

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
Кафедра електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис) О. КОЛЛАРОВ
(ініціали, прізвище)
«___» _____ 2022 р.

**Кваліфікаційна робота
бакалавра**

на тему Дослідження роботи електроприводу із пристроєм плавного пуску в мережі розподіленої генерації

Виконала: студентка 3 курсу, групи ЕЛКЗп-19
(шифр групи)

спеціальності підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та

(шифр і назва спеціальності підготовки)

та електромеханіка»

_____ ОЛЕФІРОВА Ольга (ім'я та прізвище)	_____ (підпис)
Керівник <u>ст. викл. «ЕлІн», Е. НСМЦЕВ</u> (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)	_____ (підпис)

Рецензент _____ (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)	_____ (підпис)
---	-------------------

Нормоконтроль:

(підпис) О. ЛЮБИМЕНКО

(дата)

Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент(-ка) _____
(підпис)

(дата)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: бакалавр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

« » _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТЦІ
Ользі ОЛЕФІРОВІЙ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Дослідження роботи електроприводу із пристроєм плавного пуску в мережі розподіленої генерації.

керівник роботи Едуард НЕМЦЕВ, ст. викл. «ЕлІн»

(ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 6 червня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи: Двигун для електропривода: АД із

короткозамкненим ротором, номінальна напруга номінальна напруга

$U_n=380(V)$, номінальна потужність $P_n=7,5(kW)$, швидкість обертання двигуна

$w_n=1430 \text{ об/хв.}$, число пар полюсів $p=2$, сумарний момент інерції $J=0.185$

$(kg \cdot m^2)$; частота мережі $f=50(Гц)$, коефіцієнт потужності $\cos(\varphi)=0.883$

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Проведення аналізу методів регулювання координатами електропривода.

2. Розрахунок та побудова механічної та регулювальної характеристик ЕД.

3. Синтез та налаштування системи регулювання за моментом та швидкістю. Розробка математичної моделі побудованої системи.

4. Розробка заходів із питань охорони праці при роботі із електродвигунами.

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

Дев'ять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 4.1–4.3	Е. НЄМЦЕВ, ст. викл.		
Розділ 4.4	О. КОЛЛАРОВ, зав. каф.		
Нормоконтролер	О. ЛЮБИМЕНКО, доц. каф.		

7. Дата видачі завдання 27 квітня 2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	29.04–05.05.22	
2.	Розділ 2	06.05–16.05.22	
3.	Розділ 3	17.05–23.05.22	
4.	Розділ 4	24.05–02.06.22	
5.	Охорона праці	03.05–05.06.22	

Студентка _____
(підпис)

Ольга ОЛЕФІРОВА
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Едуард НЄМЦЕВ
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

О.ОЛЕФІРОВА «Дослідження роботи електроприводу із пристроєм плавного пуску в мережі розподіленої генерації» / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» – ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк, 2022 р..

У проведеній роботі було досліджено застосування пристрою плавного пуску під час роботи електроприводу, виконана математична модель цієї системи при живленні від електричної мережі із розподіленою генерацією. Вона включає в свій комплекс альтернативні джерела енергії

Із метою виконання завдання були порівняні поміж собою різноманітні методи пуску, у результаті чого була доведена ефективність саме плавного пуску та були висвітлені переваги та межі використання у промисловості цього методу. Надалі було розраховано параметри електричного двигуна та обрана модель системи регулювання параметрів в електроприводі.

Разом із цим було досліджені та налаштування контурів моменту та швидкості на модульний оптимум, оптимізовані параметри регуляторів, передатна функція об'єкту керування, обрані датчики за моментом та напругою.

Також була розроблена модель електричного привода у додатку Matlab, так відбувалося збірка структурної схеми, яка була розроблена у третьому розділі, із компонентів підсистеми SimPowerSystem. У наслідок цього вдалося отримати наступну двох контурну систему регулювання.

Ключові слова: ПЛАВНИЙ ПУСК, MATLAB, ТИРИСТОРИ, ЕЛЕКТРОПРИВОД РОЗПОДІЛЕНА ГЕНЕРАЦІЯ, РЕГУЛЯТОР НАПРУГИ, АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА, РЕГУЛЯТОР МОМЕНТУ, РЕГУЛЯТОР ШВИДКОСТІ, ЗВОРОТНІ ДАТЧИКИ.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1. РОБОТА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ІЗ ПРИСТРОЄМ ПЛАВНОГО ПУСКУ.	10
1.1. Пристрої плавного пуску в електроприводі, їх типи та основні функції.	10
1.2. Межі застосування пристроїв плавного пуску. Нові технологічні рішення сьогодення.	13
1.3. Розробки пристроїв плавного пуску.	16
2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОДВУГИНА ТА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ДЛЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.	20
2.1 Розрахунок параметрів асинхронного двигуна, керування, яким відбувається за рахунок зміни напруги живлення на статорі.	20
2.2. Застосування тиристорного регулятора напруги, як керованого перетворювача.	25
2.3 Розрахунок схеми заміщення асинхронного електричного двигуна.	28
2.4 Побудова регулювальної характеристики.	31
2.5 Побудова електромеханічної характеристики.	34
3. РОЗРАХУНОК ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРИВОДОМ ЗА СХЕМОЮ ТПН–АД ІЗ ПІДПОРЯДКОВАНИМ УПРАВЛІННЯМ.	38
3.1 Налаштування контуру регулювання моменту.	38
3.2 Налаштування контуру регулювання швидкості.	47
4. СКЛАДАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ІЗ ПЛАВНИМ ПУСКОМ.	51

ВИСНОВКИ	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	56
ДОДАТОК А «Зауваження контролера з нормування»	58
ДОДАТОК Б «Охорона праці. Експлуатація установки електроприводу із плавним пуском, правило безпеки обслуговуючого персоналу»	59

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АДкр – асинхронний двигун із короткозамкненим ротором;

ППП – пристрій плавного пуску;

ЧРЕП – електропривод із частотним регулюванням;

РН – регулятор напруги;

ДЖ – джерело живлення;

ТПП – тиристорні пристрої пуску;

ЕП – електропривод;

ВСТУП

У виконаній роботі об'єктом досліджень виступає електропривод у мережі із розподіленою генерацією електрики.

Мета роботи – розв'язати складність у застосування систем плавного пуску електропривода, запропонувати нову модель системи регулювання координат у приводі за схемою ТП–АД, виконати практичні дослідження системи у момент плавного пуску та представити схему практичної реалізації обраного методу для асинхронного приводу із двигуном серії AIP112M2.

Виконувалися дослідження на підставі математичного опису та розробленої моделі системи регулювання, а також теоретичного опису систем керування та виміру основних параметрів.

Сучасні електричні машини й механізми, які можна зустріти у різноманітних галузях техніки повинні відрізнятися великим значення продуктивності за точністю обробки, високим рівнем автоматизації, який полегшує їх обслуговування, та разом із цим мати порівняно невисоку первісну вартість й невеликі експлуатаційні витрати, бути довговічними і надійними.

Виконання таких вимог допомагає зробити автоматизований електропривод, за сприянням якого можливо виконати широке і плавне регулювання за швидкістю виконавчого механізму, що означає забезпечення оптимальних технологічних режимів. При цьому застосування електроприводу із широким регулюванням дозволяє наблизити електричний двигун до робочого органу механізму, а отже і спростити кінематичну схему зв'язків, що в свою чергу зробить сам механізми більш точними. Під час застосування приводу й відповідної системи керування легко здійснити автоматизацію технологічного процесу, а робота без перерв електроприводу підвищує показники надійності електричних машин та механізмів, які експлуатуються [1].

Саме тому отримані у дипломній роботі результати із дослідження і подальшої розробки математичної моделі ефективного керування електричним приводом, виступають частинами загальної концепції впровадження у роботу

(оснащенням) більшості підприємств України сучасними автоматизованими електроприводами.

В наш час електродвигуни із плавним пуском вже довели свою ефективність перед прямим чи різними типами «псевдо м'якого» пуску, як наприклад, керування зміною схеми з'єднання – перемикання із зірки на трикутник чи застосування автотрансформатора, та інших методів [2].

Поширення велике у промисловості набули тиристорні пускові пристрої (ТПП), чи інша їх назва, пристрої плавного пуску (ППП), які призначені для керування пусковими режимами, а також режимами із зупинки низьковольтних трифазних асинхронних двигунів (АД) із на короткозамкненим ротором.

Випускна кваліфікаційна робота обсягом 63 машинописних сторінок, що складається зі вступу, 4-х основних розділів, переліку використаних джерел, який складається з 9 найменувань висновків, та 3 додатків . Робота містить 4 таблиці та 20 рисунків.

1. РОБОТА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ІЗ ПРИСТРОЄМ ПЛАВНОГО ПУСКУ.

1.1. Пристрої плавного пуску в електроприводі, їх типи та основні функції.

Зазвичай пуск асинхронних електродвигунів із коротко замкнутим ротором із прямим підключенням до електричної мережі, супроводжується великим значенням пускового струму, який перевищує значення номінальне у декілька разів. Значення моменту електродвигуна під час прямого пуску може досягнути значень, які істотно перевищують номінальні, що призводить до великих перевантажень і на механізми, яка приводиться у дію, і на електричну мережу живлення. Для цілої низки механізмів та елементів необхідне плавне зменшення або збільшення моменту двигуна під час розгону, гальмування або уповільнення. Для того, аби уникнути даної проблеми застосовуються спеціальні пристрої пуску, які дозволяють знижувати пускове значення струму й моменту електродвигуна.

Інтеграція в електропривод пристрою плавного пуску дозволяє наступне:

- 1) виконувати так званий «м'який пуск», тобто без істотних поштовхів;
- 2) обмежувати пікові механічні навантаження і електродвигуна і самого механізму;
- 3) обмежувати значення пускового струму;
- 4) уникнути пікові струму при перемиканні навантажень;
- 5) підвищувати значення коефіцієнту потужності;

6) зменшувати кількість або взагалі уникати використання муфт ковзання, а також гідромуфт;

7) економити електроенергію при роботі двигуна у режимі номінальному та без навантаження;

8) уникнути використання контакторів, чи виконувати комутацію контакторів без струму.

Плавні пристрої забезпечують функції керування:

– захист від аварійних та близьких до аварійних режимів, виконувати діагностику під час пуску, та у робочому режимі,

– пуск без удару, тобто пуск із зниженим значенням пусковим моментом із найбільш сприятливим режимом для приводного механізму – режим гальмування та зупинки.

Пуск без виникнення удару застосовується подачею напруги живлення на асинхронний двигун за експонентним законом. Під час цього значення пускового моменту може знижуватися у 7–10 разів, якщо порівнювати із прямим пуском. Під пуском із керуванням можна розглядати також й складний пуск (або затягнутий пуск у часі), коли час пуску може регулюватися у межах $t=0.5 - 50$ (с), а також пуск із відсіканням струму, під час цього пускові струми за час пуску не можуть перевищувати заданого струмового відсічення.

В режимі «пуску із відсіканням струму» значення пускових струмів можливо встановлювати у наступних межах:

$$I_{\text{пуск}} = (1 \div 6.5) \cdot I_{\text{ном}} , \quad (1.1)$$

де: – $I_{\text{ном}}$ – номінальне значення струму двигуна

Отже результатом використання пристроїв для плавного пуску є підвищення коефіцієнту надійності роботи електричного приводу та установки в цілому.

Використання пуску із керуванням дозволяє суттєво знизити шкідливі дії динамічні на електродвигун та приводний механізм, а значить й подовжити термін служби самого привода. Стоїть завдання регулювати значення частоти обертання механізму приводу, тоді застосовують тиристорний пусковий пристрій, який дозволяє із мінімальними витратами розв'язати задачі, які пов'язані із виконанням плавного пуску та послідувочої зупинки асинхронного двигуна.

Головним завданням, яке необхідно вирішити під час здійснення пуску – отримати плавне наростання моменту, струму й частоти обертання електродвигуна. Під час застосування тиристорного пускового пристрою забезпечується плавне наростання напруги на асинхронному двигуні, яке змінюється за обраним законом.

Попри існування великої кількості приладів досліджуваного класу, під час аналізу в [1] можна зробити висновок, що сьогодні переважна більшість приладів, які мають потужність $P_{ном} = (1 \div 450) \text{кВт}$ і напругу до $U_{ном} = 660 \text{ (В)}$ мають силову частину побудовану за одним типом схеми та відповідно мають і певний стандартний функціональний набір. Така схема відома, як тиристорний регулятор напруги із фазовим керуванням.

Під час аналізу у [1, 3] функцій виконання завдань цими пристроями різних марок, було відмічено, що більшість із цих приладів виконує наступні головні функції:

- керування пусковими режимами;
- управління робочими режимами;
- керування режимом зупинки;
- створювати зручний та зрозумілий інтерфейс поміж пристроєм та оператором;
- створювати інтерфейс поміж самим пристроєм та приладами керування верхнього рівня автоматизації;

Також, окрім наведених функцій керування режимами пуску та режимами гальмування приводи, пристрої плавного пуску забезпечують виконання захисту асинхронних двигунів та захисту тиристорного пускового пристрою від небезпечних режимів. До цих функцій захисту варто віднести унебезпечення від наступних чинників [1-3]:

- від вихідного короткого замикання тиристорного пускового пристрою;
- від перевантаження за струмом під час робочого режиму роботи;
- від заклинювання та стопоріння валу асинхронного двигуна під час здійснення пуску;
- від неприпустимого зменшення значення вхідної напруги на вході тиристорного пускового пристрою;
- від обриву фаз двигуна та пристрою;
- від неприпустимого збільшення вхідної напруги у тиристорному пусковому пристрої;
- від несиметричних вхідних напруг;
- від не спрацювання шунтуючого контактора, якщо він передбачений схемою;
- від пробоя у силовому тиристорі;
- від зворотного чергування вхідних фаз;
- від втрати керованості тиристором.

Також додатково передбачена функція теплового захисту електродвигуна [2]:.

1.2. Межі застосування пристроїв плавного пуску. Нові технологічні рішення сьогодення.

Сьогодні важко уявити якусь галузь промисловості, де б не застосовувались пристрої плавного пуску. Для прикладу можна розглянути деякі із них:

1) Пристрої, які використовують відцентрову силу (або центрифуги), що мають видно велике значення моменту інерції, а отже вимагають тривалого часу на розгін. Окрім того, можуть містити й кінематичні передачі. Тому використання плавного пуску захищає їх від перевантажень [4].

2) Електропривод ліфтів або підйомних механізмів, завдяки пристроям ПП можна підвищити плавність пересування людей у кабіні та переміщення вантажу відповідно.

3) Технологічні прилади, які слугують для обробки матеріалів текстильної промисловості.

4) Вентилятори, які за конструкцією подібні до центрифуги, які мають також велике значення інерції, а значить вимагають тривалого часу на розгін. Під час виконання прямого пуску існує велике навантаження на саму електромережу та перевантаження кінематичних складових (наприклад, на ремінній передачі), а також у підшипниках в той час як плавний пуск ці проблему вирішує [1,4]:

5) Навантаження млина здатне змінюватися в широких діапазонах, при цьому потребуючи високого рівня пускового моменту. Тут часто використовують електричні приводи із АД з фазним ротором. Тоді, у випадку, заміну двигуна в електроприводі на АД із короткозамкненим ротором із пристроєм плавного пуску, покращуються пускові характеристики, а що найбільш головне у системі виключаються небезпечні для виробництва (з огляду пожежної безпеки) струмознімальні частини [5].

