насос MXH 1604 має компактну та міцну конструкцію, без виступаючих фланців та з монолітним з'єднанням між насосом і двигуном з опорними ніжками. Може використовуватися в комунальному господарстві як для холодного та і для гарячого водопостачання, у виробничих процесах, для перекачування хімічних рідин, що не є агресивними щодо хромонікелевої сталі 1.4301 EN 10088 (AISI 304). Параметри насоса наведені в таблиці 2.3. На рисунку 2.2 представлено загальний вигляд горизонтального насоса MXH 1604.

Рисунок 2.2 – Загальний вигляд горизонтального насоса CALPEDA MXH 1604

Таблиця 2.3 – Параметри насоса

Виробник	CALPEDA
Максимальна подача, м/год	25
Сфера застосування	Для перекачування чистої води та інших неагресивних рідин у промисловості та комунальному господарстві
Потужність, кВт	3
Умовний діаметр, мм	50,8/12,7
Матеріал корпусу	хромонікелевої сталі AISI 304
Діапазон температури робочого середовища	-15℃ ÷ 90℃
Напруга живлення, В	3x380
Спосіб приєднання	монолітне з'єднання
Маса, кг	33,8
Максимальна швидкість обертання, об/хв	3000

2.2. Розрахунок і вибір основних силових елементів регульованого електроприводу

Тиристор — напівпровідниковий прилад, виготовлений на основі монокристала напівпровідника з трьома або більше p-n-переходами, що має два стабільні стани (закритий - стан низької провідності та відкритий - стан високої провідності), який використовується для комутації в ланцюгах змінного струму. В електроніці часто розглядається як електронний вимикач (ключ) [5].

Методика вибору тиристорів для силової схеми тиристорного регулятора напруги базується на розрахункових максимальних значеннях струмів, а також амплітудних значеннях прямих і зворотних напруг, що виникають у динамічних та усталених режимах роботи електроприводу.

Під час з'єднання обмоток статора у зірку до тиристорів прикладається лінійна напруга з наведеною нижче амплітудою:

$$U_{\max} = K_C K_П \sqrt{2} U_c = 1.1 \cdot 1.5 \cdot \sqrt{2} \cdot 380 = 886.7 \text{ В}.$$

де K_C - коефіцієнт врахування можливого перевищення напруги (K_C=1,1); $K_П$, Кп - максимальне значення перенапруги ($K_П$=1,5).

Однак зворотна прикладена напруга через вплив ЕРС, що наводиться затухаючим полем ротора, дорівнюватиме $K_C K_П \sqrt{2} U_c$. З урахуванням цього фактора, можна вважати, що тиристори 8-го та 9-го класу забезпечать нормальну роботу електроприводу при з'єднанні статора як зіркою (380 В), так і в трикутник (220 В).

У загальному випадку тиристори слід вибирати за максимальним значенням струму двигуна. Тиристори повинні витримувати пусковий струм:

$$I_n = \frac{n \cdot P}{U_c} = \frac{8.6 \cdot 3000}{380} = 67.9, \text{ А}$$

де, n – кратність пускового струму;

P – потужність на валу електродвигуна (Вт);

U_c – напруга мережі (В).

У трифазній мостовій схемі ефективне значення основного струму, що протікає через тиристор:

$$I_m = \frac{I_n}{3} = \frac{37.9}{3} = 22.6, \text{ А}$$

Надійна та тривала робота тиристорного електроприводу в більшості випадків залежить від правильного вибору тих чи інших тиристорів. Коли тиристори обирають за струмом, у цьому випадку велике значення має спосіб безпосереднього охолодження та величина кута провідності.

Для реалізації силової схеми обрано швидкодіючий тиристор штирового виконання типу ТБ151-50 (16-й клас за періодичною імпульсною напругою в закритому стані та зворотною напругою). Даний напівпровідниковий прилад призначений для інтеграції в статичні перетворювачі електроенергії та силові установки постійного й змінного струму, що вимагають мінімального часу ввімкнення та вимкнення, а також високих критичних швидкостей наростання напруги в закритому стані і

струму у відкритому стані. Зазначений тип тиристора виготовляється в герметичному металокерамічному корпусі з гнучким силовим виводом. Основні технічні параметри вибраного тиристора наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Параметри тиристора ТБ151-50

Тип	ТБ151-50	I_{gt}, мА	120
$U_{drm}(U_{rrm})$, В	500-1200	du/dt, В/мкс	200-1000
$I_{rrm}(I_{drm})$, мА	20	t_q, мкс	16
$I_{t(av)}(T_c)$, мА	50(85)	di/dt мкс	400
$I_{tsm}10ms$, кА	1,00	$T_{\max}$, ºС	125
U_{tm}/I_{tm}, В/А	2,50/160	R_{thic} ºС/W	0,32
U_{gt}, В	2,5	Вага, кг	0,150

$I_n \geq I_m$ - умова виконується

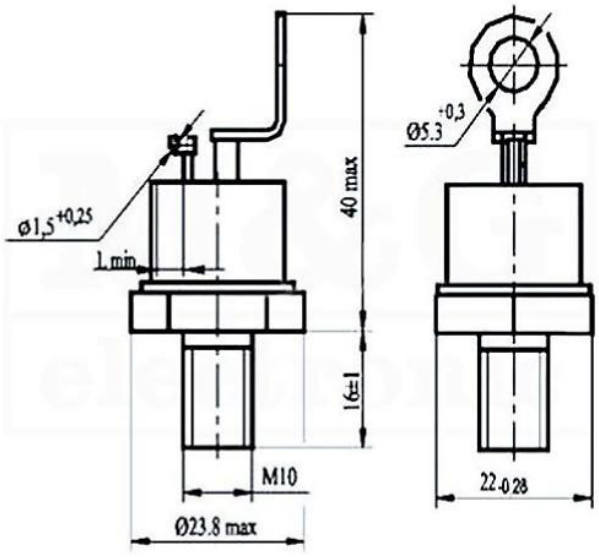

Рисунок 2.3 – Габаритна схема тиристора ТБ151

2.3. Тепловий розрахунок і вибір радіатора

Здійснимо вибір і розрахунок охолоджувальних радіаторів для силових тиристорів.

Завдяки різниці температур між розігрітим кристалом і навколишнім середовищем теплова енергія рухається від кристала безпосередньо до корпусу приладу, далі від корпусу безпосередньо надходить до охолоджувача і потім у навколишнє середовище. Такий процес моделюють за допомогою електричної схеми заміщення (рисунок 2.4.) [8]

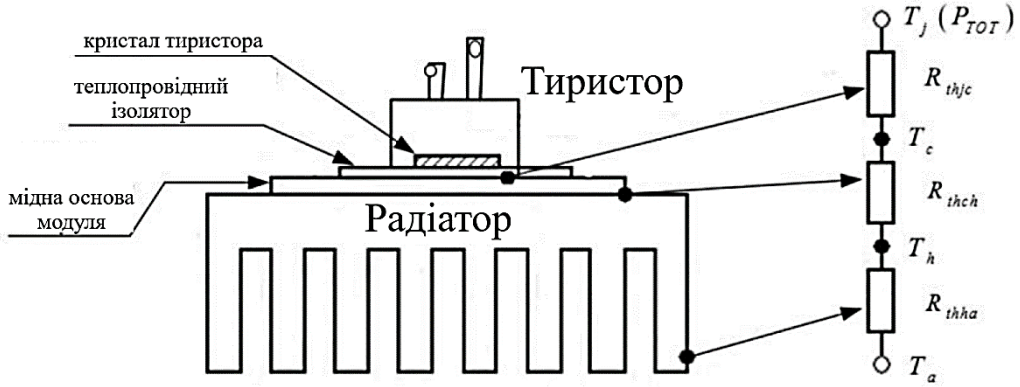

Рисунок 2.4 – Електрична модель, що застосовується для системи охолодження тиристора

Тут втрати в ключовому елементі P_{TOT} еквівалентні струму в електронних ланцюгах, а різниця температур — електричній напрузі. За аналогією із законом Ома для теплової схеми заміщення можна записати таке співвідношення [8]:

$$P_{TOT} = \frac{\Delta T}{R_{in}} \tag{2.1}$$

де, ΔT — різниця температур між характерними точками теплової системи;

R_{in} — тепловий опір, коефіцієнт, що характеризує теплопровідність середовища, яке передає теплову енергію.

Для традиційної системи виділяють три теплові опори:

1. Тепловий опір перехід-корпус – $R_{th(j-c)}$;

2. Тепловий опір корпус-охолоджувач – $R_{th(c-h)}$;

3. Тепловий опір охолоджувач-навколишнє середовище – $R_{th(h-a)}$.

Тепловий опір перехід-корпус $R_{th(j-c)}$ є паспортним параметром.

Тепловий опір корпус-охолоджувач наводиться в довідкових матеріалах, а також часто є паспортними даними.

Максимально можливий перехідний опір охолоджувача – навколишнє середовище обчислюється за наведеною нижче формулою:

$$R_{th(h-a)} \le \frac{T_c - T_a}{P_{TOT}} - R_{th(c-h)} \tag{2.2}$$

де, $T_a = 25$ ºС – температура охолоджувального повітря;

$T_c = 125$ ºС – температура теплопровідної пластини;

$R_{th(c-h)} = 1.14$ ºС/Вт– тепловий опір корпусу – охолоджувач

$$\begin{aligned} R_{th(h-a)} &\le \frac{125-25}{50} - 1.14 \\ R_{th(h-a)} &\le 0.1 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Тепловий опір «охолоджувач — навколишнє середовище» $R_{th(h-a)}$ залежить від багатьох факторів. Для точкового джерела тепла, розташованого на охолоджувачі, відомо наведене нижче вираження для теплового опору «охолоджувач — навколишнє середовище», яке дорівнює:

$$R_{th(h-a)} \le \frac{3.3}{\sqrt{\lambda \cdot d}} \cdot C_f^{0.25} + \frac{650}{S} \cdot C_f \tag{2.4}$$

де, S - площа пластини (см²);

λ - коефіцієнт теплопровідності охолоджувача, Вт/К·см. Для алюмінію значення коефіцієнта теплопровідності дорівнює λ = 2 Вт/К·см;

C_f - поправочний коефіцієнт, що враховує стан теплоочисних поверхонь та просторову орієнтацію охолоджувального радіатора. Для вертикального розташування за наявності полірованої (блискучої) поверхні значення зазначеного коефіцієнта становить 0,8.

З наведеного вище виразу випливає що, зменшення теплового опору, а отже, і підвищення ефективності охолодження, досягається завдяки

використанню радіаторів, які виготовляються з матеріалів із максимальним коефіцієнтом теплопровідності та мають більшу площу поверхні для охолодження. Визначимо мінімальну площу охолоджувача:

$$S_{\min} = \frac{650 \cdot C_f}{R_{th(h-a)} - \frac{3.3}{\sqrt{\lambda \cdot d}} \cdot C_f^{0.25}} = \frac{650 \cdot 0.8}{0.1 - \frac{3.3}{\sqrt{2 \cdot 0.4}} \cdot 0.8^{0.25}} = 150, \text{ см}^2 \qquad (2.5)$$

Вибираємо радіатор О232. Номер обраного радіатора можна знайти за формулою:

$$S = n \cdot S_1 \qquad (2.6)$$

де n – кількість ребер;

S_1 – площа одного ребра, тоді:

$$S = 10 \cdot 20 = 200, \text{ см}^2$$

Отже, $S > S_{\min}$, а отже, охолоджувачі О232 підходять для охолодження обраних тиристорів. Габаритні розміри та технічні характеристики охолоджувача О232 приведено на рисунку 2.5 та у таблиці 2.5 відповідно.