6) У насосних установках під час прямого чи ступінчастого пуску, де може виникати коливання, подібні до хвилі у середовищах, які транспортують за трубами, можуть виникати гідроудари. Тоді рекомендується застосовувати і плавний пуск і відповідно робити плавну зупинки електроприводу.

7) Компресори, які приводяться в приводну дію через редуктори або будь-які інші види силових передач. Тоді застосування плавного пуску збільшує термін їхньої служби. Значення ж пускового моменту компресорів

здатна сильно змінюватись, і залежить це від умов їхнього пуску. Прилади плавного пуску здатні задовольняти різні варіанти за характером вантаження [7-8].

8) Для транспортних підйомних механізмів необхідна плавність наростання за моментом електродвигуна під час торкання й зупинки, яка знижує розгойдування навантаження. У режимі переміщення чи підйому потрібна повне значення швидкості.

9) Машини для дроблення, що заповнені матеріалом та запускаються із повним моментом завантаження. В такому випадку пристрої обмежують пікові значення навантаження, як електричні машини, так і силових передач. Плавний пуск забезпечує отримання плавного моменту, який здатний збільшуватися, це є припустимим для підшипників у випадку виникнення проблем із мастилом [8-9].

Якщо використовувати пристрої із плавним пуском у електроприводах із стрічкою, є можливість уникнути прикочування стрічки під час пуску, а також зменшити вірогідність пошкодження та перекиду вантажу, що знаходиться на самій стрічці.

В поршневих насосах, підйомниках та компресорах, котрі працюють із незмінним тиском, а у верстатах та стрічкових транспортерах із постійним значенням сили різання, навантажувальний момент $M_{\text{нв}} = \text{const}$ – зберігає своє значення постійне за всією областю частот обертання [6].

Отже дослідивши роботи приводів разом із пристроями плавного пуску, варто зазначити, що використання у системі останніх дозволяє наступне:

- 1) знизити значення пускових струмів в АД із короткозамкненим ротором;
- 2) уникнути ударних струмів у електричній мережі із живленням та АД під час пуску;
- 3) знизити теплові дії на привод;

4) уникнути механічних ударних дій на двигун, а також й на сам приводний механізм;

5) підвищити термін служби асинхронного двигуна та його експлуатаційну надійність;

6) зняти понад номінальні значення напруги у момент повної зупинки двигуна;

7) за рахунок зменшення елементів приводу, істотно скоротити і час діагностики при якихось порушеннях або несправностях [4,6,9].

1.3. Розробки пристроїв плавного пуску.

Тож далі, виконаємо розгляд типової для плавного пуску технології, яка використовується у електричних пристроях пуску сьогодення. Через свої переваги – значення кидків моменту та струму, мінімальне можливе значення пускового струму, свої комунікаційні можливості, захист комплексний приводного двигуна, метод зменшення напруги через напівпровідникові ключі, котрі є керованими мікропроцесорами, можна саме цей вид вважати кращим вирішенням для запуску електродвигуна [2].

Структурна схема такого методу (зменшення напруги через напівпровідникові ключі) пуску представлена на рис. 1.1.

Прилади плавного пуску за принципом своєї дії можна розділити на такі основні категорії:

1) Пристрої регулювання значення пускового моменту. Ці прилади контролюють тільки одну фазу у трифазному електродвигуні. Керування цією фазою виконує контроль за пусковим моментом приводного двигуна, проте значення пускового струму під час цього зменшується незначним чином. Струм, який протікає у обмотках електричного двигуна, не є контрольованим пускателем та майже є рівним значенню струма під час прямого пуску. Цей струм проходить обмотками приводного двигуна на протязі більшого часу, аніж під

час прямого пуску, що може викликати перегрів у асинхронному двигуна. Пристрої регулювання значення пускового моменту не можуть бути використані у тих випадках, коли необхідне зменшення пускових струмів та забезпечення багатой кількості пусків [3].

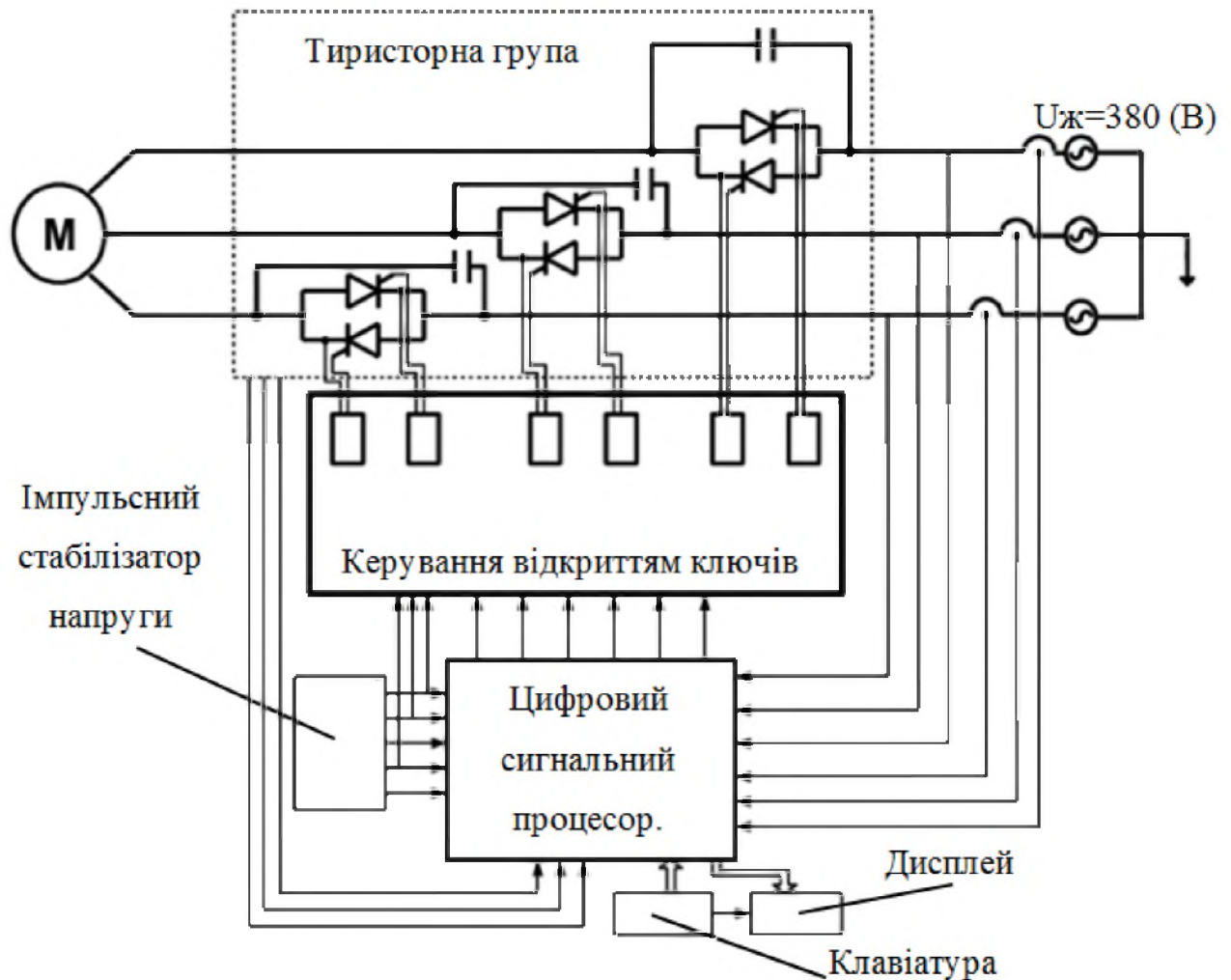


Рисунок 1.1 – Метод зменшення напруги через використання напівпровідникових ключей

2) Пристрої регулювання напруги без зв'язку зворотного за струмом. Ці прилади здатні автоматично змінювати вихідне значення напруги у відповідності до значення, яке є заданим оператором під часу пуску та не мають зворотного сигналу зв'язку від приводного двигуна. Ці прилади можуть відповідати стандартним вимогам за механічними та електричними

характеристиками, які ставляться до пускачів плавного пуску та керують значенням напруги у двох, або навіть в усіх трьох фазах асинхронного двигуна.

Здійснення пуску відбувається оператором через початкове завдання напруги й часу збільшення значення напруги до номінального. Також ці пристрої виконують обмеження за пусковим струмом, проте цей процес заснований на зменшенні напруги під час пуску. Ці прилади забезпечують регулюванням уповільненням, при цьому знижуючи плавно напругу у режимі зупинки, а отже підвищуючи тривалість його [4-5].

3) Пристрої регулювання напруги із застосуванням зворотного зв'язку за струмом. Дані регулятори є більш розвиненим пристроями у порівнянні із описаними вище. Отримують інформацію за струмом приводного двигуна та за допомогою неї роблять зупинення зросту напруги під час пуску, коли струм має поздовжнє значення. Також даними про поточне значення струму можуть бути корисними для захисту від небезпечних процесів, до прикладу, як дисбалансу фаз, перевантаження, перегрів та інші.

4) Пристрої регулювання струму із наявним зворотним зв'язком. Ці прилади сьогодні користуються найбільшим попитом серед пристроїв плавного пуску. Такі прилади виконують регулювання струму, а не напруги. Керування пряме саме за струмом дозволяє виконувати точне регулювання пуском і разом з цим, має просте програмування й налаштування.

Якщо порівнювати із налаштуванням параметрів, то більшість даних, які необхідно встановлювати під час розробки програми для пристроїв регулювання напруги, у регуляторах за струмом вже встановлено автоматично.

Для прикладу на рис. 1.2 показано зовнішній вигляд блок та параметри для налаштування регулятора плавного пуску [6-7].

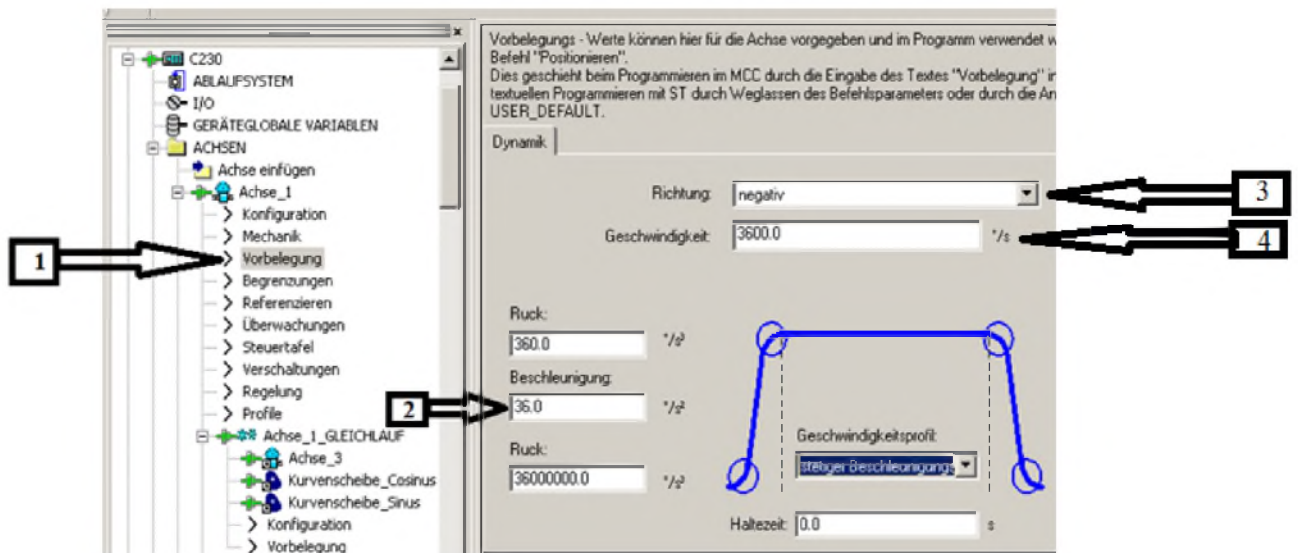


Рисунок 1.2 – Приклад застосування регулятора із обмеженням
Позначення до рис. 1.2:

1. Вісь 1 (на рис. 1.2 Аche 1) – Прийняття значень за стандартом (Vorbelegung)

2. Прискорення (на рис. 1.2 Beschleunigung) – Чим більше прискорення, тим більший поштовх (або ривок) роблять шестірні (тобто відсутній плавний пуск). Чим менше – тим більш плавний пуск відбувається (без істотного ривку).

3. Вибір напрямку (на рис. 1.2 Richtung) – це можливість змінювати напрямок «negative/positive», слід мати на увазі, що рух переміщення обмежено індуктивними датчиками.

4. Вибір значення швидкості (на рис. 1.2 Geschwindigkeit) значення швидкості також матиме свою граничну межу, яка розрахована виходячи з міцності обладнання та потужності двигунів.

2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОДВУГИНА ТА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ДЛЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.

2.1 Розрахунок параметрів асинхронного двигуна, керування, яким відбувається за рахунок зміни напруги живлення на статорі.

Асинхронний електродвигун виступає складною нелінійною та динамічною ланкою. Проте, для певних способів керування за конкретними припущеннями можливо істотно структуру АД спростити. Під час керування за допомогою регулятора напруги (РН) електродвигун можливо представити в вигляді показаному на рис. 2.1.