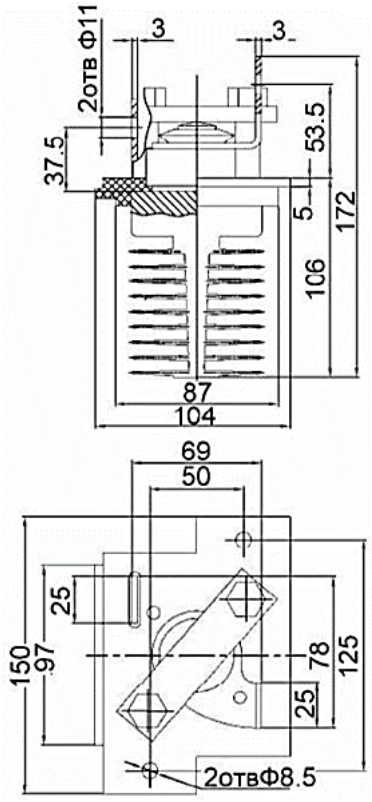

Рисунок 2.5 – Габаритні розміри охолоджувача О232

Таблиця 2.5 – Технічні характеристики охолоджувача О232

Тип	Габаритні розміри a·b·h	Діаметр різьбового отвору	Маса (без струмовідводу)	Розсіювана потужність при природному охолодженні	Тепловий опір	Перепад тиску
О232	70х80х172, мм	42, мм	1,6, кг	80 Вт	0,355, гр/Вт	18, Па

2.4. Вибір апаратури управління та захисту

Управління АД полягає в його запуску, зупинці, реверсуванні; воно може здійснюватися як вручну на місці, так і дистанційно (за допомогою вимикачів або кнопок), а також автоматично. Управління низьковольтними двигунами (до 1000 В), зокрема, при частих увімкненнях або вимкненнях, зазвичай здійснюється магнітним пускачем або контактором. Магнітний пускач відрізняється від контактора завдяки наявності пристрою від перевантажень на валу двигуна [6].

Магнітні пускачі та контактори не захищають асинхронний двигун від струмів короткого замикання, тому асинхронні двигуни підключаються до джерела живлення через автоматичні вимикачі або плавкі запобіжники, які виконують функцію безпосереднього захисту.

Магнітні пускачі виготовляють нереверсивними та реверсивними. Пускачі серії ПМЕ призначені для керування двигунами потужністю від 1 до 10 кВт, а ПАЕ – від 17 до 55 кВт. Вони розраховані на напругу до 500 В. Схема підключення нереверсивного пускача показано на рисунку 2.6.

Головні контакти котушки К підключаються до розгалуження проводів, які живлять АД. До проводів двох фаз підключаються нагрівальні елементи теплових реле ТР1 і ТР2.

Пускач К через кнопки керування та теплових реле ТР1-1, ТР2-1 підключається до мережі.

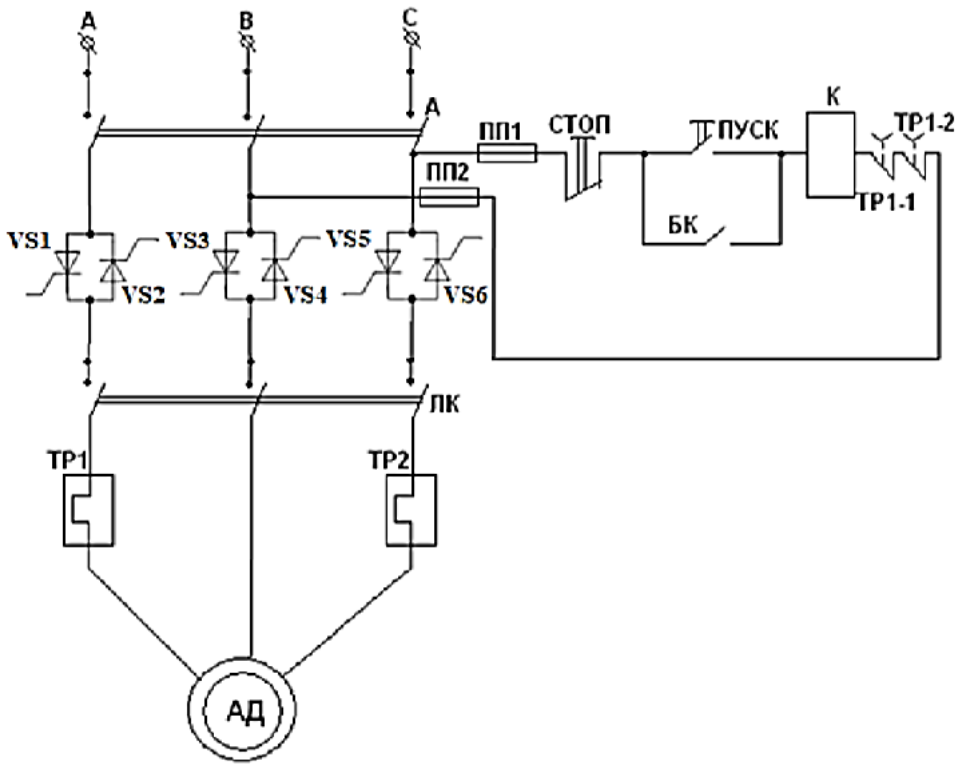

Рисунок 2.6 – Схема підключення нереверсивного пускача

Натисканням кнопки «Пуск» напруга подається на котушку К завдяки замкнутим контактам кнопки «Стоп» та замкнутим контактам ТР11 і ТР2-1 теплових реле. Після притягнення якоря електромагніту відбувається замикання лінійних контактів ЛК (відбувається запуск асинхронного двигуна) і блокувального контакту БК, який шунтує контакти кнопки «Пуск», що дозволяє відпустити пускову кнопку. Для того, щоб відключити пускач, необхідно натиснути кнопку «Стоп». При цьому відбувається розрив ланцюга котушки К і подальше відключення лінійних контактів, блокувального контакту пускача та асинхронного двигуна. У режимі навантаження двигуна, що перевищує допустиме, спрацьовують теплові реле, які розмикають коло живлення котушки контактора К, що призводить до автоматичного відключення електроприводу від мережі. Автоматичний вимикач А виконує автоматичний захист під час виникнення короткого замикання в асинхронному двигуні або трипровідній лінії за автоматом.

Плавкі запобіжники ПП дозволяють забезпечити захист у ланцюзі керування при перевантаженні.

Параметри магнітного пускач типу ПМЕ-211, наведеними в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Параметри магнітного пускача

Номінальний струм (А) при напрузі 380	Струм (А) при напрузі 380 В	Відстань між головними контактами пускача, мм	Пускова потужність споживана обмоткою, ВА	Номінальна потужність обмотки, ВА	Маса, кг
25	25	3,5	800	26	7,6

Вибір автоматичного вимикача.

Для силових одиночних електроприймачів повинні виконуватися такі умови:

$$I_{розц} \geq I_{тс}, I_{тс} \geq I_{н.АД} = 22,6, \text{ А}$$

де, $I_{тс}$ – тривалий струм.

$$I_{кз} \geq 1,25 \cdot I_{кр} = 1,25 \cdot I_{кр} = 1,25 \cdot 67,9 = 84,9, \text{ А}$$

де $I_{кр} = I_{п} = 67.9$, А– пусковий струм;

$I_{кз}$ – струм короткого замикання.

Як автомат захисту вибираємо автоматичний вимикач типу ВА51-31 з $I_{ном}$ = 250 А , $I_{н.розч.}$ = 80 А

Тоді струм $I_{кз}$ дорівнює:

$$I_{кз} = 7 \cdot I_{н.розч} = 7 \cdot 80 = 560, \text{ А}.$$

Вибір плавких запобіжників.

Вибираємо плавкі запобіжники з урахуванням таких умов:

$$I_{ПС} \geq I_{н.ЕД} \qquad (2.7)$$

Вибираємо запобіжник типу ПН2-250 [8] з параметрами, наведеними в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Параметри запобіжника ПН-250

Тип	$I_{ном}, A$	
	запобіжник	плавка вставка
ПН2	250	80

Так як номінальний струм двигуна становить:

$$I_H = 22.6 \text{ А},$$

а величина пускового струму двигуна рівна:

$$I_{пуск} = 84.9 \text{ А}.$$

Вибираємо запобіжник за максимальним струмом:

$$I_{ПС} \geq I_H \tag{2.8}$$

де $I_{ПС}$ - струм плавкої вставки

$$I_{ПС} \geq \frac{I_{пуск}}{\alpha} = \frac{84.9}{2.5} = 33.96 \text{ А},$$

де α = 2,5 – для легкого пуску [3].

Вибираємо ПН2-100 [8] з $I_{ПС} = 50 \text{А}$.

2.5 Розрахунок і вибір типу перерізу кабелю

Проведемо розрахунок перерізу кабелю для мережі високої напруги

Вибираємо провід за найбільшим струмом:

$$I_{ВН} \geq \frac{I_{ном}}{k_{прок}} = \frac{22.6}{1} = 22.6 \text{ А};$$

$$I_{ВН} \geq k_3 \frac{I_{ПС}}{k_{прк}} = 1\frac{33.96}{1} = 33.96 \text{ А}.$$

де, k_3 – коефіцієнт захисту;

$k_3 = 1$ – для мереж, що потребують захисту від перевантаження;

$k_{прк}$ – поправочний коефіцієнт, що залежить від кількості паралельно прокладених кабелів; для одного кабелю $k_{прк} = 1$.

Вибираємо кабель марки ВВГ перерізом 10 мм² з Ідоп = 42 А.

Розрахунок і вибір типу перерізу кабелю для допоміжної напруги

У пункті 2.4 обрано запобіжник ПН2-250 з $I_{ПС} = 80$ А. Вибір приводу здійснюється за найбільшим струмом. Струм розраховується за формулою:

$$I_{ДН} \geq \frac{I_{ном}}{k_{прок}} = \frac{22.6}{1} = 22.6 \text{ А};$$

$$I_{ДН} \geq k_3 \frac{I_{ПС}}{k_{прк}} = 1\frac{80}{1} = 80 \text{ А}.$$

Вибираємо кабель марки ВВГ перерізом 17 мм² з Ідоп = 90 А

2.6 Визначення параметрів Т-подібної схеми заміщення

Визначити параметри Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна RA100L2 з такими каталожними даними таблиця 2.8:

Таблиця 2.8 – Характеристики АД RA100L2

Найменування параметра	Позначення	Значення
Номінальна потужність двигуна	P_H	3 кВт
Номінальна фазна напруга	U_{1H}	220 В
Номінальна частота обертання	n_H	2835 об/хв
Номінальна напруга мережі	$U_{фн}$	380 В
Кількість пар полюсів	p	1
Коефіцієнт потужності у режимі номінальної потужності	$\cos\varphi$	0,86 в.о.
Кратність пускового моменту	k_n	2,9 в.о.
Кратність пускового струму	k_i	0,86 в.о.
Кратність максимального моменту	$k_{\max}$	3,2 в.о.
Коефіцієнт навантаження двигуна	p_h	0,75 в.о.
ККД у режимі номінальної потужності	η_H	0,82 в.о.