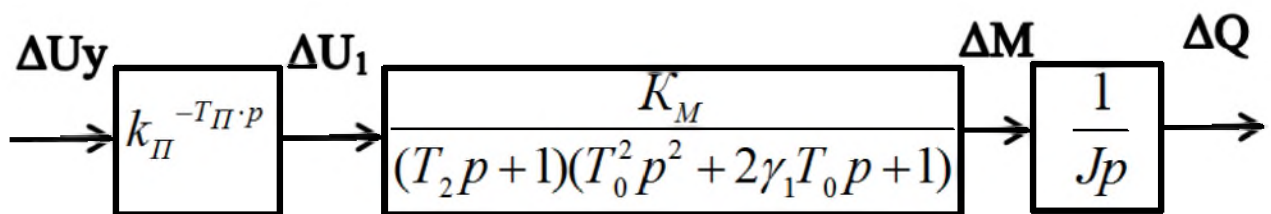


Рис. 2.1 – Математичне представлення асинхронного електродвигуна

За даними вхідного завдання до дипломної роботи, було обране для розрахунків двигун АР112 М2 із наступними параметрами, які представлені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Електромеханічні параметри асинхронного двигуна

Назва параметру	Значення, одиниця виміру
Потужність номінальна двигуна	$P_n = 7.5 \text{ (кВт)}$
Номінальна напруга	$U_{1\text{д.н}} = 380 \text{ (В)}$
Момент інерції	$J_\phi = 0.185 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}$
Кількість пар полюсів	$p = 2$
ККД	$\eta = 87.5 \text{ (\%)}$

Коефіцієнт потужності	$\cos(\varphi) = 0.883$
Фактична частота обертання валу N_ϕ	$N_\phi = 2860 \text{ (об / хв)}$
Відношення пускового до номінального моменту	$\frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}} = 2.25$
Співвідношення значення пускового та номінального струму	$\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}} = 7.5$

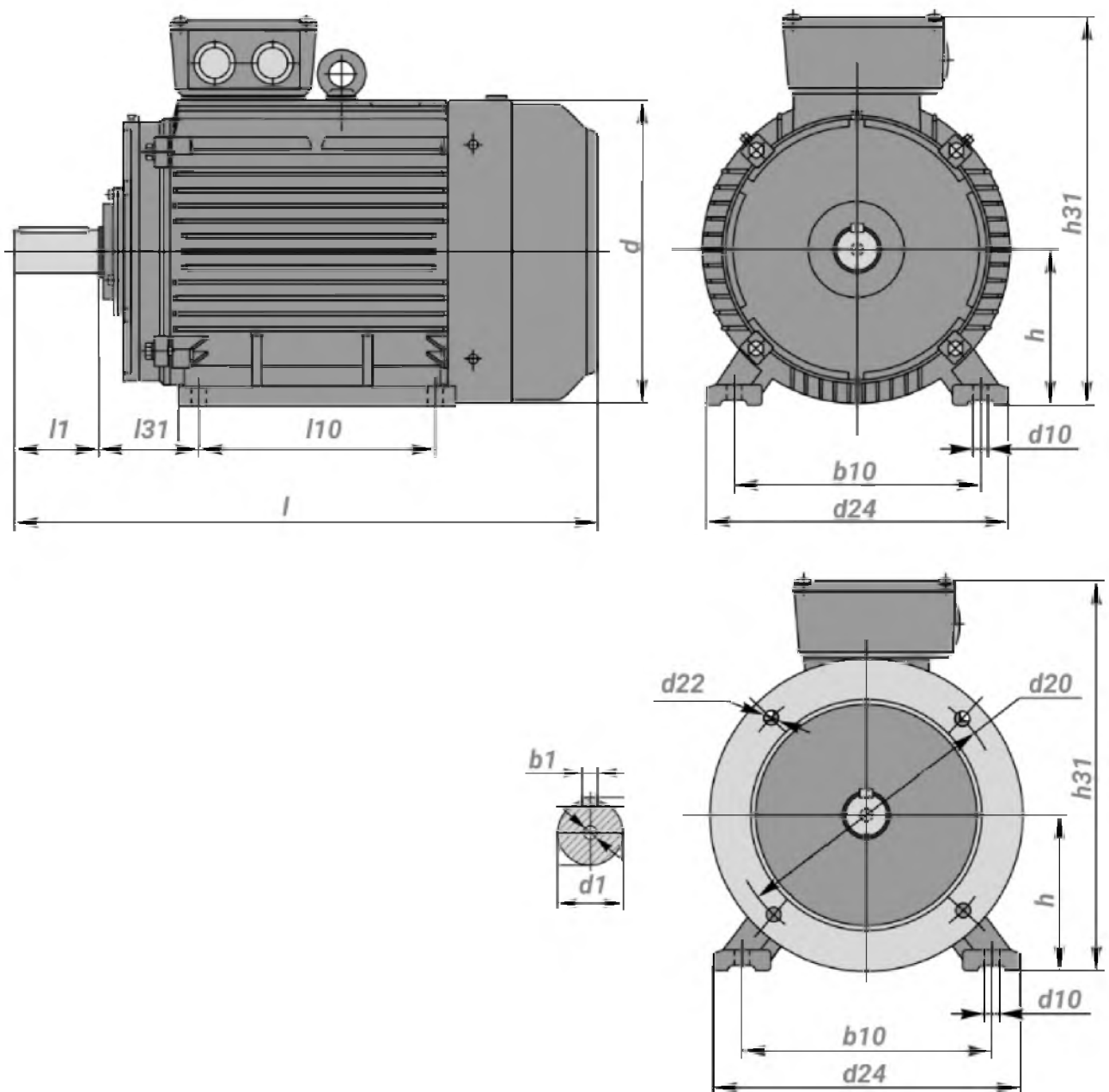


Рисунок 2.2 – Тривимірна модель асинхронного електродвигуна типу AIP112M2 із габаритними розмірами

Контур регулювання за напругою (рис. 2.1) електричного двигуна приймає вигляд:

$$W_{E.H}(p) = \frac{1}{Jp} \cdot \frac{k_M}{(T_2 p + 1) \cdot (T_0^2 p^2 + 2\mu_1 T_0 p + 1)} \quad (2.1)$$

Тоді значення коефіцієнту передачі за моментом (k_M) визначається, як відношення пускового моменту до номінальної напруги двигуна:

$$k_M = \frac{M_{\text{пуск}}}{U_{\text{д.н}}}, \quad (2.2)$$

де: – $M_{\text{пуск}}$ – значення пускового моменту.

Значення $M_{\text{пуск}}$ розраховується при відомому значенні номінального моменту $M_{\text{ном}}$, в свою чергу це значення можна знайти при відомій номінальній швидкості (ω_n) тоді

$$\omega_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_n}{60} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 1430}{60} = 149.81 \text{ (рад / с)} \quad (2.3)$$

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{7.5 \cdot 10^3}{149.81} = 50.07 \text{ (Н} \cdot \text{м)} \quad (2.4)$$

Звідси значення $M_{\text{пуск}}$ дорівнює:

$$\frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}} = 2.25 \quad (2.5)$$

$$M_{\text{пуск}} = 2.25 \cdot M_{\text{ном}} = 2.25 \cdot 50.07 = 112.66 \text{ (Н} \cdot \text{м)}$$

Звідси вираз (2.2) приймає вигляд (2.6)

$$k_M = \frac{112.66}{380} = 0.297 \quad (2.6)$$

Тоді значення сумарного момент інерції буде складатися із момент інерції двигуна (із табл. 2.1) та самого механізму визначається:

$$J = J_{\partial} + J_{\text{м}} = 0.196 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2) \quad (2.7)$$

А номінальне ковзання $S_{\text{ном}}$ визначається, як:

$$S_{\text{ном}} = \frac{w_c - w_{\text{ном}}}{w_c} = \frac{1500 - 1430}{1500} = 0.045(\text{в.о.}) = 4.5 \text{ (\%)} \quad (2.8)$$

де: w_c – значення синхронної швидкості обертання двигуна, яку можна знайти за (2.9)

$$w_c = \frac{60 \cdot f_{\text{м}}}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \quad (2.9)$$

Ще одним важливим параметром є критичне ковзання $S_{\text{кр}}$, що знайдемо із (2.10)

$$S_{кр} = S_{ном} (m_{кр} + \sqrt{m_K^2 - 1}) = 0.045 \cdot (2.25 + \sqrt{2.25^2 - 1}) = 0.118 \text{ (в.о.)} = 11.8 \text{ (\%)} \quad (2.10)$$

Значення постійної часу затухання періодичної складової моменту (T_0) із (2.1), визначається:

$$T_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_m} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.003(c) = 3(мс) \quad (2.11)$$

Значення постійного часу аперіодичної складової моменту (T_2) із (2.1), знаходимо:

$$T_2 = \frac{1}{2 \cdot \mu_2 \cdot \pi \cdot f_m} = \frac{1}{2 \cdot 0.214 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.0139(c) = 13.9(мс) \quad (2.12)$$

де: μ_2 , μ_1 – значення коефіцієнтів згасання вільних складових моменту, які можна знайти за:

$$\mu_1 = \frac{S_{кр} \cdot \delta}{2} = \frac{0.118 \cdot 0.095}{2} \approx 0.005 \quad (2.13)$$

$$\mu_2 = S_{кр} \cdot 2 = 2 \cdot 0.005 = 0.01$$

де: δ – значення відносної помилки лежить у межах 0.05÷0.12.

Тепер після того, як розраховані основні параметри контуру напругу, нарешті можна представити передавальну функцію регулятора напруги, що має вигляд:

$$\begin{aligned}
 W_{E.H}(p) &= \frac{0.297}{0.196 \cdot (0.0139p + 1) \cdot (0.003^2 p^2 + 2 \cdot 0.005 \cdot 0.003 p + 1)} = \\
 &= \frac{0.297}{0.0145 \cdot 10^{-6} \cdot p^3 + 0.011 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 + 0.142 \cdot 10^{-2} \cdot p + 0.0226}
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

2.2. Застосування тиристорного регулятора напруги, як керованого перетворювача.

Регулювання за напругою у тиристорному перетворювачі виконується завдяки тиристорним однофазним комутувальним елемента із різноманітними схемами ввімкнення діодів тиристорів. Свого найбільшого розповсюдження отримали тиристорні перетворювачі, які виконані із двох тиристорів VS_1 та VS_2 , що включені зустрічно-паралельно у схемі (на рис. 2.3) із поданням імпульсів управління на тиристор, до анода котрого у поточний момент часу прикладена позитивну за знаком напругу.

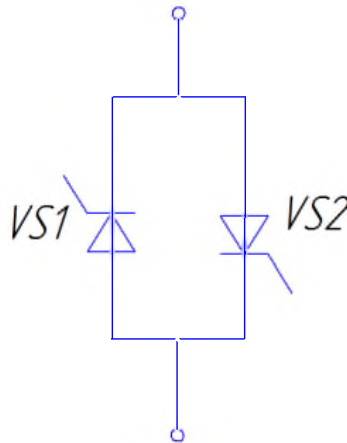


Рисунок 2.3 – Однофазний тиристорний перетворювач, який увімкнено зустрічно–паралельно

Дані тиристорні групи дозволяють отримати комутацію безконтактну у ланцюгах обмоток ротора та статора АД (із короткозамкненим ротором), а також регулювати значення напруги, яка підводиться до обмоток. Виконавши

аналіз схеми побудови таких тиристорних груп було відмічено, що свого розповсюдження отримали ті, які укладені у кожну фазу за напругою живлення, в залежності від з'єднання статора – в трикутник або зірку. В дипломній роботі був обраний метод з'єднання у зірку без нульового проводу, схем підключення представлена на рис. 2.4. [2-5].

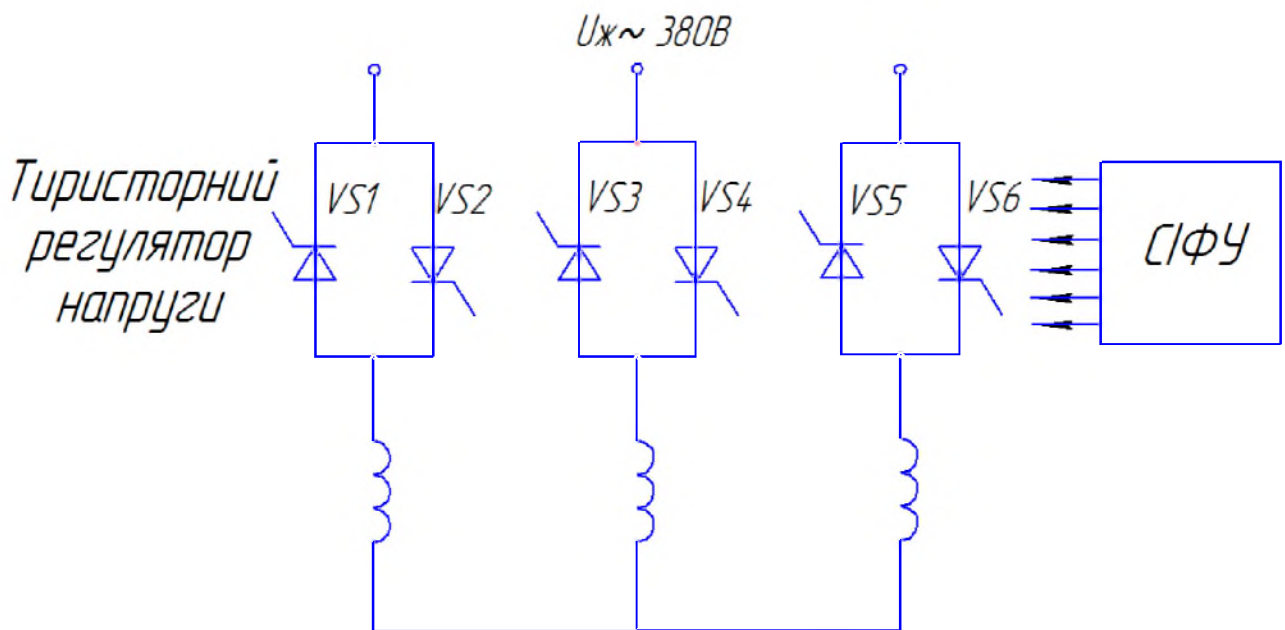


Рис. 2.4 – Схема включення ТКЕ при включенні статора обмоток двигуна в зірку

Під час дослідження було вирішено із огляду на технологічне завдання використовувати реверсивний електричний привод. В такому приводі ТКЕ включаються аналогічно контактними пусками, як показано на рис. 2.3 а. У такій схемі при умовному обертанні значення двигуна "Вперед" бере участь ТКЕ з тиристорами VS5 – VS6, а при напрямі "Назад" – групи із тиристорами VS7 – VS8. Тиристорні перетворювачі, які застосовують в електричному приводі, використовують і для виконання динамічного гальмування.