Для розрахунку та аналізу характеристик АД доцільно використовувати його математичну модель, базою для якої є схеми заміщення. Найбільш поширеною є класична Т-подібна схема заміщення, показана на рисунок 2.7.

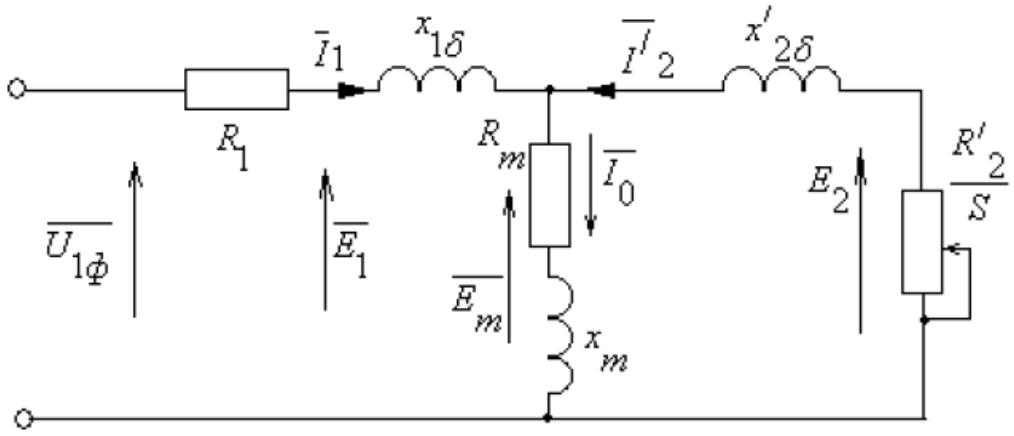

Рисунок 2.7 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Зв’язок між векторами струмів, напруг та електрорушійних сил (ЕРС) ілюструє векторна діаграма, наведена на рисунку 2.8.

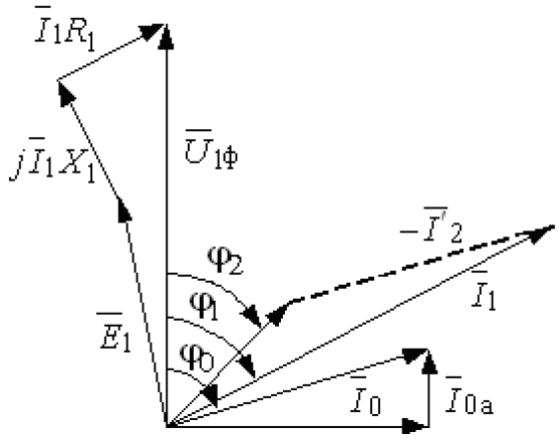

Рисунок 2.8 – Векторна діаграма асинхронного двигуна

Електромагнітний стан схеми описується такою системою основних рівнянь асинхронного двигуна:

$$\bar{U}_{1\phi} - \bar{E}_m - jX_1\bar{I}_1 - R_1\bar{I}_1 = 0; \quad (2.9)$$

$$\bar{E}_m + jX'_2\bar{I}'_2 + R'_2\bar{I}'_2 / s = 0; \quad (2.10)$$

$$\bar{I}_1 + \bar{I}'_2 - \bar{I}_0 = 0. \quad (2.11)$$

Знайдемо синхронну частоту обертання та номінальне ковзання:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} 3000 \text{ рад/с}$$

$$s_n = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{3000 - 2835}{3000} = 0.055 \text{ в.о.}$$

Струм холостого ходу АД можна виразити як:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left(p_h \cdot I_{1H} \frac{1 - s_n}{1 - s_n \cdot p_h} \right)^2}{1 - \left(p_h \cdot \frac{1 - s_n}{1 - s_n \cdot p_h} \right)^2}}, \quad (2.12)$$

де $I_{11} = \frac{p_h \cdot P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos\varphi_{чз} \cdot \eta_{чз}} = \frac{0.75 \cdot 3000}{3 \cdot 220 \cdot 0.799 \cdot 0.82} = 5.202$ А — сила струму статора при неповному навантаженні;

$\eta_{чз} = \eta_H = 0.82$ – ККД за часткового завантаження, в.о.;

$\cos\varphi_{чз} = \cos\varphi \left(\frac{\cos\varphi_{0.75}}{\cos\varphi} \right) = 0.86 \cdot 0.929 = 0.799$ – коефіцієнт потужності;

$\cos\varphi_{0.75} / \cos\varphi = 0.929$ - відносний коефіцієнт потужності (з графіка на рисунку 2.9).

$I_{1H} = \frac{P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos\varphi \cdot \eta_H} = \frac{3000}{3 \cdot 220 \cdot 0.86 \cdot 0.82} = 6.446$ А- номінальний струм статора АД.

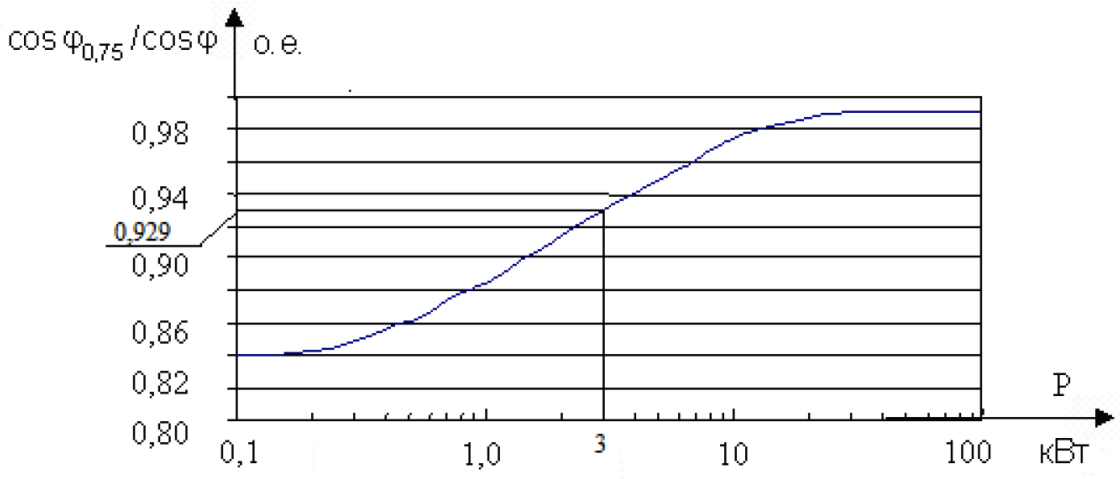

Рисунок 2.9 – Залежність $\cos\varphi_{0.75}/\cos\varphi$ від потужності асинхронного двигуна

На основі графічних даних остаточно визначається струм холостого ходу двигуна:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left(p_h \cdot I_{1H}\dfrac{1-s_n}{1-s_n\cdot p_h}\right)^2}{1-\left(p_h\cdot\dfrac{1-s_n}{1-s_n\cdot p_h}\right)^2}} = \sqrt{\frac{5.202^2 - \left(0.75\cdot 6.446\dfrac{1-0.055}{1-0.055\cdot 0.75}\right)^2}{1-\left(0.75\cdot\dfrac{1-0.055}{1-0.055\cdot 0.75}\right)^2}} = 3.098,$$

Із уточненої формули Клосса визначимо аналітичне співвідношення для розрахунку критичного ковзання (у першому наближенні приймаємо $\beta = 1$):

$$s_k = s_H \frac{k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - [1 - 2\cdot s_H\cdot\beta(k_{\max}-1)]}}{1 - 2\cdot s_H\cdot\beta(k_{\max}-1)} =$$

$$= 0.55\frac{3.2 + \sqrt{3.2^2 - [1 - 2\cdot 0.055\cdot 1(3.2-1)]}}{1 - 2\cdot 0.055\cdot 1(3.2-1)} = 0.45 \text{ в.о.}$$

Знайдемо значення коефіцієнтів:

$$C_1 = 1 + \left(\frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} \right) = 1 + \left(\frac{3.098}{2 \cdot 6.5 \cdot 6.446} \right) = 1.037;$$

$$A_1 = m \cdot U_{1H}^2 \frac{1 - s_H}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_H} = 3 \cdot 220^2 \frac{1 - 0.055}{2 \cdot 1.037 \cdot 3.2 \cdot 3000} = 6.892.$$

Після цього визначається приведений опір обмотки ротора:

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_k} \right) \cdot C_1} = \frac{6.892}{\left(1 + \frac{1}{0.456} \right) \cdot 1.037} = 2.08 \text{ Ом.}$$

Визначимо опір обмотки статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1.037 \cdot 2.08 \cdot 1 = 1.157 \text{ Ом.}$$

Для знаходження індуктивного опору в режимі короткого замикання знайдемо проміжний параметр γ:

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_k^2} \right) - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0.456^2} \right) - 1^2} = 1.956.$$

Індуктивний опор короткого замикання рівний

$$x_{кз} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 1.954 \cdot 1.037 \cdot 2.08 = 4.215 \text{ Ом.}$$

Припускаючи рівність частотних характеристик розсіювання, знайдемо приведений індуктивний опір ротора та індуктивний опір статора::

$$x_{2H}' = 0.58 \frac{x_{кз}}{C_1} = 0.58 \frac{4.215}{1.037} = 2.357 \text{ Ом.}$$

$$x_{1H} = 0.42 \cdot x_{кз} = 0.42 \cdot 4.215 = 1.77 \text{ Ом.}$$

За уточненими значеннями C_1, $x_{кз}$ та R_2' проводиться перевірочний розрахунок критичного ковзання:

$$s_{k1} = \frac{C_1 \cdot R_2'}{\sqrt{R_1^2 + x_{кз}^2}} = \frac{1.037 \cdot 2.08}{\sqrt{2.157^2 + 4.215^2}} = 0.456 \text{ в.о.}$$

Отримані значення s_{k1} та s_k за обома методиками є рівними.

Щоб знайти ЕРС гілки намагнічування, E_1 знайдемо $\sin\varphi$

$$\varphi = \arccos(\cos\varphi) = \arccos(0.86) = 0.536;$$
$$\sin\varphi = 0.51.$$

Для знаходження ЕРС намагнічування E_1, індукується основним магнітним потоком у повітряному зазорі машини в номінальному режимі, виконується за формулою:

$$E_1 = \sqrt{(U_{1h} \cdot \cos\varphi - R_1 \cdot I_{1H})^2 + (U_{1h} \cdot \sin\varphi - x_{1H} \cdot I_{1H})^2} =$$

$$= \sqrt{(220 \cdot 0.86 - 2.157 \cdot 6.446)^2 + (220 \cdot 0.51 - 1.77 \cdot 6.446)^2} == 202.238 \text{ В}.$$

Звідси індуктивний опір головного магнітного контуру (намагнічування) становить:

$$x_{\mu_H} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{202.238}{3.098} = 65.272 \text{ Ом}.$$

Зведемо розраховані значення попрів в таблицю 2.8.

Таблиця 2.8 – Параметри схеми заміщення електродвигуна

R_1, Ом	x_{1H}, Ом	$x_{\mu H}$, Ом	R_2', Ом	x_{2H}', Ом	$x_{кз}$, Ом
2,157	1,77	65, 272	2,08	2,357	4,215

2.7 Штучні механічні та електромеханічні характеристики

Завданнями даного розділу є аналітичний розрахунок і графічна побудова сімейства електромеханічних та механічних характеристик розімкнутої системи «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун» (ТРН–АД) за різних рівнів підведеної напруги, а також аналіз результатів моделювання.

Для дослідження статичних властивостей розімкнутої системи «ТРН–АД» виконано розрахунок електромеханічних та механічних характеристик для таких фіксованих значень діючої напруги статора: 1,0, 0,8 0,5, 0,25 0,2. Для коректного моделювання сумісної роботи електропривода та гідравлічної машини задамо аналітичну функцію навантаження на валу. Відповідно до вимог технічного завдання, статичний момент опору насосної установки описується такою залежністю:

$$M_{о.м.} = M_0 + a \cdot \omega^3, \qquad (2.13)$$

де $M_0 = 0.1 \cdot M_{хол}$ – момент холостого ходу ВН

Момент відцентрового насоса за номінальної частоти двигуна:

$$M_{ном} = 0.75 \text{ Н} \cdot м.$$

Номінальний крутний момент двигуна:

$$M_{ном.АД} = 10.105 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Тоді момент холостого ходу відцентрового насоса дорівнює:

$$M_0 = 0.75 \cdot 10.105 = 1,0105 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

А момент відцентрового насоса:

$$M_{ном.ВЦ} = 0.75 \cdot 10.105 = 7.57857 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Припустимо, що при частоті $f_{1Н}$=50 Гц навантаження перетне точку номінального режиму АД.

Визначимо коефіцієнт a :

$$a = \frac{M_{ном.ВЦ} - M_0}{\omega^3} = \frac{7.57857 - 1.0105}{296.881^3} = 2.51017 \cdot 10^{-7}$$

Навантаження відцентрового насоса описується функцією:

$$M_{нав.ВЦ} = 1.0105 + 2.51017 \cdot 10^{-7} \cdot \omega^3$$

Механічні характеристики АД можна побудувати за виразом:

$$M(\omega) = \frac{3 \cdot U_{1Н}^3 \cdot R_2'}{-s_Н \omega_0 \left[\left(R_1 - \frac{R_2'}{s_Н} \right)^2 + x_{кз}^2 \right]} \qquad (2.14)$$

На основі отриманої аналітичної залежності виконано графічну побудову сімейства штучних механічних АД та статичної характеристики насосної установки (рисунок 2.10).

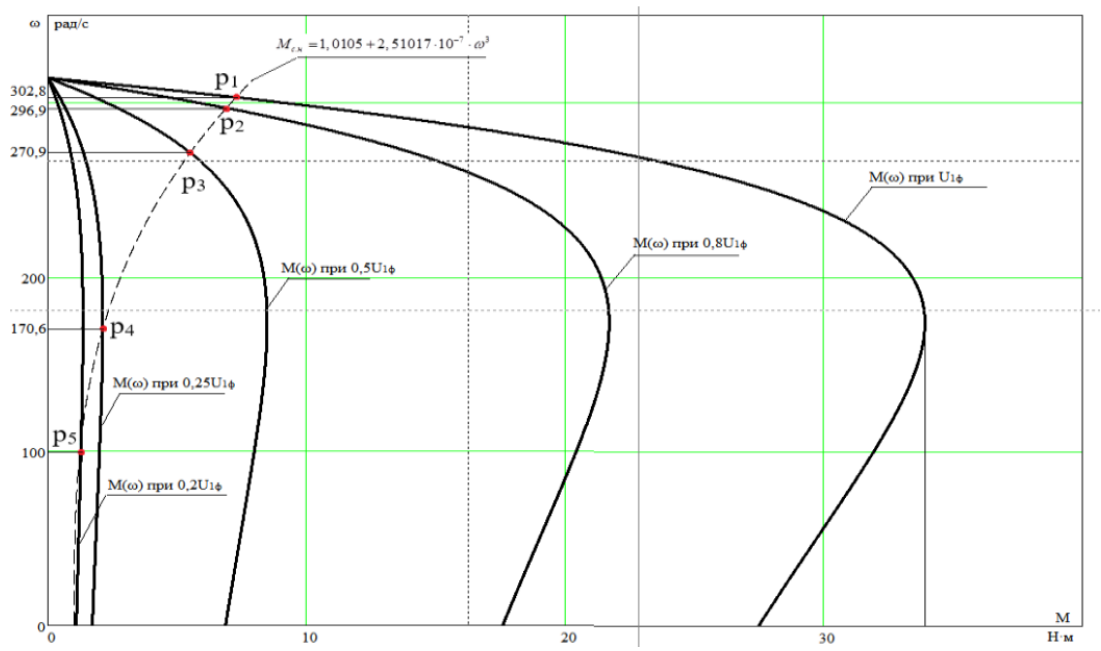

Рисунок 2.10 – Механічні характеристики при діючому значенні напруги, рівному: 1; 0,8; 0,5; 0,25; 0,2 від номінального.

Визначимо координати точок перетину механічних характеристик асинхронного двигуна та статичного навантаження, які відповідають усталеним значенням частоти обертання ротора:

1. $\omega_{p1} = 302{,}8$ рад/с;
2. $\omega_{p2} = 296.9$ рад/с;
3. $\omega_{p3} = 270.9$ рад/с;
4. $\omega_{p4} = 170.6$ рад/с;
5. $\omega_{p5} = 100$ рад/с;

Точки, які відповідають значенням швидкості p1, p2, p3, p4, p5, можуть відповідати стійкій або нестійкій рівновазі.

Критерієм статичної стійкості роботи системи електроприводу в зоні технологічного перетину характеристик є виконання умови такої диференціальної нерівності:

$$k_\beta - k_{\beta c} < 0, \qquad (2.15)$$

де, $k_\beta = \dfrac{dM(\omega)}{d\omega}$ - коефіцієнт жорсткості механічних характеристик АД;

$k_{\beta c} = \dfrac{dMc(\omega)}{d\omega}$ - коефіцієнт жорсткості механічних характеристик насоса.

Виникає питання щодо стійкості роботи електроприводу в точках р4, р5. Для перевірки стійкості побудуємо графіки залежності жорсткості механічних характеристик двигуна та насоса від швидкості.

Результати розрахунків k_β та $k_{\beta c}$, а також їхня різниця, розраховані для напруги статора $0.2U_{1\phi}$, наведено на рисунку 2.11.

Аналіз графічних залежностей свідчить про те, що критерій статичної стійкості електроприводу виконується в околі робочої кутової швидкості ωр5. Таким чином обертання відцентрового насоса для швидкості ωр5 - стійке.

Електромеханічна характеристика струму статора та ротора за діючого значенні напруги, рівному: 1; 0,8; 0,5; 0,25; 0,2 від номінального показано на рисунку 2.12.

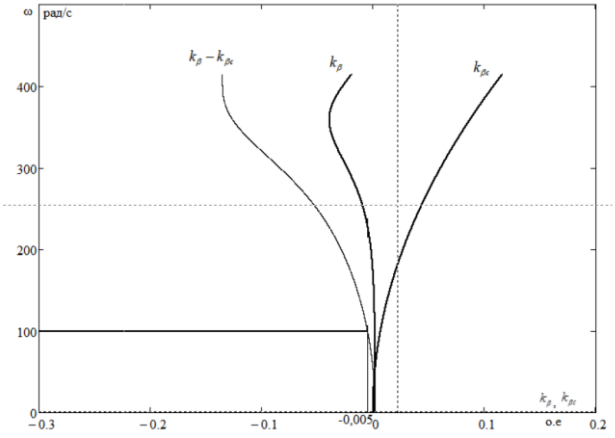

Рисунок 2.11 – Графічні залежності жорсткості механічних характеристик асинхронного двигуна k_β та $k_{\beta c}$, від швидкості

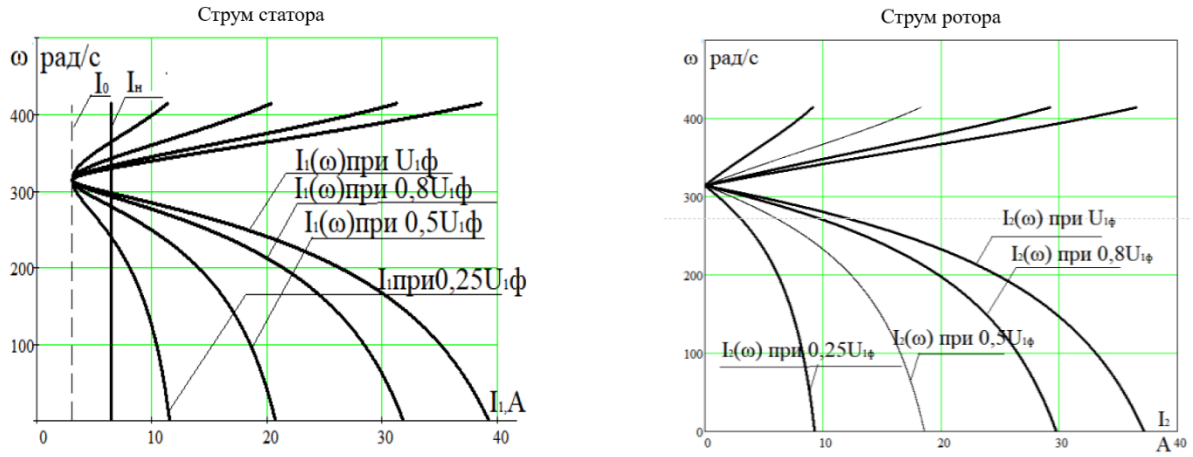

Рисунок 2.12 – Сімейство електромеханічних характеристик асинхронного двигуна за фіксованих рівнів діючого значення напруги статора: 1; 0,8; 0,5; 0,25 від номінального.

Аналіз отриманих електромеханічних характеристик свідчить, що струм короткого замикання (пусковий струм) зменшується прямо пропорційно зниженню амплітуди підведеної напруги статора. Обмеження амплітуди пускових струмів мінімізує термічний та електродинамічний вплив на ізоляцію обмоток, що позитивно позначається на міжремонтному ресурсі й загальному терміні експлуатації асинхронної машини, а також оптимізує динамічні процеси в системі електроприводу.

Висновки до розділу

1. На основі заданих напору і продуктивності розраховано потужність та обрано асинхронний двигун RA100L2. Під його характеристики підібрано сумісний горизонтальний багатоступеневий насос Calpeda MXH 1604, що гарантує роботу комплексу в оптимальному режимі.

2. Для силової схеми ТРН обрано тиристори ТБ151-50, а тепловий розрахунок підтвердив ефективність їхнього охолодження радіаторами О232. Також визначено параметри комутаційного й захисного обладнання (пускач

ПМЕ-211, автомат ВА51-31, запобіжники ПН2-100) та переріз кабелю ВВГ (10 мм^2) для надійного захисту від перевантажень.

3. Визначено параметри Т-подібної схеми заміщення двигуна та побудовано сімейство штучних характеристик для рівнів напруги від 1,0$U_н$ до 0,2 $U_н$. Аналіз жорсткості механічних характеристик підтвердив статичну стійкість роботи привода з вентиляторним навантаженням насоса в усьому діапазоні регулювання швидкості.