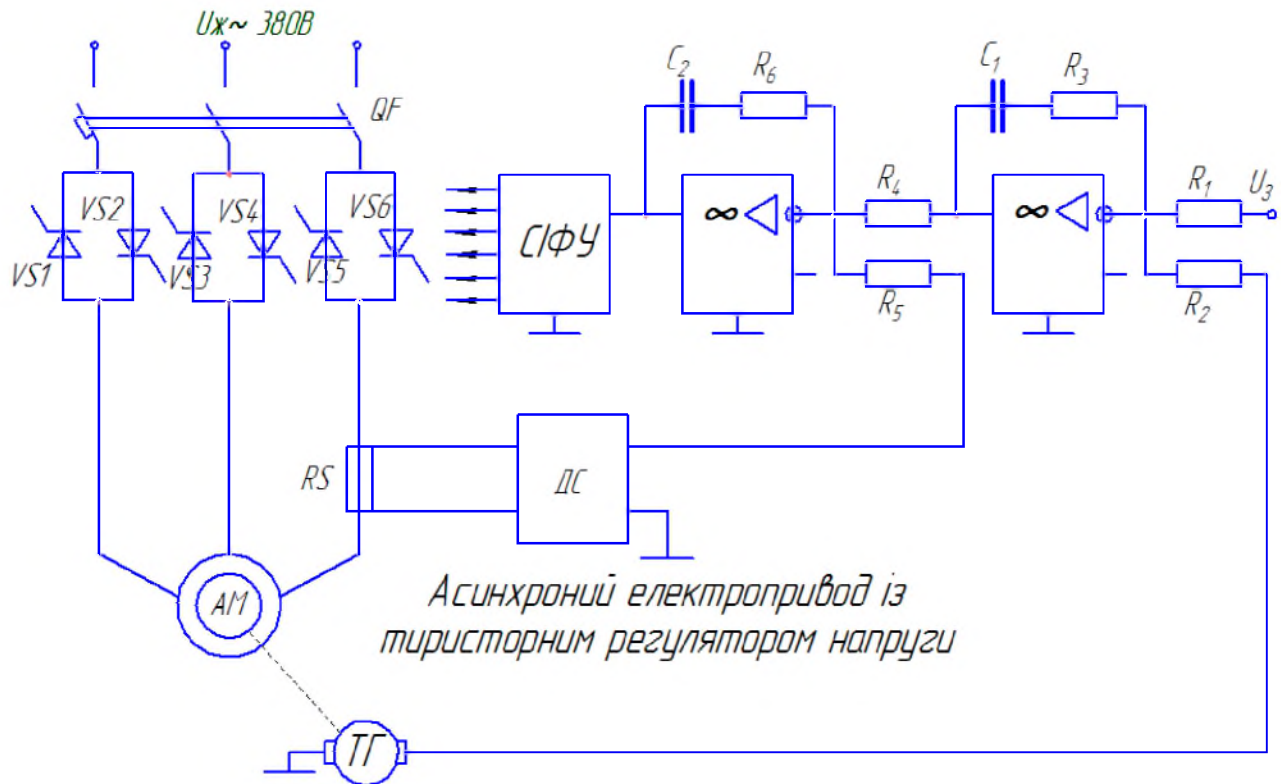


Рисунок 2.5 – Схема підключення тиристорних груп у реверсивний електропривод

У реверсивному електроприводі із тиристорним регулятором вмикаються за аналогією до контактних пускачів, як наведено на рис. 2.3. В цій електричній схемі під час умовного напрямку обертання на валу електродвигуна "Напрямок руху вперед" вмикається тиристорна група із назвою «VS₅»– «VS₆», а під час напрямку " Напрямок руху назад " – із тиристорами VS7 - VS10 [7].

Включення потрібних тиристорних груп або окремих тиристорів виконується системою фазових імпульсів керування тиристорами (за СІФК), яка забезпечує видання імпульсів керування на необхідні тиристори.

Аналіз роботи тиристорних перетворювачів ускладнений через те, що вхідна напруга є функцією і кута керування $\alpha_{\text{кут}}$, і кута навантаження $\varphi_{\text{нав}}$.

$$\varphi_{\text{нав}} = \arctg\left(\frac{x_e}{R_e}\right) \quad (2.15)$$

де: x_e – значення еквівалентного індуктивного опору навантаження (рис. 2.5.б).

r_e – значення еквівалентного активного опору навантаження (рис. 2.5.б).

Схема заміщення асинхронного двигуна, для розрахунку параметрів представлена на рис. 2.5.

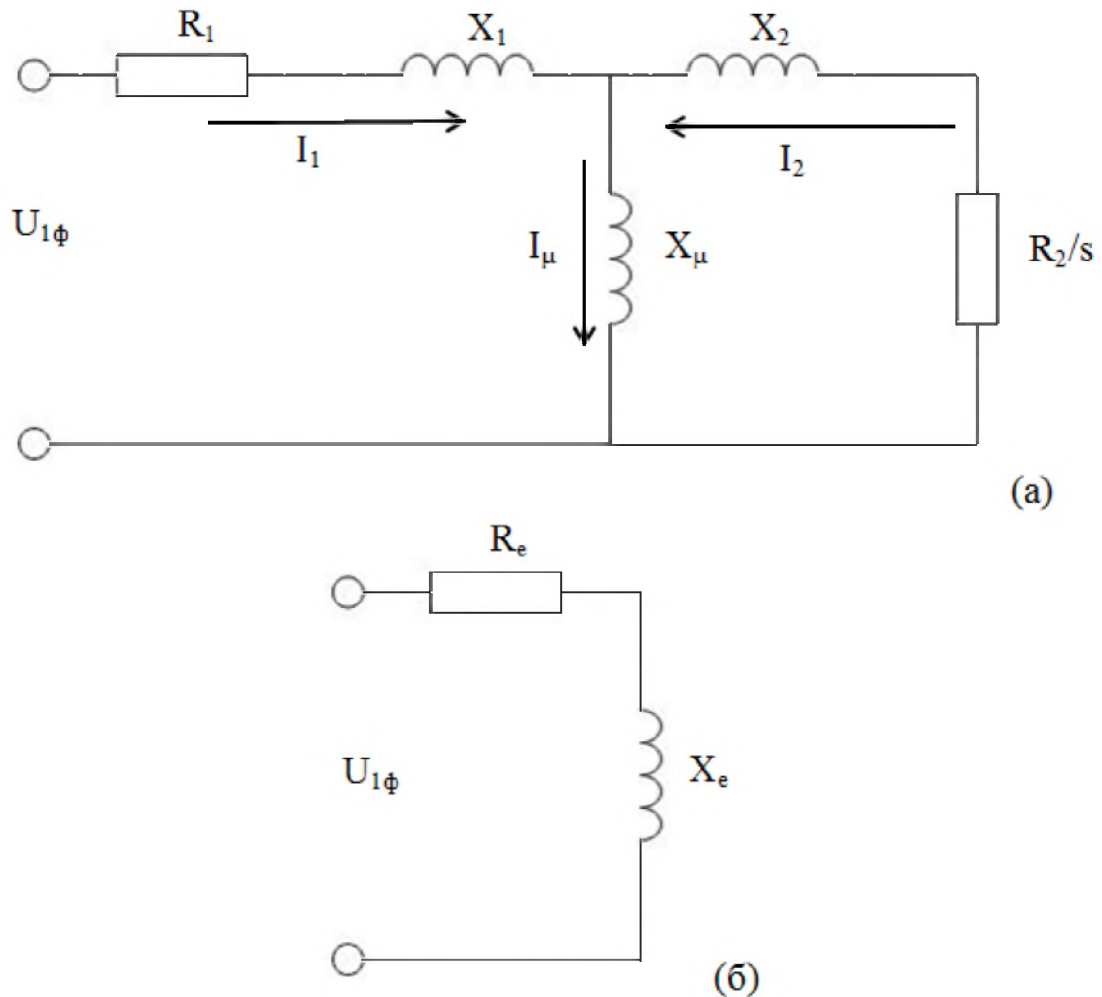


Рисунок 2.5 – Еквівалентна схема асинхронного електродвигуна:

а – із навантаженням; б - схема заміщення фази АД

2.3 Розрахунок схеми заміщення асинхронного електричного двигуна.

Значення еквівалентних опорів визначається за (2.16).

$$X_e = \left(\frac{R_2'}{s} \right)^2 \frac{c_1}{x_\mu} + c_2^2 X_1 + c_2 X_2', \quad (2.16)$$

$$R_e = \frac{R_1}{x_\mu^2} \cdot \left(\frac{R_2'}{s} \right)^2 + c_2^2 R_1 + \frac{R_2'}{s},$$

де: – X_1 , R_1 – значення індуктивного та активний опір статора двигуна, за (2.17) та (2.21);

$$R_1 = \frac{3 \cdot (U_{ном})^2 \cdot (1 - S_{ном}) \cdot \eta}{2 \cdot (\sqrt{3})^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{S_{кр}}\right) \cdot M_{кр} \cdot P_{ном}} =$$

$$= \frac{3 \cdot (380)^2 \cdot (1 - 0.045) \cdot 0.875}{2 \cdot (\sqrt{3})^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{0.118}\right) \cdot 112.66 \cdot 7.5 \cdot 10^3} = 0.075 \text{ (Ом)} \quad (2.17)$$

– X_2' , R_2' – значення приведенного індуктивний та активний опір ротора (2.18) та (2.21);

Розрахунок опору під час нерухомого ротора відбувається за умови $S = 1$.

$$R_2 = \frac{P_H}{3 \cdot I_{к.з.}^2 \cdot \eta \cdot (1 - S_{ном})} = \frac{7.5 \cdot 10^3}{3 \cdot 108.75^2 \cdot 0.875 \cdot (1 - 0.045)} \approx 0.185 \text{ (Ом)} \quad (2.18)$$

де $I_{к.з.}$ – струм короткого замикання, можна знайти (2.19):

$$I_{кз} = 7.5 \cdot I_{ном} = 7.5 \cdot 14.5 = 108,75 \text{ (А)} \quad (2.19)$$

Тоді значення приведенного опору роторі буде визначатися за допомогою (2.18), та становити:

$$R_2' = k_u \cdot k_i \cdot R_2 = 12 \cdot 0.5 \cdot 0.185 = 1.11 \text{ (Ом)} \quad (2.20)$$

де $k_i = 0.5$ – значення коефіцієнту приведення струму ротора двигуна;

$k_u = 12$ – значення коефіцієнту трансформації за напругою у асинхронному двигуні під час нерухомого ротора (при $S=1$).

У цей же час індуктивні опори статора, ротора та взаємної індуктивності рівні поміж собою та визначаються за (2.21)

$$\begin{aligned} x_1 = x_\mu = x_2 &= \frac{U_{ном}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot \pi \cdot f \cdot I_{ном} \cdot (\sqrt{1 - (\cos(\varphi))^2} - \cos(\varphi) \cdot \frac{S_{ном}}{S_{кр}})} = \\ &= \frac{380}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot \pi \cdot 50 \cdot 108.66 \cdot (\sqrt{1 - (0.883)^2} - 0.883 \cdot \frac{0.045}{0.118})} = 0.1793 \text{ (Ом)} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Значення індуктивного опору приведененого до обмотки статора, знаходимо за (2.22)

$$x_2' = x_2 \cdot k_i \cdot k_u = 0.1793 \cdot 0.5 \cdot 12 = 1.0758 \text{ (Ом)} \quad (2.22)$$

Звідси можна встановити і значення коефіцієнтів c_1 та c_2 із (2.16), яке буде дорівнювати:

$$c_1 = \frac{x_1}{x_\mu} + 1 = \frac{0.1793}{0.1793} + 1 = 2 \text{ (в.о.)} \quad (2.23)$$

$$c_2 = \frac{x_2'}{x_\mu} + 1 = \frac{1.0758}{0.1793} + 1 = 7 \text{ (в.о.)} \quad (2.24)$$

А тепер маючи значення коефіцієнтів c_1 та c_2 , опорів індуктивних та активних схеми заміщення (рис. 2.5.а) можна знайти чисельні параметри еквівалентної схеми (рис. 2.5.б):

$$X_e = \left(\frac{R'_2}{s} \right)^2 \frac{c_1}{x_\mu} + c_2^2 X_1 + c_2 X'_2 =$$

$$= \left(\frac{1.11}{1} \right)^2 \frac{2}{0.1793} + 7^2 \cdot 0.1793 + 7 \cdot 1.0758 = 30.06 \text{ (Ом)} \quad (2.25)$$

$$R_e = \frac{R_1}{x_\mu^2} \cdot \left(\frac{R'_2}{s} \right)^2 + c_2^2 R_1 + \frac{R'_2}{s} =$$

$$= \left(\frac{1.11}{1} \right)^2 \frac{0.075}{0.1793^2} + 7^2 \cdot 0.075 + \frac{1.11}{1} = 7.66 \text{ (Ом)} \quad (2.26)$$

2.4 Побудова регулювальної характеристики.

Характеристики групи тиристорних перетворювачів можна розглядати як характеристики $U_{\text{TH}} = f(\varphi, \alpha)$. Як правило вихідну напругу тиристорів складають тільки перші її гармоніки, тому що гармоніки вищих порядків, впливають незначно на момент електродвигуна. Під час аналізу застосують універсальні характеристики $U_1' = \frac{U_1}{U_{\text{ном}}} = f(\alpha, \varphi)$.

Для електричного приводу із куруванням є доцільним побудувати характеристики параметрів керуванням $U_1' = f(\alpha)$ під час встановлених кутів навантаження, де $\varphi = \text{const}$.

Аналіз установлених режимів в системі тиристорний перетворювач – АД виконується за виразом:

$$U_{\kappa} = (U_{\text{зд}} - k_{\text{зв}} \cdot \omega) \cdot k_n = |(10 - 0.067 \cdot 149.81) \cdot 10| = 0.373 \text{ (В)} \quad (2.27)$$

де: $U_3 = 10\text{В}$ – значення напруги за завдання швидкості;

$k_{\text{зв}}$ – коефіцієнт за зворотнім зв'язком по швидкості регулювання;

U_{κ} – напруга керування тиристорної групи;

$k_n = 10$ – параметр коефіцієнту посилення підсилювача.

$$k_{\text{зв}} = \frac{U_{\text{з.макс}}}{\omega_{\text{макс}}} = \frac{10}{149.81} = 0.067 \quad (2.28)$$

де : $w_{\text{ном}} = w_{\text{макс}} = 149.81 \text{ (рад/с)}$ – значення максимальної швидкості електричного двигуна

А згідно із характеристикою регулювання СІФК, кут регулювання тиристорною групою:

$$\alpha_{\kappa} = \alpha_{\text{зр}} - k_{n.\text{СІФК}} \cdot U_{\kappa} = 150 - 15 \cdot 0.373 = 144.405 \text{ (В)} \quad (2.29)$$

де: $\alpha_{\text{тр}} = 150^\circ$ – значення граничного кута керування при застосуванні тиристорної групи, яка має вигляд включення зустрічно–паралельно, як і у досліджуваній схемі (рис. 2.4)

$$k_{n.\text{СІФК}} = \frac{\alpha_{\text{зр}}}{\Delta U_{\kappa}} = \frac{150}{10} = 15 \quad (2.30)$$

Тоді із (2.27) є можливість скласти рівняння для виразу залежності швидкості двигуна від кута керування, тобто для $w(\alpha)$ – (2.31), а потім із використанням пакету Mathcad і побудувати характеристику.

$$\omega_{\partial}(\alpha) = \omega_0 - \Delta\omega_{ном} = \frac{U_{з.макс}}{k_{зб}} - \frac{\alpha_{зр} - \alpha_{\partial}}{k_{зб} \cdot k_{\kappa} \cdot k_{н.СІФК}} =$$

$$= \frac{10}{0.067} - \frac{150 - \alpha}{0.067 \cdot 10 \cdot 15} = 149.25 - \frac{150 - \alpha}{10.05} \quad (2.31)$$

Вираз (2.31) дозволяє виконати побудову електромеханічних та механічних характеристик у замкнутій системі АД–ТПН за певних кутів α побудовані характеристики розімкненої системи $\omega=f(\alpha, M)$, при значень α із урахуванням кута навантаження $0^\circ < \varphi < \alpha_{тр} = 150^\circ$.