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Імітаційне моделювання системи за допомогою програми Matlab Simulink

Імітаційне моделювання динамічних режимів роботи АД та аналіз перехідних процесів кутової швидкості, електромагнітного моменту й струму статора реалізовано шляхом комп'ютерного моделювання у середовищі візуального програмування MATLAB Simulink. Для побудови адекватної імітаційної моделі електропривода використано чисельні значення параметрів Т-подібної схеми заміщення досліджуваної електричної машини, які були розраховані та обґрунтовані у підрозділі 2.6:

Використовуючи ці параметри, потрібно розрахувати:

Індуктивність розсіювання обмотки статора:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2\pi f} = \frac{1.77}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 5.634 \text{ мГн}$$

Індуктивність контуру намагнічування:

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f} = \frac{65.272}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.208 \text{ Гн}$$

Ці параметри будуть використовуватися в імітаційній моделі, представленій на рисунку 3.1.

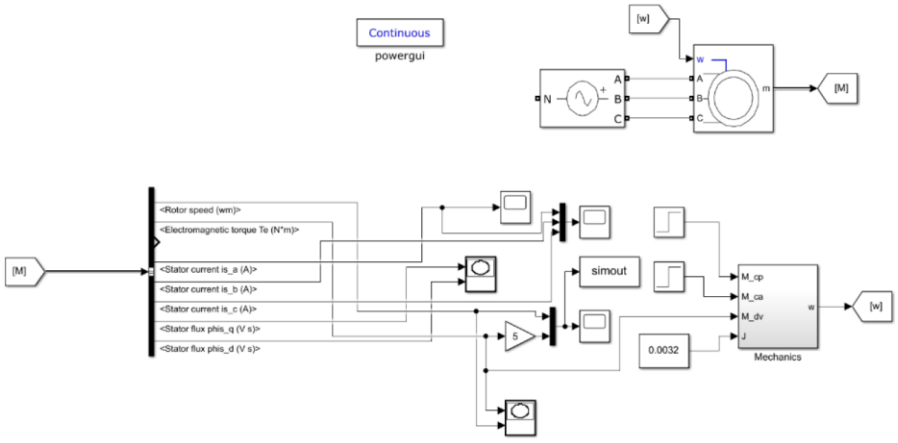

Рисунок 3.1 – Імітаційна модель АД в середовищі MATLAB Simulink на основі елементів із бібліотеки SimPowerSystems

Навантаження здійснюється за допомогою блоку Mechanics (рисунок 3.2).

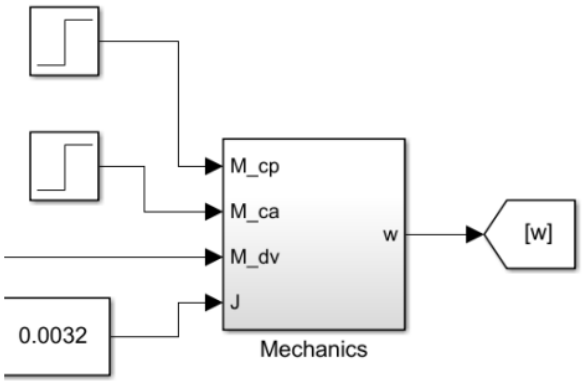

Рисунок 3.2 – Модель навантаження.

Цей блок включає:

M_cp – задавання активного навантаження;

M_ca – реактивне навантаження;

M_dv – електромагнітний момент двигуна;

J = 0,0032 кг·м².

За допомогою блоків Step можна задати величину навантаження та час, коли це навантаження слід накласти. Результати моделювання роботи АД показано на рисунках 3.3-3.5.

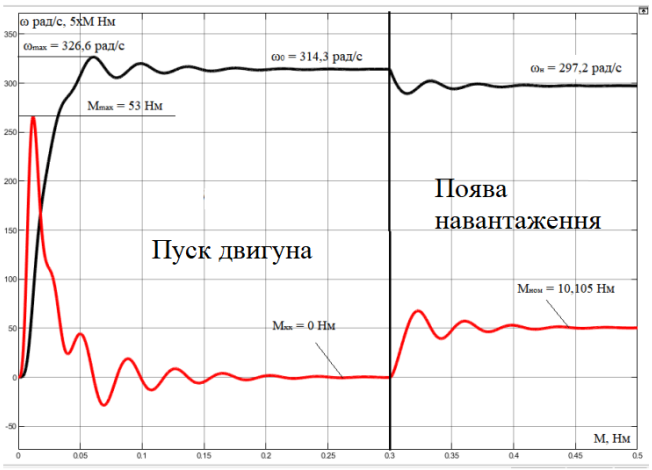

Рисунок 3.3 – Перехідна характеристика швидкості та моменту обертання ротора АД при прямому пуску

Аналіз графіка на рисунку 3.3 показує, що під час відпрацювання перехідних процесів без навантаження (режим ідеального холостого ходу) швидкість асинхронного двигуна практично дорівнює синхронній швидкості ω0 = 314,3 рад/с, його електромагнітний момент дорівнює нулю, а струм статора в стаціонарному режимі незначно відрізняється від струму статора холостого ходу за статичними характеристиками (I_{0c} = 3,098):

$$I_0 = \frac{I_{0m}}{\sqrt{2}} = \frac{4.374}{\sqrt{2}} = 3.093 \text{ А}.$$

де I_{0m} – струм холостого ходу статора.

У момент часу t = 0,3 с до вала двигуна було задіяно навантаження, рівне номінальному моменту двигуна Мс = 10,105 Н·м. Після відпрацювання збурюючого впливу стаціонарна швидкість двигуна зменшилася практично до номінальної швидкості ω = 297,2 рад/с (ωн = 296,881 рад/с), електромагнітний момент у стаціонарному режимі став дорівнювати статичному моменту на валу двигуна Мс = 10,105 Н·м, а струм статора незначно відрізняється від номінального струму статора, та становить Ін = 6,446 А, а за графіком перехідного процесу:

$$I_{1H} = \frac{I_{1Hm}}{\sqrt{2}} = \frac{8.605}{\sqrt{2}} = 6.085 \text{ А},$$

де I_{1Hm} - амплітудне значення номінального струму статора.

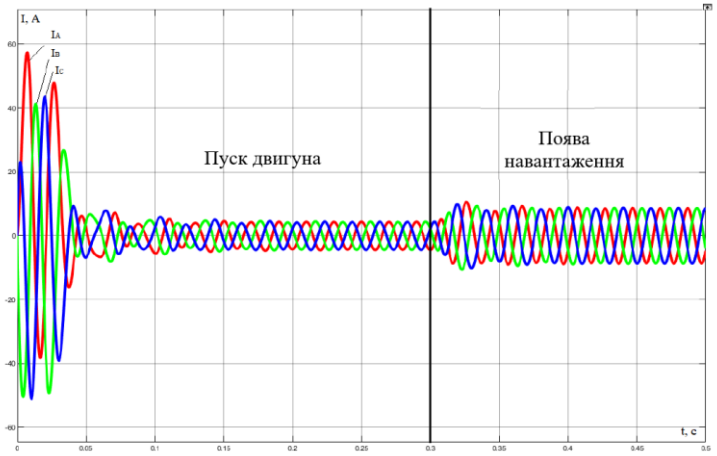

Рисунок 3.4 – Осцилограма струмів статора АД в режимі прямому пуску

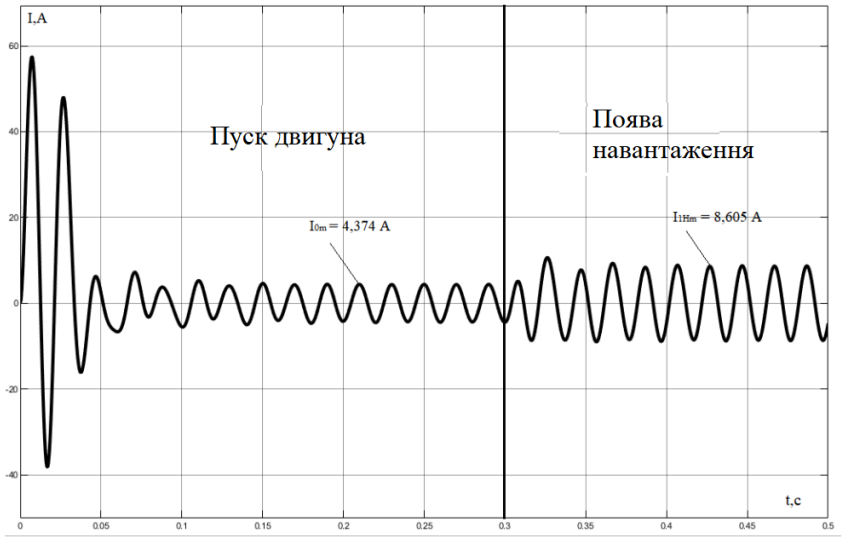

Рисунок 3.5 – Перехідний процес миттєвого значення струму статора фази А асинхронного двигуна в режимі прямого пуску на холостому ходу

Аналіз графіків струму, швидкості та моменту показав, що асинхронний електродвигун із знайденими параметрами схеми заміщення є стійким елементом, і ці параметри можна використовувати в подальшому при дослідженні та налаштуванні систем регулювання із застосуванням даного двигуна.

Імітаційна модель, створена в програмному середовищі MATLAB, адекватно відображає перехідні режими в короткозамкненому асинхронному двигуні і може бути використана для дослідження його динамічних процесів.

3.2 Моделювання системи плавного пуску ТРН-АД у Matlab Simulink

Керований пуск дозволяє протягом заданого часу здійснювати плавне наростання напруги на статорі двигуна від нуля до номінального значення за заданим законом, що забезпечує:

1) плавне наростання пускового струму в статорі;

2) повністю виключаються електромагнітні складові пускового струму та пов'язані з ним ударні навантаження в двигуні;

3) двигун може бути запущений від мережі обмеженої потужності без значних просадок напруги;

4) істотно знижуються динамічні впливи на технологічне обладнання;

5) з'являється можливість здійснювати практично необмежену кількість пусків і зупинок агрегатів.

Моделювання системи ТРН-АД здійснимо за допомогою засобів пакета розширення Simulink – SimPowerSystems.

Перелік та розташування основних необхідних компонентів:

Джерело змінної напруги: SimPowerSystems/Electrical Sources/AC Voltage Source.

Асинхронний двигун: SimPowerSystems/Machines/Asynchronous Machine SI Units.

Блок для вимірювання параметрів двигуна: SimPowerSystems/Machines/ Machines Measurement Demux.

Блок для вимірювання напруги: SimPowerSystems/Measurements/ Voltage Measurement.

Блок для вимірювання струму: SimPowerSystems/Measurements/ Current Measurement.

Заземлення: SimPowerSystems/Elements.

Осцилограф: Simulink/Sinks/Scope.

Система імпульсно-фазового керування: SimPowerSystems/Extra Libraty/Discrete Control Blocks/Discrete Synchronized 6-Pulse Generator.

Модель тиристора: SimPowerSystems/Power Electronics/ Thyristor.

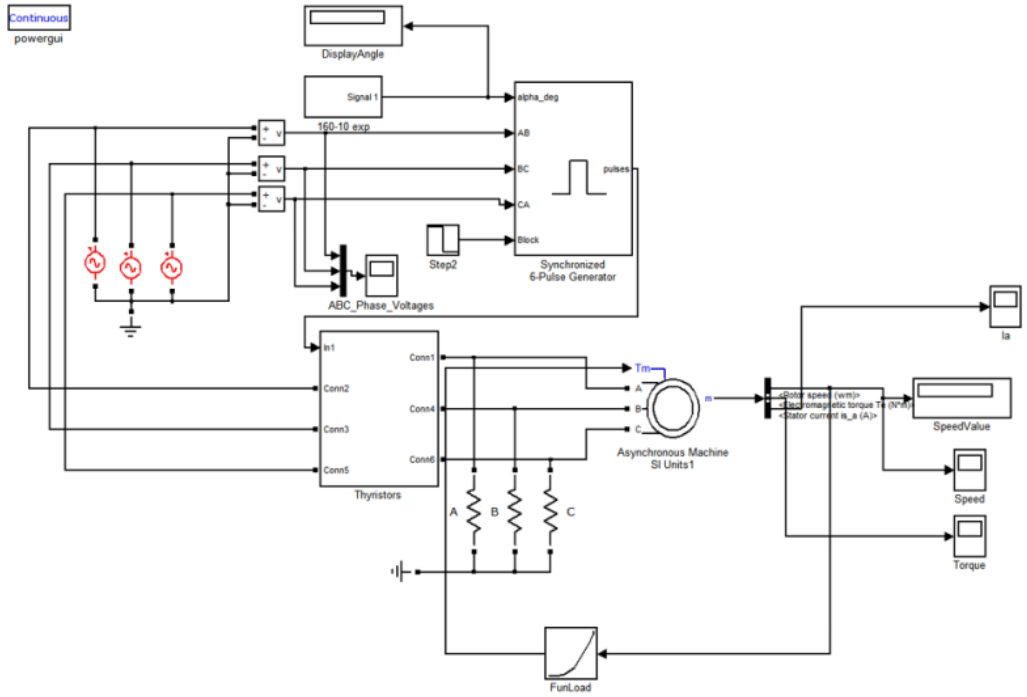

Рисунок 3.6 – Модель ТРН-АД у Matlab Simulink

Блок Discrete Synchronized 6-Pulse Generator необхідно підключити до фазної напруги за допомогою блоку вимірювача напруги. Також необхідно у налаштуваннях вимкнути опцію Double pulsing.

Під час конфігурування стандартного блока асинхронної машини з короткозамкненим ротором Asynchronous Machine SI Units у середовищі MATLAB Simulink, ідентифікація розрахованих параметрів здійснюється у таких спеціалізованих вкладках діалогового вікна налаштувань:

Configuration:

- Механічний вхід: Крутний момент Tm (Механічний вихід: Крутний момент);
- Тип ротора: Короткозамкнутий (Тип ротора: Короткозамкнутий);
- Система координат: Нерухома (Система координат: Нерухома);
- Одиниці вимірювання: SI (Система одиниць: абсолютні (CI)).

Parameters:

Номінальна потужність, напруга (міжфазна) та частота [Pn(BA),

Vn(Врмс), fn(Гц)] (Номінальна потужність (ВА), міжфазна напруга (В), номінальна частота (Гц));

Опір та індуктивність статора [Rs(Ом) L_{ls}(Гн)](Опір (Ом) та індуктивність розсіювання (Гн) статора);

Опір та індуктивність ротора [Rr(Ом) L_{lr}(Гн)] (Опір (Ом) та індуктивність розсіювання (Гн) ротора);

Взаємна індуктивність Lm(Гн);

Інерція, коефіцієнт тертя та пари полюсів [J (кг·м²) F(Н·м·с) p()](Момент інерції (кг·м²), коефіцієнт тертя);

Початкові умови (Початкові умови. Значення в дужках по порядку: ковзання, кут повороту, струми статора, $\varphi_{as}, \varphi_{bs}, \varphi_{cs}$ - кут між струмом і напругою

У блоці Machines Measurement Demux необхідно змінити тип машини (Machine type: Asynchronous) та вказати величини, які будуть вимірюватися.

Також для коректної роботи системи необхідно включити паралельно до двигуна три опори, з'єднані зіркою, із заземленою загальною точкою. Величина опору — десяті Ом. Енергія, що утворюється проти ЕРС у двигуні, буде скидатися на ці опори.

3.3 Дослідження споживаної потужності при різних заданих значень інтенсивності

Для обліку потужності, що споживається двигуном, використовуємо блок розрахунку [9].

Механічна потужність двигуна:

$$P_{мех} = M \cdot \omega, \tag{3.1}$$

де M і ω — момент двигуна і його кутова швидкість.

Потужність, що споживається з мережі:

$$P_s = \frac{3}{2}\left(U_{sx} \cdot I_{sx} + U_{sy} \cdot I_{sy}\right), \tag{3.2}$$

де I_{sx}, I_{sy}, U_{sx}, U_{sy} — проекції векторів струму та напруги статора в обертовій системі координат.

Баланс потужності без урахування втрат у сталі:

$$P_s = P_{мех} + \Delta P_{sEл} + \Delta P_{rEл} \tag{3.3}$$

Загальні втрати з балансу потужності:

$$\Delta P = P_s - P_{мех}. \tag{3.4}$$

Втрати в статорі:

$$\Delta P_{sEл} = R_s \cdot I_{sx}^2 + R_s \cdot I_{sy}^2, \tag{3.5}$$

де R_s - опір статорних ланцюгів.

Втрати в роторі:

$$\Delta P_{rEл} = \Delta P - \Delta P_{sEл}. \tag{3.6}$$

Енергія, що споживається з мережі:

$$W_s = \int_0^{T_Ц} P_s dt, \tag{3.7}$$

де $T_Ц$ - час циклу роботи виробничого механізму.

Енергія втрат:

$$\Delta W = \int_0^{T_Ц} (P_s - P_{мех}) dt. \tag{3.8}$$

ККД циклу як відношення механічної енергії до енергії, що споживається з мережі за цикл роботи:

$$\eta_Ц = \frac{W_{мех}}{W_E} = \frac{\int_0^{T_Ц} P_{мех} dt}{\int_0^{T_Ц} P_s dt} \tag{3.9}$$

За наведеними формулами створюємо блок розрахунку в середовищі Matlab Simulink; схема блоку показано на рисунку 3.7.

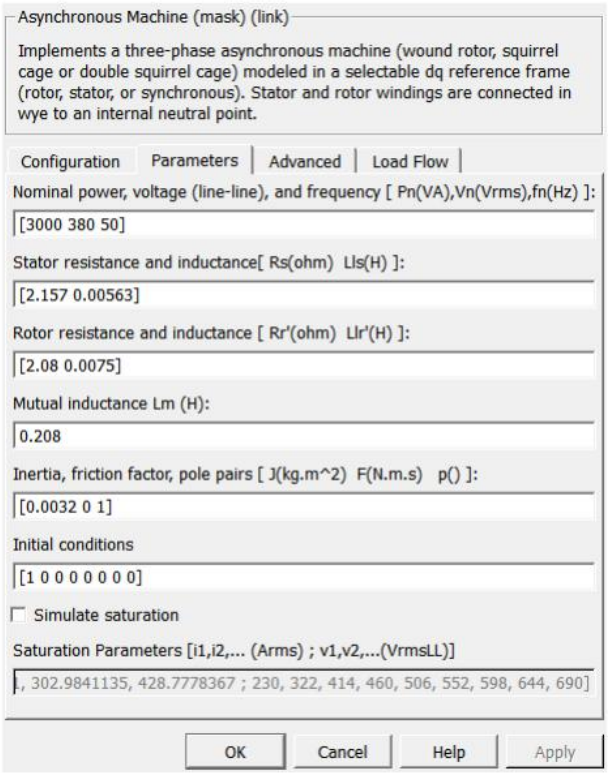

Рисунок 3.7 – Діалогове вікно налаштування параметрів блока асинхронного двигуна Asynchronous Machine у середовищі MATLAB Simulink

З метою ідентифікації та кількісного оцінювання енергетичних втрат в асинхронній машині виконано комп'ютерне моделювання режиму прямого пуску двигуна від мережі. Отримані за результатами симуляції числові дані та розраховані показники зведено в таблиці 3.1 та 3.2.

Таблиця 3.1 – Прямий пуск при 10 с роботи

	$P_{мех}$	P_s	$\Delta P_{sЕл}$	$\Delta P_{rЕл}$	W_s	ΔW	η
ХХ	172,7	175,1	223,3	328,3	724,3	551,5	23,85
ВН	521,1	3132	416,4	623,7	1561	1040	33,38
НН	597,9	3405	329,8	492,2	1420	821,9	42,11

Таблиця 3.2 – Прямий пуск при 0,2 с роботи

	$P_{мех}$	P_s	$\Delta P_{sEл}$	$\Delta P_{rEл}$	W_s	ΔW	η
ХХ	157,9	74,38	625,2	413,8	1197	1039	13,19
ВН	29150	3440	2032	2723	33900	4755	85,97
НН	29900	3419	2154	2866	34900	5020	85,63

У таблицях 3.1, 3.2 наведено дані, отримані під час запуску двигуна без навантаження, з номінальним та вентиляторним навантаженням. Дані щодо ККД, отримані за вказаний проміжок часу, не відображають фактичного значення, оскільки ККД повільно наближається до стаціонарного значення. Чим довше час роботи, тим точніше ККД відповідає кінцевому значенню.

Щоб визначити вплив часу запуску від тиристорного регулятора на споживану потужність і втрати в асинхронному двигуні, проведемо наступні досліди.

У таблиці 3.3 наведено дані, отримані під час запуску АД від ТРН при різних темпах наростання керуючого сигналу.

Таблиця 3.3 – Запуск АД від ТРН, тривалість 10 с

	Темп наростання	$P_{мех}$	P_s	$\Delta P_{sEл}$	$\Delta P_{rEл}$	W_s	ΔW	η
ХХ	1	172,7	3066	601,7	490,1	1265	1092	13,6
	2	172,7	3066	576,4	477,3	1226	1054	14,08
	5	172,7	3066	509,4	452,6	1135	962	15,22
ВН	1	25100	3068	2594	3561	31200	6156	80,3
	2	23200	3066	3133	4405	3100	7534	75,47
	5	17730	3066	4611	6723	29100	11300	61,01
НН	1	25500	3066	2096	2803	30400	4899	83,9
	2	24000	3066	2329	3181	29500	5510	81,32
	5	19600	3066	2976	4238	26810	7214	73,1

Видно, що зі збільшенням часу пуску споживана з мережі потужність W_s [Вт·с] зменшується, при ХХ втрати також зменшуються. Однак слід зазначити, що не враховувався статичний момент на валу двигуна, тому, даний параметр не відповідає дійсності.

При роботі під навантаженням зростають втрати ΔW, причому в однаковій мірі і втрати в $\Delta P_{sEл}$ (статорних ланцюгах) і $\Delta P_{rEл}$ роторних ланцюгах. Далі звернемося до аналізу отриманих перехідних процесів для декількох конкретних випадків з таблиці 3.3.

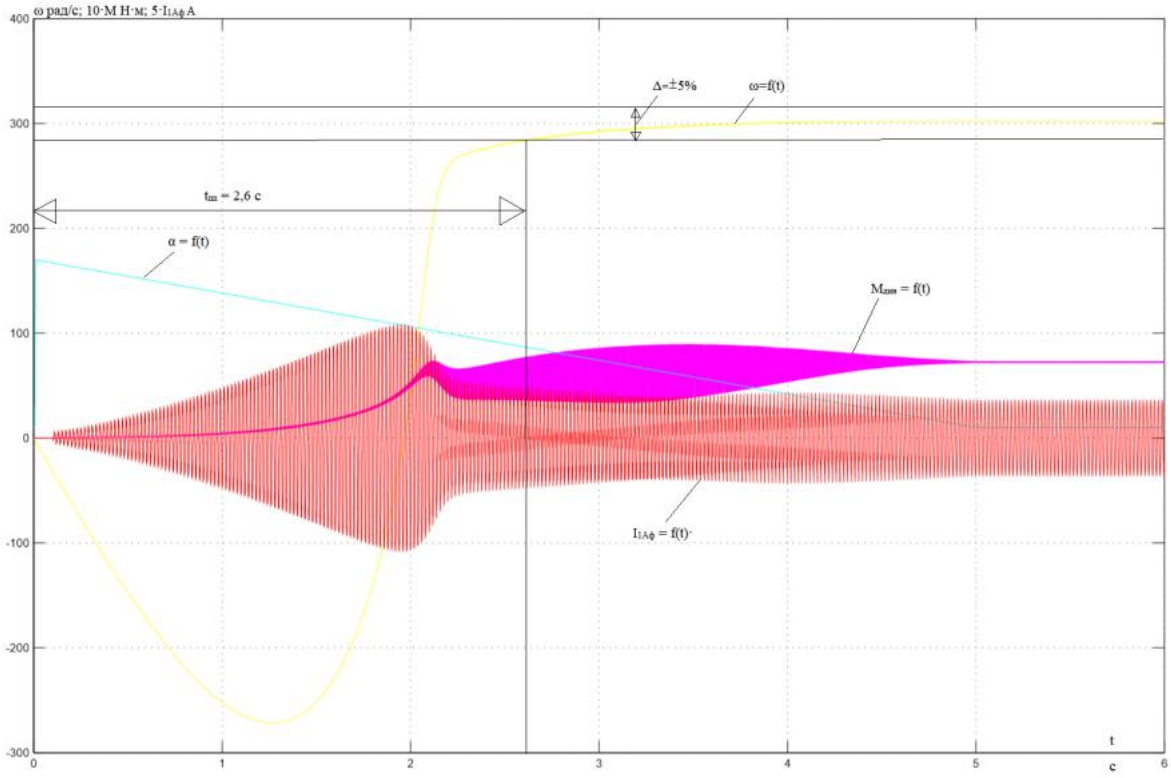

Рисунок 3.8 – Основні графіки перехідних процесів для пуску двигуна з темпом наростання сигналу 5 с, під навантаженням

З рисунка 3.8 видно, що доки електромагнітний момент не стане більшим за статичний момент, прикладений до валу двигуна, двигун не запускається. Під час поступового відкриття тиристорів споживається енергія, отже, необхідно здійснювати більш швидку зміну кута. Також видно,

що фазний струм повільно наростає, є можливість збільшити швидкість наростання сигналу.

Коли динамічний момент стає позитивним, починається рух двигуна. Оскільки потужність двигуна та момент інерції малі, розгін двигуна відбувається з великим прискоренням. У цей період необхідна більш плавна зміна кута відкриття тиристорів.

Підводячи підсумок вищенаведеного міркування, доходимо до висновку, що для кращої роботи пускового пристрою необхідний нелінійний закон зміни заданого кута відкриття тиристорів. Замінимо лінійний задавач інтенсивності наростання сигналу сигналом експоненціальної форми.

Зменшимо час розмикання тиристорів до 2 с і сформуємо кут розмикання за експоненційним законом, апроксимувавши криву ламаними прямими. Також порівняємо споживану потужність для лінійного регулятора розмикання тиристорів і нелінійного.

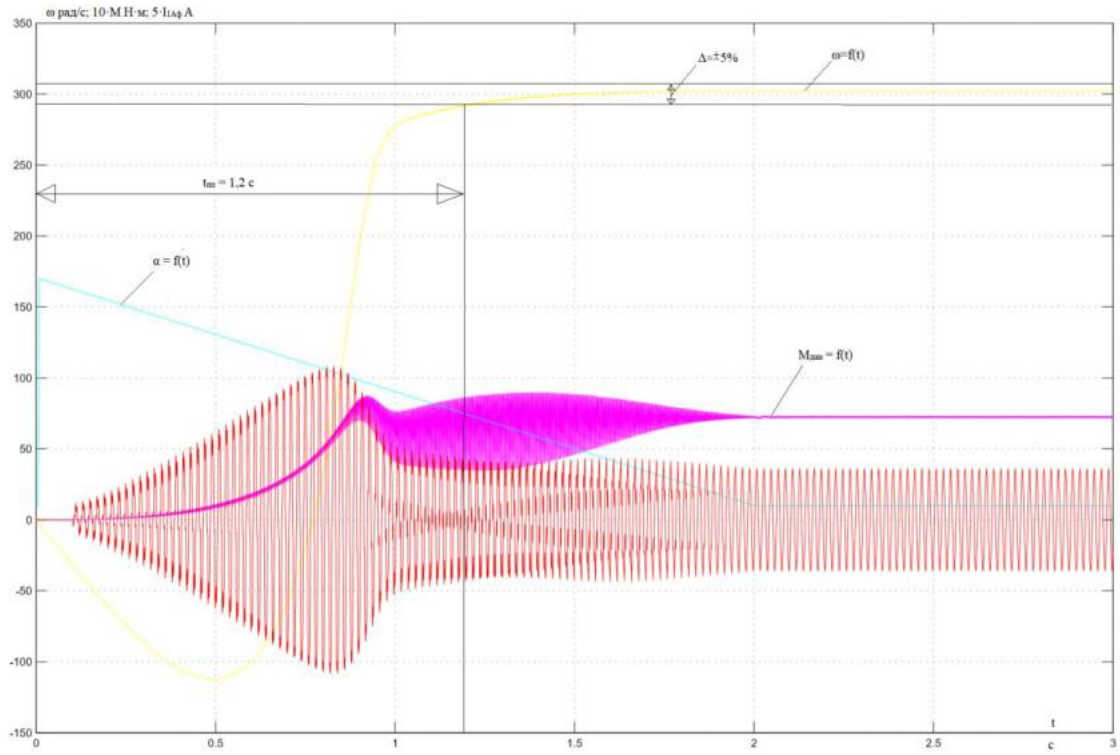

Рисунок 3.9 – Запуск від лінійного ЗІ, час запуску 2 с, під навантаженням

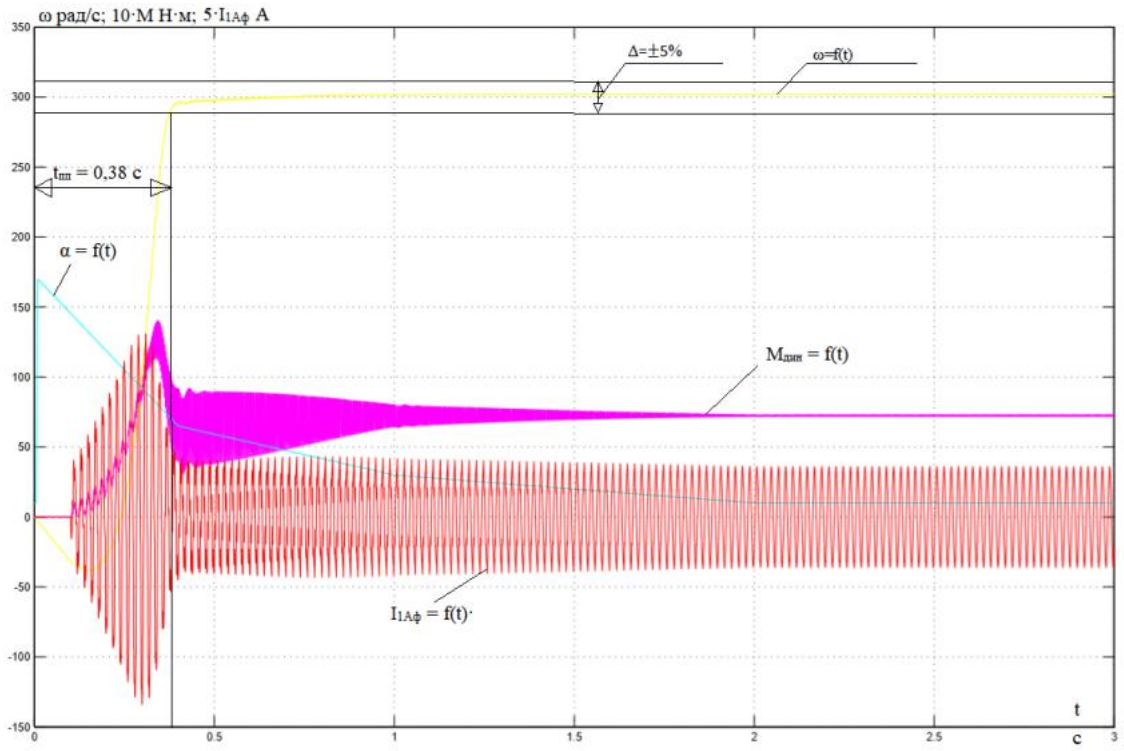

Рисунок 3.10 – Запуск від нелінійного джерела живлення, час запуску 2 с, під навантаженням

Аналізуючи отримані графіки перехідних процесів для різних ЗІ, можна сказати, що задавання кута за експоненційним законом дозволяє скоротити час наростання електромагнітного моменту, а отже, скоротити час пуску двигуна.

Також слід врахувати, що занадто швидке наростання кута відкриття на початковій ділянці призводить до появи коливань моменту.

Таблиця 3.4 – Порівняння споживаної потужності пристроїв задавання кута відкриття тиристорів

ЗІ	$P_{мех}$	P_s	$\Delta P_{sEл}$	$\Delta P_{rEл}$	W_s	ΔW	η
Лінійний	$2{,}32 \cdot 10^4$	3066	3133	4405	$3{,}07 \cdot 10^4$	7538	75,5
Нелінійний	$2{,}56 \cdot 10^4$	3066	2552	3493	$3{,}17 \cdot 10^4$	6045	81

У таблиці 3.4 наведено дані щодо споживаної потужності та втрат. Видно, що при нелінійному задавачі інтенсивності сумарні втрати зменшилися і стали меншими, ніж навіть при лінійному задавачі інтенсивності 1 с, 7538 проти 6045 Вт·с. Виходячи з цього, можна зробити висновок, що нелінійний задавач інтенсивності з експоненційним законом зміни кута задавання відкриття тиристорів кращий, ніж лінійний.

Висновки до розділу

1. За розрахованими параметрами Т-подібної схеми заміщення побудовано модель двигуна RA100L2. Порівняльний аналіз динамічних характеристик прямого пуску, стабілізація номінального струму 6,446 А під навантаженням 10,105 Н·м підтвердив високу точність та адекватність відтворення перехідних процесів.

2. Модель показала переваги експоненціального закону зміни кута відкриття тиристорів порівняно з лінійним при часі пуску 2 с. Застосування нелінійного задавача інтенсивності забезпечило скорочення часу пуску, зниження сумарних втрат енергії з 7538 Вт·с до 6045 Вт·с та підвищення ККД циклу до 81,%.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Засоби та заходи електробезпеки, що використовуються за нормального режиму роботи електроустановок

Основним заходом, спрямованим на захист від випадкового доторкання до струмовідних частин в електроустановках до 1000 В, є ізоляція струмовідних частин. Вона забезпечує технічну працездатність електроустановок, зменшує вірогідність потрапляння людини під напругу, замикань на землю і на корпус електроустановок, зменшує струм через тіло людину при торканні неізольованих струмовідних частин в електроустановках, що живляться від ізольованої від землі мережі.

Ізоляція буває таких видів:

- робоча – забезпечує нормальну роботу електроустановок і захист від ураження електричним струмом;
- додаткова – забезпечує захист від ураження електричним струмом на випадок пошкодження робочої ізоляції;
- подвійна – складається з робочої і додаткової;
- підсилена – поліпшена робоча ізоляція, яка забезпечує такий рівень захисту, як і подвійна.

З метою забезпечення працездатності електроустановок і безпечної їх експлуатації проводиться контроль стану ізоляції, який характеризується електричною міцністю ізоляції, її електричним опором і діелектричними втратами. В установках напругою більше 1000 В проводять усі види випробувань ізоляції, а при напрузі до 1000 В контролюють електричний опір і електричну міцність. Виділяють приймально-здавальні випробування, післяремонтні (реконструкція і капітальний ремонт) і міжремонтні.

Електричну міцність ізоляції визначають шляхом випробування підвищеною напругою. Опір ізоляції електроустановок нелінійно залежить від прикладеної напруги. Тому контроль опору ізоляції проводять за робочої напруги або за допомогою спеціальних приладів – мегомметрів

Вимоги до величини випробувальної напруги, величини опору ізоляції електроустановок та періодичності контролю регламентовано ПУЕ, «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів" та іншими чинними нормативно-правовими актами.

В електроустановках напругою більше 1000 В електротравми можливі і при дотику до ізольованих струмовідних частин. Захист від випадкового дотику в цих електроустановках здійснюється за рахунок забезпечення недоступності струмовідних частин. Основними заходами забезпечення недоступності струмовідних частин є розміщення неізольованих струмовідних частин на недоступній висоті та в недоступному місці, застосування захисних огорож, закритих комутаційних апаратів (пакетних вимикачів, комплектних пускових пристроїв, дистанційних електромагнітних приладів для керування споживачами електроенергії тощо), обмеження доступу сторонніх осіб в електротехнічні приміщення тощо.

Призначення блокувальних пристроїв – унеможливити доступ до неізольованих струмовідних частин без попереднього зняття з них напруги та попередити помилкові дії персоналу при експлуатації електроустановок, не допустити порушення рівня електробезпеки та вибухозахисту електрообладнання без попереднього відключення його від джерела живлення. Основними видами блокувальних пристроїв є механічні, електричні і електромагнітні.

Механічні блокувальні пристрої – це такі конструкції (стопори, замки, пружинно-стрижньові і гвинтові конструкції тощо), які не дозволяють знімати захисні огорожі електроустановок, відкривати комутаційні апарати без знеструмлення. Електричні блокувальні пристрої забезпечують розрив мережі живлення чи кола керування пускового апарата спеціальними контактами, змонтованими на дверях огорож, розподільних щитів і шаф, кришках і дверцях кожухів електрообладнання. Електромагнітні блокувальні пристрої використовуються з метою забезпечення необхідної послідовності вмикання і вимикання обладнання. Вони виготовляються, переважно, у

вигляді стрижньових електромагнітів. У знеструмленому стані стрижень електромагніту під дією пружини заходить у гніздо корпуса органа керування електроустановки, що не дозволяє маніпулювати цим органом. При подачі напруги на обмотку електромагніта, осердя втягується в котушку, що забезпечує розблокування органа керування електроустановкою і можливість необхідних маніпулювань цим органом.

Засоби орієнтації та сигналізації дають можливість персоналу чітко орієнтуватися в електроустановках, запобігають помилковим діям та надають інформацію відносно перебування електрообладнання під напругою, стану ізоляції та пристроїв захисту, а також про небезпечні відхилення режимів роботи від номінальних. До засобів орієнтації в електроустановках відносять маркування частин електрообладнання, забарвлення неізольованих струмовідних частин, попереджувальні сигнали, написи, таблички, комутаційні схеми, знаки високої електричної напруги, знаки попереджувальні тощо. В електроустановках напругою понад 1000 В світловою сигналізацією обладнують комірки роз'єднувачів, масляних вимикачів, трансформаторів.

З метою збільшення опору ізоляції проводів електричної мережі відносно землі і зменшення ємнісної складової струму виконують захисне розділення електричних мереж. Розділення протяжних мереж на окремі, електрично незв'язані між собою частини, здійснюють за допомогою трансформаторів з коефіцієнтом трансформації, що дорівнює одиниці. Такі заходи можуть здійснюватись як у мережах, ізольованих від землі, так і при переході від мережі з глухозаземленою нейтраллю до мережі, ізольованої від землі.

При реалізації захисного розділення електричних мереж розділяючий трансформатор як засіб захисту повинен мати високу надійність конструкції і якісну ізоляцію. Корпус трансформатора заземлюється чи занулюється залежно від режиму нейтралі мережі живлення трансформатора, а заземлення вторинної обмотки трансформатора не допускається.

Малу напругу використовують у приміщеннях з підвищеною небезпекою електротравм та особливо небезпечних для живлення ручного електрифікованого інструмента, ручних переносних ламп, світильників місцевого освітлення з лампами розжарювання, в яких конструктивно не виключена можливість контакту сторонніх осіб із струмовідними частинами, світильників загального освітлення з лампами розжарювання при висоті підвісу світильників, меншій 2,5 м.

Чинні нормативно-правові акти виділяють два діапазони малої напруги змінного струму: 12 і 42 В.

Напруга 12 В змінного струму повинна застосовуватися для живлення переносних світильників в особливо небезпечних умовах щодо електротравм за умови виконання робіт у металевих, бетонних чи залізобетонних ємностях, кабельних та інших енергетичних підземних комунікаціях, оглядових ямах, вентиляційних камерах тощо. В інших випадках використовують малу напругу до 42 В змінного і до 110 В постійного струму.

4.2 Причини ураження електричним струмом

Статична електрика — сукупність явищ, пов’язаних із виникненням, збереженням та релаксацією вільного електричного заряду на поверхні або в об’ємі діелектриків чи на ізольованих провідниках.

Небезпека ураження електричним струмом виникає при контакті з електричним ланцюгом, в якому присутні джерела напруги та/або джерела струму, здатні викликати протікання струму по тій частині тіла, що потрапила під напругу. Зазвичай чутливим для людини є пропускання струму силою понад 1 мА.

Сила ураження залежить від потужності розряду, від часу впливу, від характеру струму (постійний чи змінний), від стану людини — вологості рук тощо, а також від місця контакту та шляху проходження струму по організму.

Наслідки ураження електричним струмом:

- через високий електричний опір людських тканин відбувається досить швидке їх нагрівання, що може спричинити опіки;
- навіть порівняно малі напруги, близько 110 – 230 В, при короткочасний контакт з грудною кліткою можуть викликати збій у роботі серцевого м'яза (60 мА для змінного струму, 300 – 500 мА для постійного);
- удар струмом може викликати збій у роботі нервової системи, наприклад, безладні скорочення м’язів. Повторні удари можуть викликати невропатію. Гостра електротравма може стати причиною наростаючої асистолії;
- при ураженні голови електричним струмом можлива втрата свідомості.

З огляду на зазначені вище небезпеки до самостійної роботи в комп’ютерній аудиторії допускаються особи віком не менше 18 років, які пройшли інструктаж з техніки безпеки. У даному приміщенні, з метою зниження ризиків ураження електричним струмом, в обладнанні застосовується ізоляція струмопровідних елементів. Обладнання, що знаходиться під напругою, має захисні кожухи, тобто корпус комп'ютера. Він забезпечує захист від випадкового дотику до струмопровідних елементів комп'ютера, а також захищає обладнання від потрапляння в нього сторонніх предметів і вологи.

Для попередження та запобігання ураженню електричним струмом у приміщенні застосовуються такі заходи:

а) контроль стану та своєчасне усунення несправностей обладнання;

б) регулярна перевірка ізоляції;

в) дотримання техніки безпеки та правил роботи з обладнанням;

г) встановлення захисних пристроїв, таких як автоматичні вимикачі та мережеві фільтри

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу умов роботи насосних установок у тривалому режимі (S1) з вентиляторним навантаженням та заданих параметрів обґрунтовано вибір надійного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором типу RA100L2 та сумісного горизонтального багатоступеневого насоса Calpeda MXH 1604, що забезпечує стабільну роботу комплексу в оптимальній зоні. Для силової схеми ТРН обрано тиристори ТБ151-50, а тепловий розрахунок підтвердив ефективність їхнього охолодження радіаторами О232.

2. У середовищі MATLAB Simulink розроблено модель системи ТРН–АД на основі уточнених параметрів Т-подібної схеми заміщення двигуна. Результати симуляції прямого пуску підтвердили стійкість системи у всьому діапазоні швидкостей (діапазон регулювання 1:3) з точним виходом на номінальні координати, що доводить коректність розрахунків і можливість використання моделі для подальшого налаштування контурів регулювання.

3. Моделювання пускових режимів ТРН–АД підтвердило обмеження пускового струму до рівня $1..3\,I_н$, що мінімізує термічні навантаження на ізоляцію обмоток і виключає гідроудари в трубопроводах. Дослідження законів керування показало, що перехід від лінійного до нелінійного формування напруги скорочує час пуску, знижує сумарні теплові втрати з 7538 Вт·с до 6045 Вт·с та підвищує ККД циклу до 81%.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Клепіков В.Б. Автоматизований електропривод: Підручник / В.Б. Клепіков, Д.І. Морозов – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – 320 с.

2. Попович М.Г. Теорія електроприводу: Підручник для студ. вищ. навч. закл. / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепіков – Київ: Вища школа, 2014. – 510 с.

3. Маляр В.С. Теоретичні основи електромеханіки: Навч. посібник / В.С. Маляр – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016. – 384 с.Тарасенко М.Г.,

4. Krause P.C. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems: Monograph / P.C. Krause, O. Wasynczuk, S.D. Sudhoff, S.D. Pekarek – Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2013. – 680 p.

5. Mohan N. Power Electronics: Converters, Applications, and Design: Textbook / N. Mohan, T.M. Undeland, W.P. Robbins – New York: Wiley, 2022. – 824 p.

6. Оболонін О. Моделювання режимів роботи асинхронного двигуна при несиметрії напруги мережі / Оболонін О. // VI Міжнародна студентська науково-технічна конференція „Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання“, 27-28 квітня 2023. — Т. : ТНТУ, 2023. — С. 99-100.

7. Калінов А.П. Моделювання та дослідження статичної стійкості асинхронного електроприводу з вентиляторним навантаженням / А.П. Калінов, О.М. Мороз // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2020. – Вип. 3 (51). – С. 18–25.

8. Буняк О. Аналіз функціонування захистів асинхронних двигунів / О. Буняк, О.Скочиляс // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій “, присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня

заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (28-29 травня 2025). ТНТУ.– 2025. – С. 59.

9. Коваль В.П., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с.

10. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший (бакалаврський) / укл. : О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.