Таблиця 2.2 – Дані для побудови регулювальної характеристики

Поточне значення кут керування $\alpha,^\circ$	Швидкість, ω (рад/с)
0	134.325
10	135.32
20	136.315
30	137.31
40	138.305
50	139.3
60	140.295
70	141.29
80	142.285
90	143.28
100	144.275
110	145.27
120	146.265
130	147.26
140	148.255
150	149.25

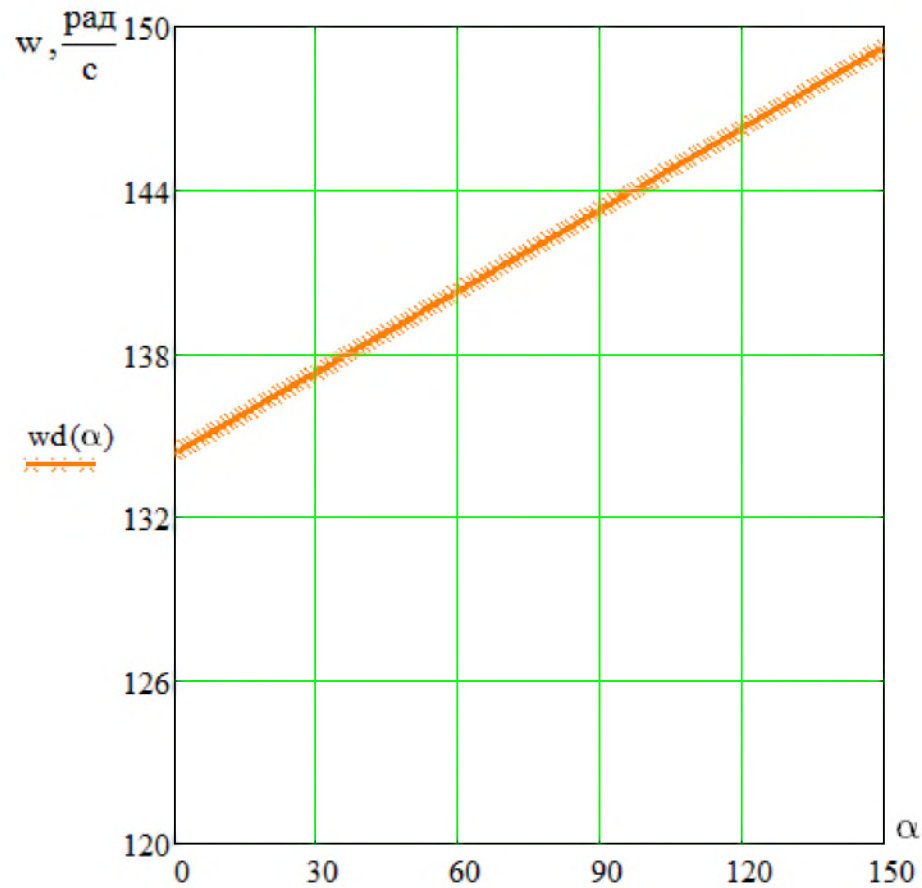


Рисунок 2.6 – Регулювальна характеристика швидкості – від кута відкриття тиристорів – α

2.5 Побудова електромеханічної характеристики.

Для отримання виразу механічної залежності варто представити електромагнітного моменту асинхронного двигуна.

$$M = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 s \cdot \left(\frac{R_2'}{s} + R_1 \right)^2 + x_{\kappa}^2} = \frac{3 \cdot U_{ном}^2 \cdot U_{1*}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 s \cdot \left(\frac{R_2'}{s} + R_1 \right)^2 + x_{\kappa}^2} \quad (2.32)$$

Вираз (2.32) можна скоротити для зручності розрахунків та подальшої побудови залежностей:

$$M_{cp} = \frac{3 \cdot U_{ном}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 s \cdot \left(\frac{R_2'}{s} + R_1 \right)^2 + x_\kappa^2} \quad (2.33)$$

де M_{cp} – момент АД, котрий можливо визначити за допомогою номінальної напруги $U_{ном}$, – у момент повністю відкритого тиристорного перетворювача для значення середньої швидкості ω_{cp} у заданому регульовальному діапазоні швидкості;

x_κ – значення індуктивного опору розсіювання, визначається як:

$$x_\kappa = x_2' + x_1 = 1.0758 + 0.1793 = 1.255 \text{ (Ом)} \quad (2.33)$$

Тоді залежність механічної характеристики приймає вигляд:

$$\begin{aligned} M(U_\phi) &= \frac{3 \cdot U_\phi^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + x_\kappa^2} = \\ &= \frac{3 \cdot U_\phi^2 \cdot 1.11}{149.26 \cdot \left(0.075 + \frac{1.11}{0.045} \right)^2 + 0.1793^2} = 0.000365 + U_\phi^2 \text{ (Н} \cdot \text{м)} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Складемо таблицю 2.3 для подальшої побудови електромеханічної характеристики $M(U_\phi)$.

Таблиця 2.3 – Дані для побудови електромеханічної характеристики

Поточне значення фазної напруги, U_ϕ , В	Момент, М (Н*м)
0	0
38	0.526
76	2.105

114	4.736
152	8.42
190	13.157
228	18.946
266	25.787
304	33.681
342	42.628
380	52.627

За даними табл. 2.3 будемо залежність рис. 2.7 – електромеханічну характеристику $M(U_\phi)$

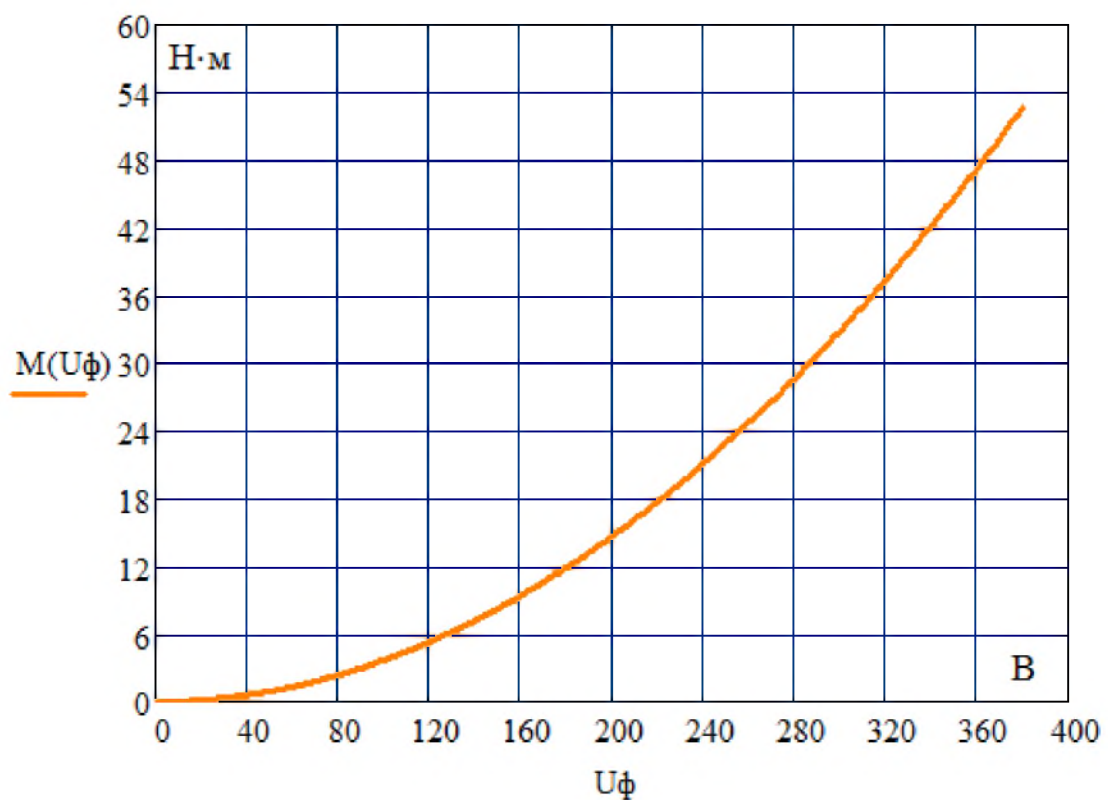


Рисунок 2.7 – Електромеханічна характеристика $M(U_\phi)$

Аналіз режимів динамічних в електричному асинхронному приводі ускладнений через виконання обліку перехідних електромагнітних процесів. Електромагнітний момент самого двигуна, який підключений до електромережі

живлення, під час перехідного режиму за утриманням постійної швидкості складається наступних складових

$$M_{EM} = M_{вст} + \sum_{i=1}^{i=3} M_{i,n}(t) + \sum_{i=1}^{i=2} M_{i,a}(t) \quad (2.35)$$

де: $M_{i,a}(t)$, – аперіодична вільна складова моменту;

$M_{вст}$ – встановлене значення моменту;

$M_{i,n}(t)$ – періодична вільна складова моменту.

складність самого асинхронного двигуна, нелінійного об'єкта. І саме тому система приводу синтезується при певних припущеннях в описі математичної моделі. Приймаючи до увагу, що самим важким режимом роботи асинхронного двигуна є робота під час малих швидкостей, у момент коливання швидкості та моменту через електромагнітні перехідні процеси, які мають повільний затухаючий характер. Систему електроприводу налаштовують за нульовою швидкістю (тобто при $\omega=0$), а контур моменту під час пускового значення моменту (тобто $M = M_{\text{пуск}}$). При такому режимі рівняння має вигляд:

$$M(t) = M_{\text{пуск}} + M_{\text{пуск}} \cdot e^{-(\mu_1 + \mu_2) \cdot \omega_0 \cdot t} - M_{\text{пуск}} \cdot (\cos \omega_0 t (e^{-\mu_2 \omega_0 t} + e^{-\mu_1 \omega_0 t}) + \sin \omega_0 t (e^{-\mu_1 \omega_0 t} - e^{-\mu_2 \omega_0 t})) \cdot \frac{1 + \mu_1 \mu_2}{\mu_2 - \mu_1} \quad (3.1)$$

де $\omega_0 = 2\pi f$ – значення кругової частоти напруги електромережі;

μ_1, μ_2 – значення коефіцієнтів загасання за вільними складовими моменту приводного двигуна.

Як вже було описано, повний аналіз є ускладненим. Він є можливим тільки із урахуванням певних припущень, котрі приводяться на підставі певних значень (3.2):

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 0.006; \\ \mu_2 &= 0.23; \\ S_{кр} &= 0.114 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Із представлених значень можна побачити, що:

$$\begin{cases} \mu_1 \ll 1 \\ \mu_1 \ll \mu_2 \end{cases} \quad (3.3)$$

Тоді справедливим будуть вирази (3.4):

$$\begin{cases} e^{-\mu_1 \omega_0 t} \gg e^{-\mu_2 \Omega_0 t} \\ \frac{\mu_1 \mu_2 + 1}{\mu_2 - \mu_1} \approx \frac{1}{\mu_2} \end{cases} \quad (3.4)$$

або

$$e^{-t/T_1} \gg e^{-t/T_2}$$

Через те, що постійні часу за згасанням за вільними складовими у моменту є рівні, то:

$$T_1 = \frac{1}{\mu_1 \omega_0} = \frac{1}{0.006 \cdot 2 \cdot 50 \cdot 3.14} = 0.55 \text{ (с)} \quad (3.5)$$

$$T_2 = \frac{1}{\mu_2 \omega_0} = \frac{1}{0.225 \cdot 2 \cdot 50 \cdot 3.14} = 0.0153 \text{ (с)} \quad (3.6)$$

Тоді рівняння диференціальне (3.1) із урахуванням (3.5) та (3.6) набуває вигляд:

$$M(t) = M_{\text{пуск}} \cdot (1 - e^{\frac{-t}{T_1}} (\frac{1}{\mu_2} \sin \omega_0 t + \cos \omega_0 t) + e^{\frac{-t}{T_2}}) \quad (3.7)$$

Із цього виразу стає зрозуміло, що момент асинхронного електричного двигуна під час перехідного процесу може складатися із основних трьох складових:

1) встановлена складова:

$$M_{\text{вст}} = M_{\text{пуск}} \quad (3.8)$$

2) аперіодична складова, яка дуже швидко згасає через те, що T_2 – постійна часу має малі значення;

$$M_{an} = M_{пуск} e^{\frac{-t}{T_2}} \quad (3.9)$$

3) періодична складова, тобто під час коливання загасаючої:

$$M_{клев} = M_{пуск} \cdot e^{-t/T_1} \cdot \left(\frac{\sin w_0 t}{\mu_2} + \cos w_0 t \right) \quad (3.10)$$

Вираз (3.10) із малим значенням демпфування тому, що T_1 – постійна часу приймає відносно великі значення.

Отже тепер можемо провести дослідження моменту у момент режиму пуску у системі електропривода без навантаження:

$$\begin{aligned} M_o(t) &= M_{пуск} (e^{\frac{-t}{T_2}} - e^{\frac{-t}{T_1}} (\frac{1}{\mu_2} \sin w_0 t + \cos w_0 t)) = \\ &= 52.27 (e^{\frac{-t}{0.0153}} - e^{\frac{-t}{0.55}} (\cos 314 \cdot t + \frac{1}{0.224} \sin 314 \cdot t)) \end{aligned} \quad (3.11)$$

Тоді складемо таблицю змінюючи значення часу $t=0-3.5(c)$, та вимірюючи значення виразів (3.4-3.7)

Таблиця 3.1–Параметри приводу під час пускового режиму

t, c	e^{-t/T_1} , в.о	e^{-t/T_2} , в.о	$\sin(w_0 t)$, в.о	$\cos(w_0 t)$, в.о	M, Н
0	1	1	0	1	0
0,5	0.385	0	0,42	-0,915	-35,3
1	0.15	0	-0,745	0,723	42,7

1,5	0.08	0	0,945	-0,68	-21,35
2	0.034	0	-0,978	0,1	11,56
2,5	0.013	0	0,695	-0,25	-4,2
3	0.078	0	-0,2	0.823	2,2
3,5	0.001	0	0	-1	0

Перехідний процес електродвигуна під пуску та його моменту, наведені на рис.3.2

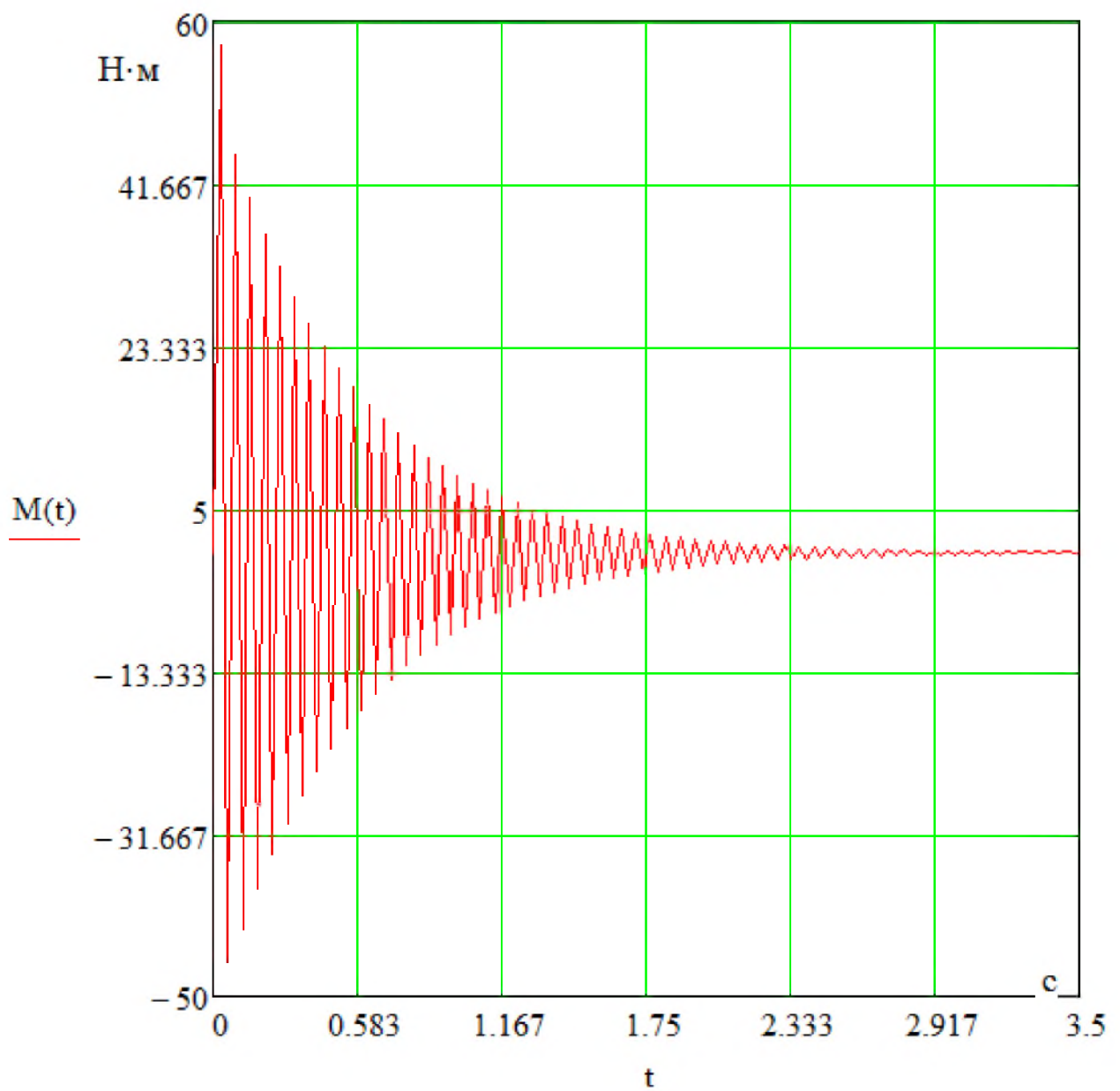


Рисунок 3.2 – Перехідний процес під час пуску

Тоді при наближеному розрахунку можна представити й передатну функцію АД у наступному виді:

$$\begin{aligned}
 W_{ed}(p) &= \frac{k_M}{(T_0^2 p^2 + 2\mu_1 T_0 p + 1) \cdot (T_2 p + 1)} = \\
 &= \frac{0.1386}{(0.0036^2 p^2 + 2 \cdot 0.0055 p + 1) \cdot (0.0153 p + 1)} = \\
 &= \frac{0.1386}{0.152 \cdot 10^{-6} p^3 + 0.02731 p + 1.536 \cdot 10^{-3} p^2 + 1}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

де: k_M є коефіцієнтом передачі асинхронного двигуна за моментом, який необхідно розрахувати за:

$$k_M = \frac{M_{\text{пуск}}}{U_{\text{ном}}} = \frac{52,7}{380} = 0,1386 \tag{3.13}$$

Тиристорна група регулювання напруги може бути представлена, як ланка із запізненням, та у вигляді передавальної функцією (3.14)

$$W_{\text{тир}}(p) = k_n \cdot e^{-\tau} = 10 \cdot e^{-\frac{p}{3}} \tag{3.14}$$

де k_n — значення коефіцієнту посилення ПП, який приймається під час куту навантаження ϕ (який був визначений у другому розділі), із урахуванням режиму, де $s=1$;

τ – стала часу чистого запізнення інвертора.

Під час роботи пристрою плавного пуску на тиристорах в електричній мережі змінного струму із значенням частоти $f=50(\text{Гц})$ стала запізнення

інвертора, яка містить усі три пари з'єднаних зустрічно-паралельно тиристорів,

$$\text{визначається, як: } \tau = 1 / 6f = \frac{10^{-3}}{3} (с)$$

Тоді, прийнявши до уваги лінеаризацію деяких параметрів у схемі ТП–АД можна виконати побудову нової, спрощеної структурної схеми двох контурної системи, представленої на рис. 3.3.

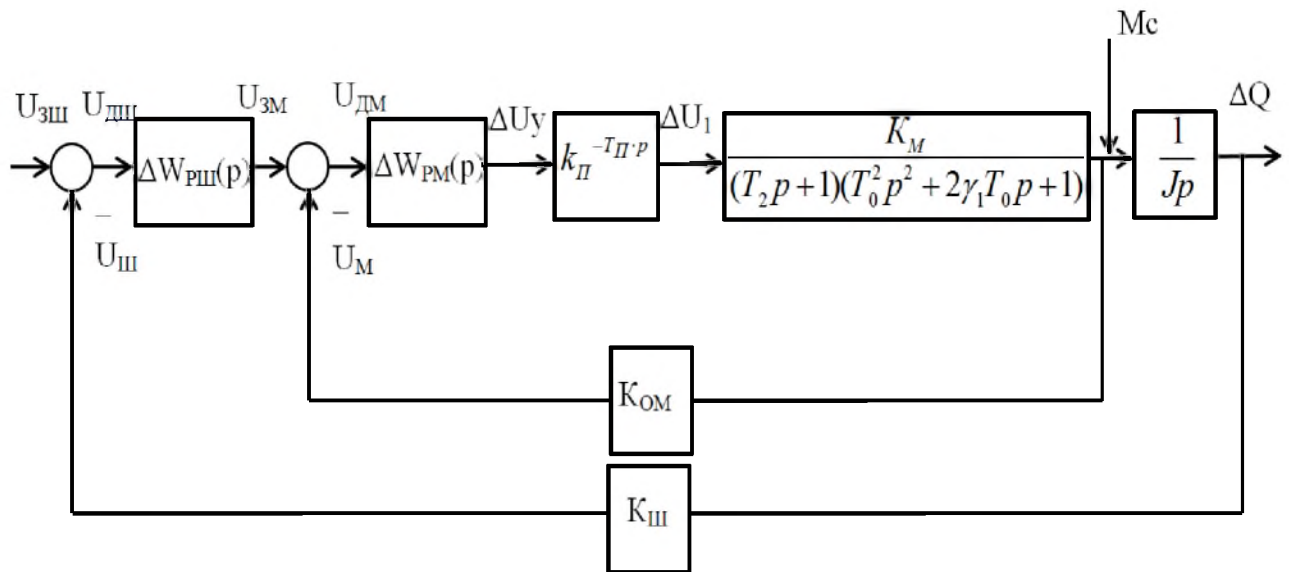


Рисунок 3.3 – Структурна схема двох контурної системи ТП–АД із контурами регулювання за моментом та швидкістю

Отже, синтез системи (рис. 3.3) виконується за технічним оптимумом, на малу сталу часу T_μ при цьому варто взяти до уваги, що складова аперіодична моменту згасає швидше за періодичну складову, тому береться стала часу T_2 , при тому, що вона й більша за сталу часу T_0 , та постійна запізнення тиристорних пристроїв, тобто:

$$T_\mu = \tau_{\text{пуск}} + T_2 = \frac{10^{-3}}{3} + 0.0153 = 0.0187(с) \quad (3.15)$$

Дія сталої часу T_0 повинна бути компенсовано. При цьому виходячи із теорії системи із підпорядкованим регулюванням за координатами, передавальна функція самого регулятора моменту має вигляд:

$$\begin{aligned} W_{PM}(p) &= \frac{1+T_0^2 \cdot p^2}{k_M \cdot k_{\Pi} \cdot k_{OM}} \cdot \frac{1}{2T_{\mu}p} = \frac{1+T_0^2 p^2}{T_I p} = \\ &= \frac{1+0.0033^2 p^2}{0.137 \cdot p} = \frac{1+9.09 \cdot 10^{-6} p^2}{0.137 \cdot p}, \end{aligned} \quad (3.16)$$

де: k_{OM} — коефіцієнт оберненого (зворотного) зв'язку за моментом, в даному випадку $k_{OM}=0.5$;

T_I — постійна часу складової інтегрування, може бути визначена за виразом (3.17).

$$\begin{aligned} T_I &= 2 \cdot k_M \cdot k_n \cdot k_{om} \cdot T_{\mu} = \\ &= 2 \cdot 0.185 \cdot 0.5 \cdot 40 \cdot 0.0177 \approx 0.137 \text{ (с)} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Із (3.16), можна зробити висновок, що регулятор моменту є диференціально–інтегральним. Цей регулятор із знайденою передатною функцією (3.16) доволі зручно аналізувати у вигляді відповідних двох ланок – інтегральної та диференціальної, тому що у такому вигляді ланка диференційна не потребує налаштування, через те, що ця передатна функція не є залежною від даних параметрів електричного приводу. Проте, важливим є те, що ця ланка не має захищеності перед перешкодами, тож її варто доповнити ще фільтром нижніх частот із наступною передавальною функцією (3.18)

$$\begin{aligned}
 W_{\text{филтр}}(p) &= \frac{1}{T_{\text{фил}}^2 p^2 + 2\xi T_{\text{фил}} p + 1} = \frac{1}{0.00135^2 p^2 + 2 \cdot 0.68 \cdot 0.00131 p + 1} = \\
 &= \frac{1}{1.456 \cdot 10^{-6} p^2 + 1.713 \cdot 10^{-3} p + 1}
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

Із урахуванням цього передавальна функція регулятора моменту (3.16) приймає вигляд (3.19).

$$\begin{aligned}
 W_{PM}^*(p) &= \frac{1 + T_0^2 \cdot p^2 +}{T_{\text{фил}}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T_{\text{фил}} \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{T_I \cdot p} = \\
 &= \frac{0.0033^2 \cdot p^2}{0.00131^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0.71 \cdot 0.0012 \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{0.133 \cdot p} = \\
 &= \frac{1}{1.463 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 + 1.723 \cdot 10^{-3} p + 1}
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

Застосування фільтра за нижніми частотами у прямому каналі регулювання за моментом здатне знижувати швидкодію усього контуру. Тоді для того, аби фільтр не впливав істотно на значення швидкодії усього контуру моменту, знайдемо сталу часу за (3.20) фільтра (Тф)

$$T_{\text{фил}} = \frac{T_0}{2} = 0.00133 \text{ (с)} \tag{3.20}$$

А, при врахуванні (3.20) можна прийняти (3.21):

$$T_{\mu} = T_2 + 2 \cdot \xi \cdot T_{\phi} + \tau_n = 0.01435 + 2 \cdot 0.71 \cdot 0.00133 + 0.00333 = 0,019 \text{ (с)} \tag{3.21}$$

Тоді приймаючи до уваги (3.16) та без урахування сталих фільтру через їх малий вплив, отримаємо передавальну функцію оптимізованого контуру за моментом:

$$\begin{aligned}
 W_{om.m}(p) &= \frac{1}{(1 + 2 \cdot T_{\mu} \cdot p(T_{\mu} \cdot p + 1)) \cdot k_{OM}} = \\
 &= \frac{1}{[1 + 2 \cdot 0.0185p(0.0185p + 1)] \cdot 0,5} = \frac{1}{0.372 \cdot 10^{-3} p^2 + 0.47 + 0.19 \cdot 10^{-1} p}
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

3.2 Налаштування контуру регулювання швидкості.

Налаштувавши контур регулювання за моментом можна переходити до зовнішнього – контуру швидкості. Під час оптимізації цього контуру можна представити передатну функцію регулятора у вигляді:

$$\begin{aligned}
 W_{PII}(p) &= \frac{k_{OM} \cdot Jp}{2 \cdot 2T_{\mu}^2 p \cdot k_{III}} = \frac{k_{OM} \cdot J}{4T_{\mu} \cdot k_{III}} = \\
 &= \frac{0.0923 \cdot 0.48p}{4 \cdot 0.0197p \cdot 0.0975} = 5.77
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

Із (3.23) стає зрозумілим, що регулятор швидкості необхідно прийняти пропорційним.

Звідси, виконуючи оптимізацію замкнутого контуру за швидкістю, по аналогію із моментом отримуємо:

$$\begin{aligned}
 W_{om.w}(p) &= W_{O,KM}(p) = \frac{1}{k_{III} \cdot (4T_{\mu}p \cdot (1 + 2T_{\mu} \cdot p(T_{\mu} \cdot p + 1)) + 1)} = \\
 &= \frac{1}{0.975 \cdot (4 \cdot 0.0187p \cdot (1 + 2 \cdot 0.0187p(0.0187 \cdot p + 1)) + 1)} = \\
 &= \frac{1}{0.572 \cdot 10^{-5} p^3 + 0.32 \cdot 10^{-3} p^2 + 0.723 \cdot 10^{-2} p + 0.975 \cdot 10^{-1}}
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

В електричному приводі із асинхронним двигуном можуть викликати проблеми вимірювання величину моменту. А одним із діючих методів реалізації датчика у контурі регулювання моменту виступає застосування пристрою обчислення, котрий дозволяє визначати моменти відомі із теоретичних основ перехідних процесів асинхронних двигунів за (3.25).

$$M = \frac{\sqrt{3}p_n(-i_A \int_0^t (u_b - (i_b - i_c)R_1 - u_c) + (i_b - i_c) \int_0^t (-i_a R_1 + u_a) dt)}{2}, \quad (3.25)$$

де p_n – кількість пар полюсів електродвигуна,

u_A, u_B, u_C – значення вимірювальних напруг, завдяки вольтметру під назвою UV

i_A, i_B, i_C – значення вимірювальних струмів, завдяки амперметрам під назвами UA

Через наведені труднощі виміру значення моменту асинхронного двигуна такі системи електричного приводу варто робити із одним контуром регулювання – швидкості, така схема представлена на рис. 3.4.

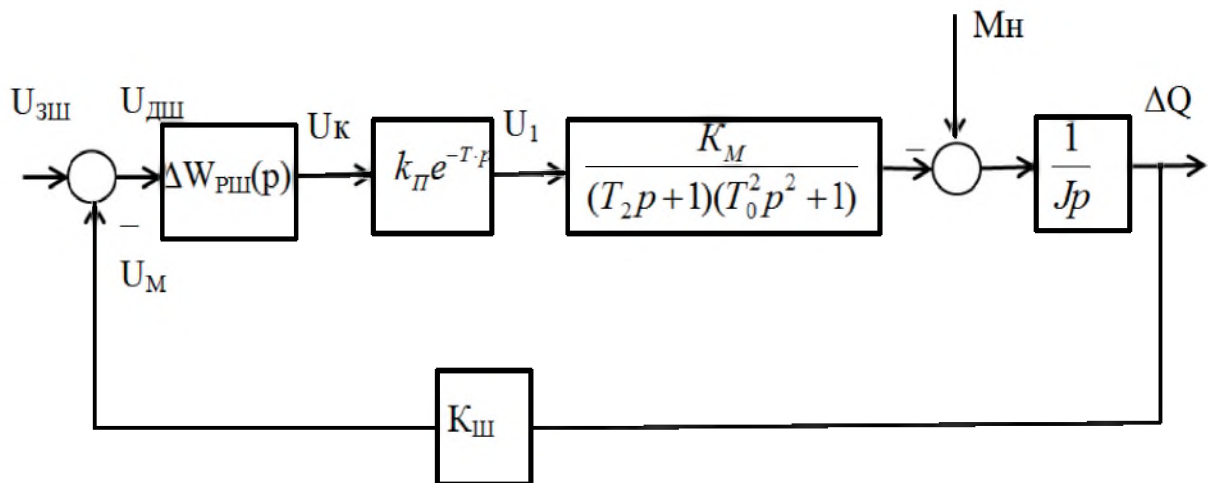


Рисунок 3.4 – Структурна схема одноконтурної системи ТП – АД

При цьому під час виконання оптимізації такої системи за впливом варто компенсувати дію інвертора та самого електродвигуна, тобто. об'єкта регулювання контуру швидкості з передавальною функцією

$$W_{об.КШ}(p) = \frac{k_M \cdot k_{II}}{(T_0^2 \cdot p^2 + 1) \cdot (T_\mu \cdot p + 1) \cdot Jp} =$$

$$= \frac{40 \cdot 0.185}{(0.0032^2 p^2 + 1) \cdot (0.0185 p + 1) \cdot 0.0923 p} = \quad (3.26)$$

Тоді, із огляду на згортку системи, передавальна функція самого регулятора за швидкістю, буде виглядати:

$$W'_{PII}(p) = \frac{(T_0^2 p^2 + 1) J p}{2 k_{II} k_{III} k_M T_\mu p} =$$

$$= \frac{(0.0031^2 p^2 + 1) \cdot 0.0923}{2 \cdot 0.0193 \cdot 40 \cdot 0.187 \cdot 0.0975} = 0.295 \cdot 10^{-4} p + 3.36 \quad (3.25)$$

В той же час графік перехідного процесу під час моделювання роботи схеми рис. 3.4, набуде вигляду рис. 3.5

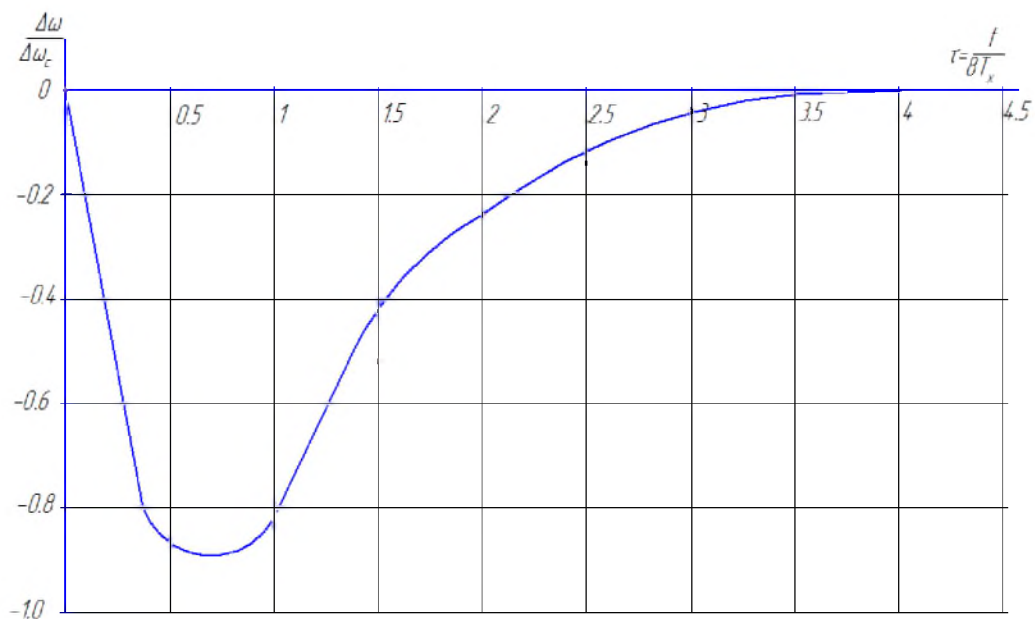


Рисунок 3.5 – Перехідні процеси у згорнутій системі регулювання

Підсумовуючи аналіз проведений у третьому розділі, а саме додаткові виміри струму та напруги для регулювання у контурі моменту, було складено наступну (рис. 3.6) схему, які дозволить у системі із плавним пуском мати дані про розглянуті параметри.

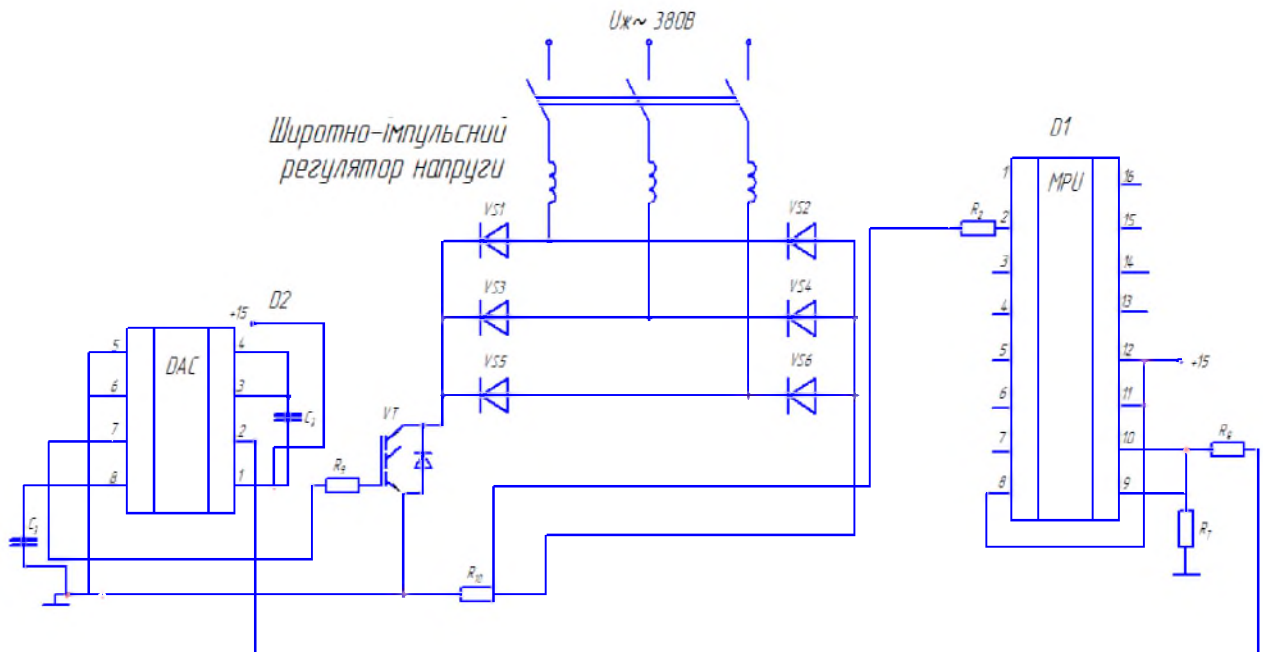
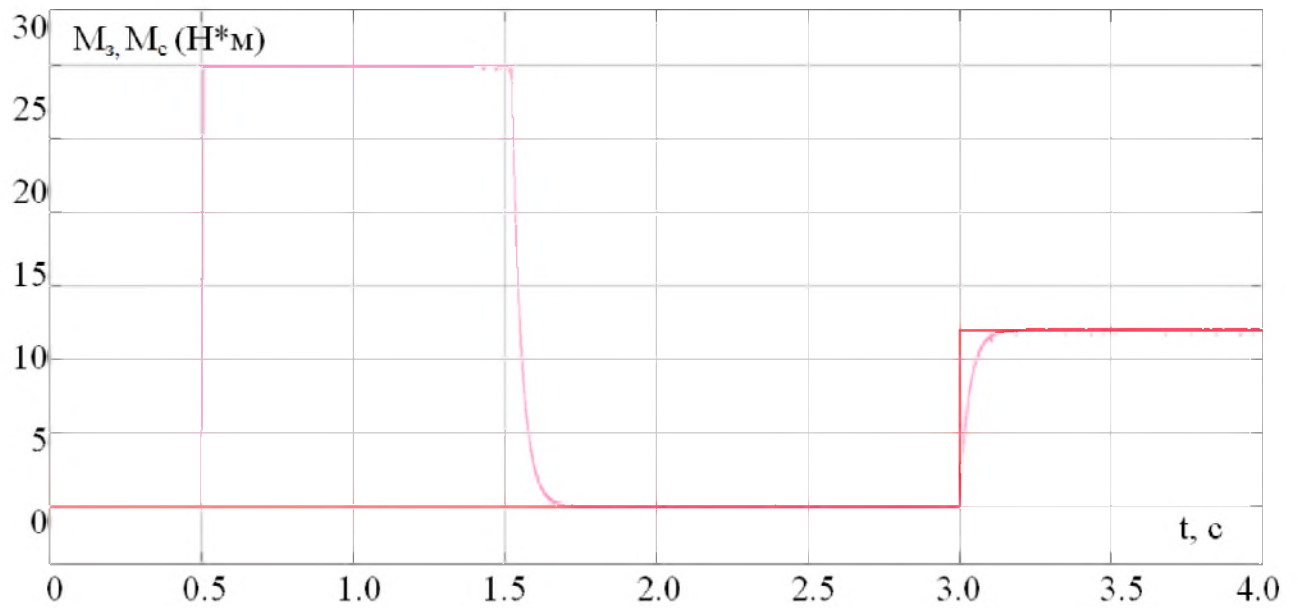
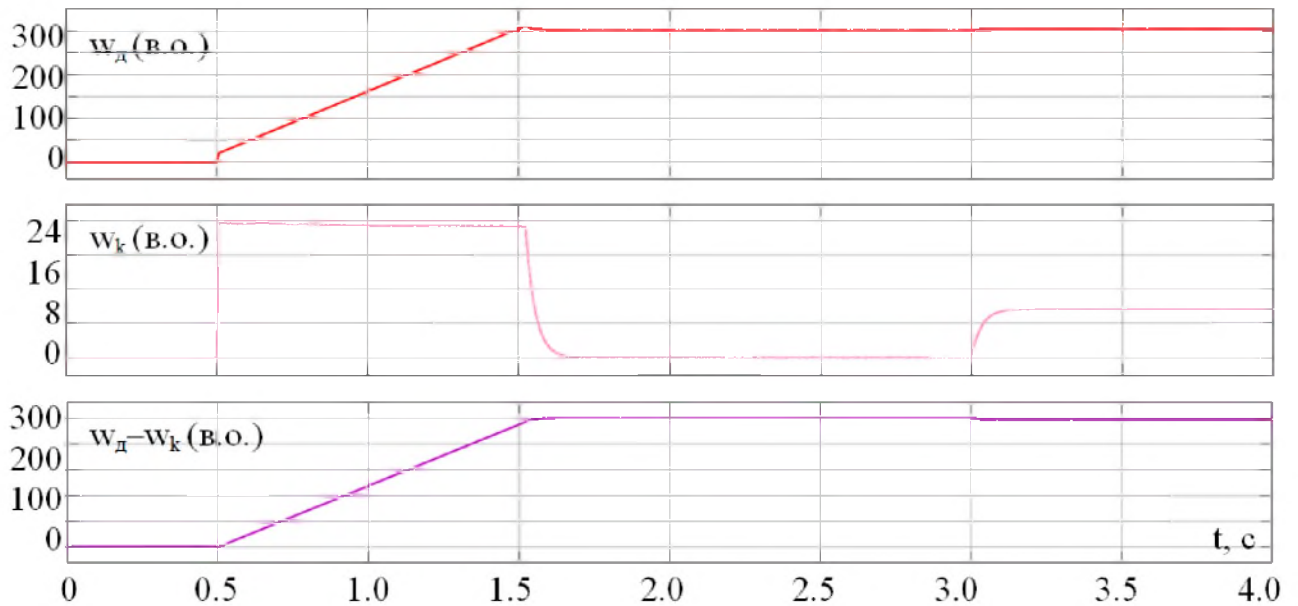


Рисунок 3.6 – Структурна схема плавного пуску із виміром параметрів у досліджуваній мережі

Самі характеристики були отримані під час зміни двох значень напруги, які задає власне контур моменту U_{31} та U_{32} , а також при трьох значеннях ковзання $s_1=1/0.5/0.1$.

Рисунок 4.2 – Залежності $M_3(t)$ та $M_c(t)$

Характеристика налаштованого контуру швидкості асинхронного електропривода предсталені на рис. 4.3, тут можна побачити графік дійсної швидкості, при зміні ковзання та їх різницю

Рисунок 4.3 – Залежності $w_d(t)$ та $w_k(t)$

Струмові характеристики електричного привода наведені на рис. 4.4.

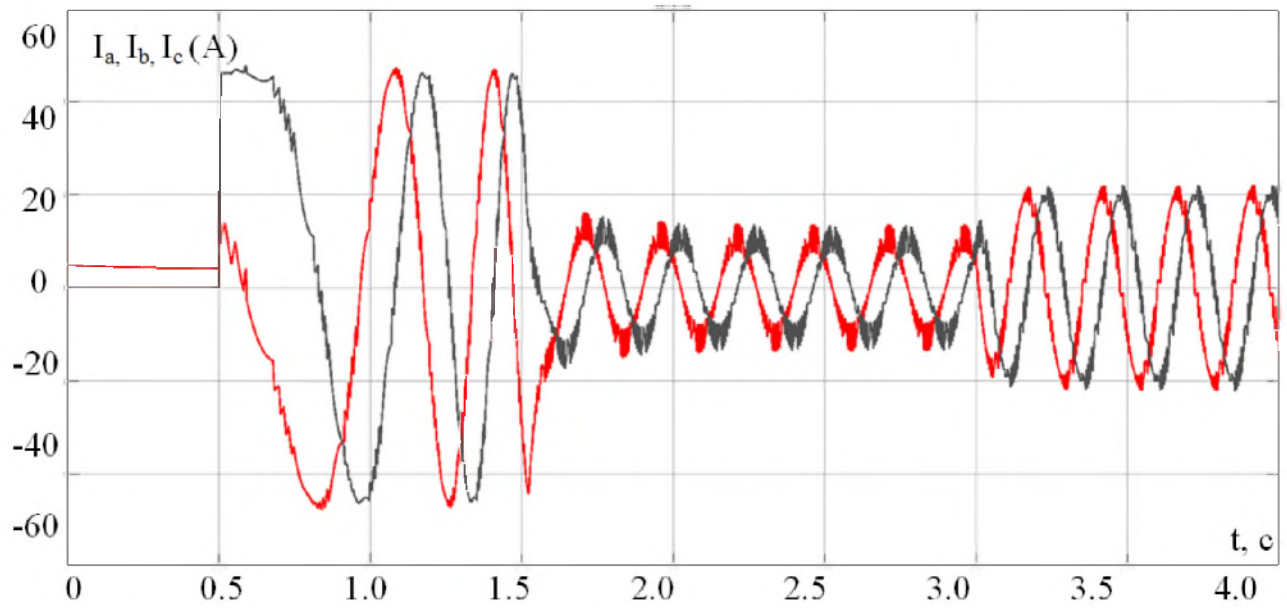


Рисунок 4.4 – Струміві характеристика електропривода I_a, I_b, I_c

Залежності кута потоку ротора від часу наведені на рис. 4.5–4.6, різниця в одиницях виміру, на рис. 4.5– [град.], на рис. 4.6–[рад].

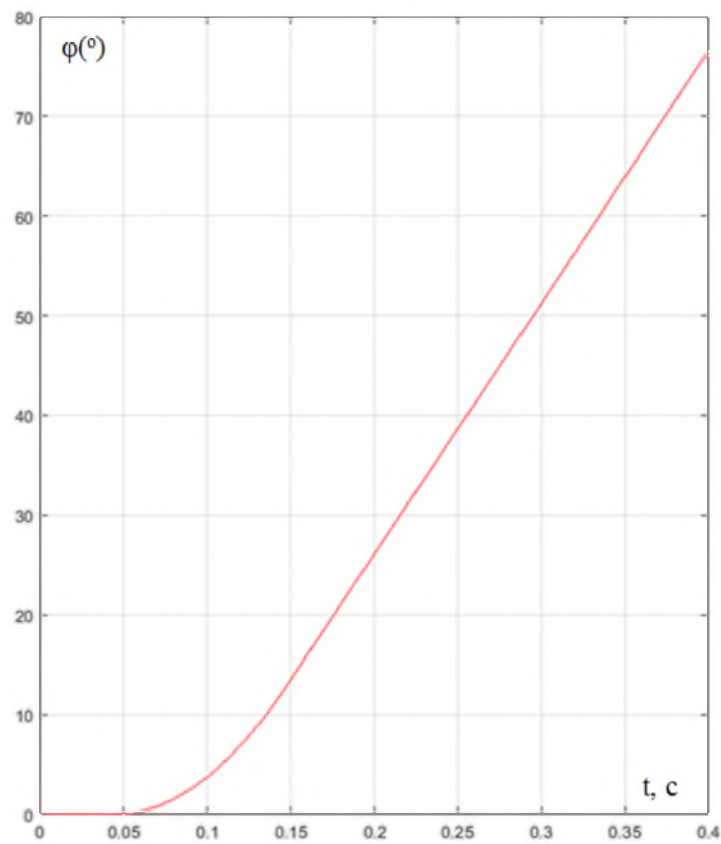


Рисунок 4.5 – Характеристика кута потоку ротора, залежність $\varphi(t)$

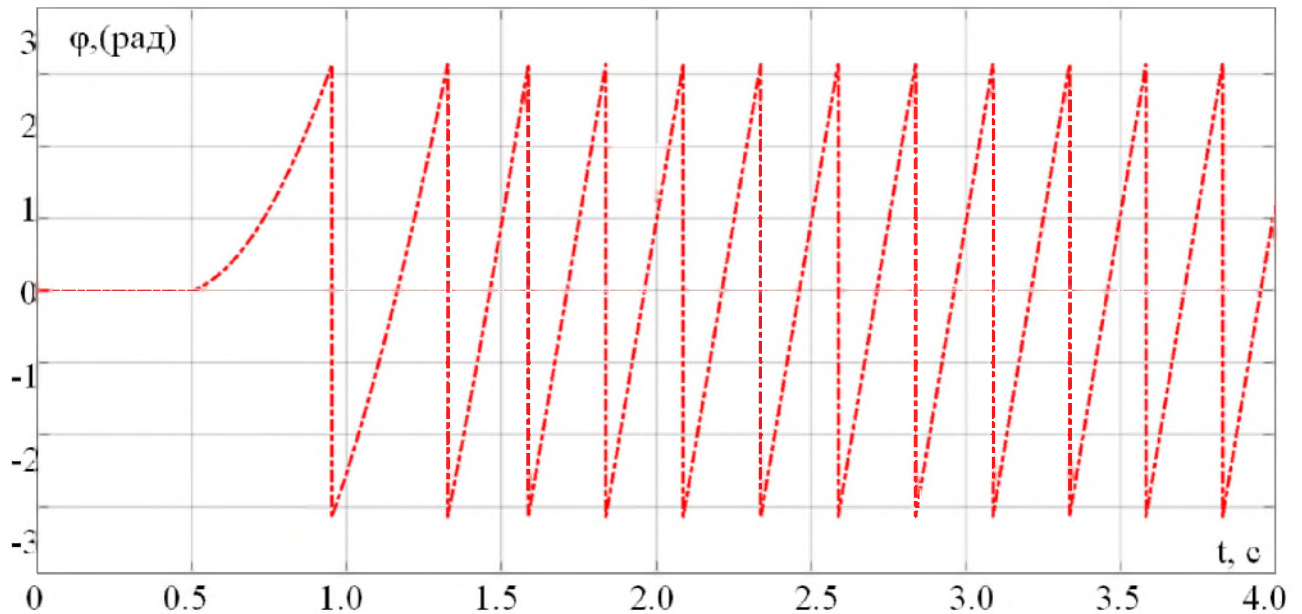


Рисунок 4.6 – Характеристика кута потоку ротора, залежність $\varphi(t)$

Графіки доводять, що проведена оптимізація контуру регулювання моменту за технічним оптимумом доволі близька до теорії систем із регулюванням за координатами електричних приводів постійного струму.

Перехідний процес моменту був сформований із невеликим значенням перерегулювання, котрий лежить у допустимих межах значень. Час зростання моменту до досягнення значення моменту, який входить в діапазон коливань область 5% та становить приблизно $(3.7-4) \cdot T_{\text{д}}$. Отже значення лежить в межах теоретичних положень.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі досліджувались питання пов'язані із пуском асинхронних електродвигунів. Так були порівняні поміж собою методи прямого, на-пів плавного (та його різновиди із застосуванням спеціальних приладів) та плавного пуску. Під час аналізу вихідних параметрів при кожному із наведених методів, був зроблений висновок, що найбільш оптимальним та ефективним для роботи самого електропривода є саме використання асинхронного двигуна із плавним пуском.

Для того, аби застосувати у математичній моделі систему із плавним пуском, в першу чергу необхідно було розробити саму модель двигуна, тож для цього була розрахована, використовуючи дані завдання до дипломної роботи, схема заміщення асинхронного двигуна.

Після цього було проаналізовано та обрано найбільш доцільний тип тиристорного регулятора для досліджуваного електропривода. Також відбулася побудова регулювальних та механічних характеристик.

Обравши обладнання для приводу, надалі головна увага була прикута до системи із плавним пуском, а для цього необхідно було обрати та оптимізувати контури регулювання за моментом та швидкістю. Початком цієї оптимізації стало обрання наближеної передавальної регулятора та об'єкта регулювання. Після цього прийнявши до уваги наявні фільтри, а також сталі часу, був налаштований контур моменту – внутрішній контур за модульним оптимумом, разом із цим була приділена увага питанням, щодо методів встановлення датчиків струму та наруги у інформаційний канал електроприводу.

Потім відбулося налаштування, за аналогією із контуром моменту й налаштування зовнішнього контуру швидкості, так було налаштована система регулювання, яку потім разом із електроприводом уся модель була зібрана у програмі Matlab. Саме тут досліджувалися перехідні процеси, у тому числі під час пуску.

Так був зроблений висновок, що перехідний процес за моментом був сформований із невеликим значенням перерегулювання, котрий лежить у допустимих межах значень. Час зростання моменту до досягнення значення моменту, який входить в діапазон коливачь область 5% та становить приблизно $(3.7-4) \cdot T_{\mu}$. Отже значення лежить в межах теоретичних положень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) В.В. Булгар, «Теорія електроприводу» : збірник задач / Булгар В.В. — м. Одеса : видавництво ПОЛІГРАФ, 2006 р. — 408 с.
- 2) О.М. Закладний, «Енергозбереження засобами промислового електропривода», навчальний посібник — м. Київ : видавництво «Кондор», 2005 р. — 416 с.
- 3) «Властивості, схема підключення електродвигуна серії AIR112M2» - електронний ресурс. Доступно: [Режим доступу]. <https://slemz.com.ua/catalogue/obshchepromyshlennye/elektrodvigatel-air-112m2-7.5kvt-3000obmin> Дата звернення: 02.05.22
- 4) Canakoglu A. I., Yetgin A. G., and Turan M., “Induction motor parameter estimation using metaheuristic methods,” edition «Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences», volume 22, 1177–1192 pp., 2014.
- 5) Ю.А. Крилов, "Енергозбереження та автоматизація виробництва в теплоенергетичному господарстві міста. Частотно-регульований електропривод." бачивши. Лань, 2013 рік, 176 с.
- 6) В. В. Попічко “Конструкція асинхронних двигунів: : навч. посіб. для студ. старш. курсів напряму "Електромеханіка" спец. "Електр. машини та апарати" /; Національний університет "Львівська політехніка". – м. Львів, 2001 р., 160 с.
- 7) Y. Cao «Soft Startup Technology of AC Asynchronous Motor», Conference: 2016 6th International Conference on Machinery, Materials, Environment, Biotechnology and Computer, ISSN 2352-5401, 2016. DOI:10.2991/mmebc-16.2016.27.
- 8) R. Hamouda, A. Alolah, M.Badr and other "A comparative study on the starting methods of three phase wound-rotor induction motors - Part I", January 2000 IEEE Transactions on Energy Conversion 14(4):918 - 922, DOI:10.1109/60.815008.

9) «Створення еквівалентної схеми для асинхронного двигуна» – електронний ресурс. Доступно: [Режим доступу].
<https://www.electrical4u.com/equivalent-circuit-for-an-induction-motor/> Дата звернення: 04.05.22

ДОДАТОК А.
«ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА ДО
ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ»

Студентки групи ЕЛКзп – 19, ОЛЕФІРОВІЙ О.

Призначення документа	Документ	Умовні позначення	Зміст зауваження

Дата _____

Підпис _____

(ПІБ)

ДОДАТОК Б

«Охорона праці. Експлуатація установки електроприводу із плавним пуском,
правило безпеки обслуговуючого персоналу»

Проведення робіт щодо запобігання аваріям та ліквідація їхніх наслідків.
короткочасні роботи.

Згідно з **НПАОП 40.1-1.01-97** «Правила безпечної експлуатації електроустановок» основними причини виникнення аварійних ситуацій являються :

- 1) Недотримання інструкцій при роботі з обладнанням, що знаходиться під напругою
- 2) Невиконання підготовчих операцій перед проведенням ремонту робітниками згідно з НПАОП 40.1-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.
- 3) Перенапруга мережі в результаті неузгодженого відключення (включення) обладнання.
- 4) обриви на лініях електропередач.
- 5) недостатня або неякісна ізоляція струмоведучих частин.

Проведення робіт при аварійних ситуаціях нормується згідно з **НПАОП 40.1-1.21-98** Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. НПАОП 0.00-1.21-98 також регламентує вимоги щодо обов'язків, рівня професійної підготовки працівників, їх групи з електробезпеки та заходи і засоби безпечного виконання робіт в електроустановках залежно від їх особливостей.

У виняткових випадках короткочасні роботи, які вимагають швидкого вирішення, з усунення несправностей устаткування, що можуть призвести до аварії, допускається виконувати без наряду, а саме за розпорядженням з відповідними записами в оперативний журнал:

- ремонтникам під наглядом чергового, якщо виписування та оформлення наряду призводить до затримки ліквідації наслідків аварії;

- оперативним працівникам (у електричних установках напругою понад 1000(V) - не менше ніж удвох);

- ремонтникам під наглядом адміністративно-технічного працівника з групою V (в електричних установках напругою до 1000 В - з групою IV) у випадку зайнятості оперативних працівників, а також в разі відсутності місцевих чергових.

У разі відсутності адміністративно-технічних працівників, котрі мають право на видачу нарядів чи розпоряджень на роботу, яка має мету запобігання аварії чи ліквідація її наслідків, видається оперативному працівнику із групою IV.

Участь оперативних працівників у ліквідації аварій та їх наслідків дозволяється із відома старшого у зміні оперативного працівника. У разі відсутності зв'язку із старшим в зміні оперативним працівником такий дозвіл не потрібен.

У разі проведення в електроустановках підприємств аварійних робіт черговими бригадами електропостачальних організацій, необхідні видача наряду та оформлення допуску до робіт відповідно до вимог. В таких випадках із метою швидкої ліквідації аварії у разі відсутності в даний момент на підприємстві працівників, які мають право видавати наряд, його має право видати черговий або оперативно-ремонтний працівник підприємства за вказівкою особи, яка відповідальна за електричну мережу чи гілку мережі.

Основні причини електричного травматизму.

Електротравма спричинена дією на організм електричного струму та (чи) електричної дуги (ГОСТ 12.1.009-76).

При аналізі електричного травматизму виділяють чотири основні причини травм це:

- 1) технічні;
- 2) організаційні;
- 3) санітарно-гігієнічні;
- 4) психофізичні.

До *технічних* причин відносять:

- недосконалість електротехнологічного процесу;
- конструктивні недоліки устаткування;
- невідповідність вимогам безпеки або несправність електроустановки, електрозахисних засобів; недосконалість або відсутність індивідуальних захисних засобів, захисних огорожень запобіжних пристроїв, засобів сигналізації та блокування

До *організаційних* відносять:

- * неефективний нагляд, відомчий і громадський контроль за дотриманням вимог безпеки при виконанні робіт в електроустановках та їх експлуатації;
- * відсутність або неякісне проведення навчання з питань охорони праці; порушення вимог стандартів, правил, норм, інструкцій щодо експлуатації електроустановок;
- * відсутність або несвоєчасне проведення медичного контролю стану здоров'я електроперсоналу;
- * порушення норм і правил планово-попереджувального ремонту і технічного обслуговування електроустановок;
- * невиконання заходів щодо охорони праці; порушення технологічних регламентів;
- * недостатній технічний нагляд за проведенням небезпечних робіт.

Санітарно-гігієнічні причини:

- недостатнє або нераціональне освітлення;
- підвищений вміст шкідливих речовин;
- незадовільні мікрокліматичні умови;
- підвищені рівні шуму вібрації, ультра- та інфразвуку;

– наявність різноманітних випромінювань вище допустимих рівнів тощо.

Психофізіологічні причини:

- * невідповідність психофізіологічних чи антропометричних даних працівника виконуваній роботі;

- * помилкові дії працівників внаслідок втоми, хворобливого стану, необережності.

Заходи щодо захисту людей від уражень електричним струмом згідно із **НПАОП 40.1-1.07-01** "Правила експлуатації електрозахисних засобів":

- захист від крокової напруги персоналу – діелектричні решітки біля кожного робочого місця, діелектричні килимки – біля силових та розподільчих електрощитів;

- забезпечення персоналу діелектричними колошами;

- проведення додаткових інструктажів з записом у журналі перевірки знань.

Основні організаційно-технічні заходи і засоби щодо запобігання електротравмам регламентується **НПАОП 40.1-1.21-98** «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів».