

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ННІ/факультет	Навчально-науковий технологічний інститут
Кафедра	Електричної інженерії та автоматизації
Спеціальність	141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Форма навчання	заочна

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної кваліфікаційної роботи

бакалавра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Шахнюк Ілля Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему «Електромеханічне обладнання металургійного виробництва.

Асинхронний тиристорний електропривод пневмогвинтового насосу для
цементу»

(повна назва теми)

за матеріалами

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник

К.Т.Н. доцент

-

Чорний О.П.

(наук. ступінь, вчене звання)

(підпис)

(прізвище, ініціали)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від _____ 2026__р. №

Завідувач кафедри

(підпис)

Є.О. Модло

Наук. ступень, вчене звання

Ініціали, прізвище

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ**

Кафедра Електричної інженерії і автоматизації

Рівень вищої освіти бакалавр

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Електричної інженерії і автоматизації

В.о. зав. каф.

Модло Є.О.

(підпис)

(посада, вчене звання,
прізвище ініціали)

«___» _____

2026__ року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ(КИ)

Шахнюк Ілля Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи бакалавра Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Асинхронний тиристорний електропривод пневмогвинтового насосу для цементу

керівник кваліфікаційної роботи Чорний О.П., к.т.н., доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «06»04.2026 р. № 237-ст

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи до кафедри 01.06.2026

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи бакалавра: статті, патенти, промислові дослідження

Об'єкт розробки і дослідження – регульований електропривод насоса для цементу на основі асинхронного двигуна.

Характер навантаження: тривале постійне навантаження; тяжкий пуск (короткочасний режим); тривала робота Напруга мережі живлення $U = 380$ В, частота мережі живлення, 50 Гц, швидкість двигуна, 1000 об/хв. потужність двигуна, 115 кВт, коефіцієнт потужності 0,82

Тип системи електроприводу: рід струму – трифазний змінний струм (АС)., асинхронний трифазний електродвигун із короткозамкненим ротором

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

4.1 Аналітична частина;

4.2 Основна частина.

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

1 Загальний вигляд

2 Функціональна схема

3 Структурна схема

4 Структурна схема САУ

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 Аналітична частина	к.т.н., доцент Чорний О.П.		
2 Основна частина	к.т.н., доцент Чорний О.П.		

7. Дата видачі завдання «06» ____ 04 _____ 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	30.04.2026	
2.	Основна частина	05.05.2026	
3.	Оформлення пояснювальної записки	11.05.2026	
4.	Виконання графічної частини	26.05.2026	
5.	Подання роботи до кафедри	01.06.2026	
6.	Захист роботи в ЕК	17.06.2026	

Студент

(підпис)

Шахнюк І.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Чорний О.П..

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Шахнюк І.С. «Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Асинхронний тиристорний електропривод пневмогвинтового насоса для цементу» - Бакалаврська робота. - Кривий Ріг, 2026. 60 с., 24 рис., 6 табл., 16 джерел.

Об'єктом дослідження є електромеханічна система асинхронного електропривода пневмогвинтового насоса ТА-14Б, що функціонує в режимі змінного навантаження під час транспортування сипучих матеріалів.

Предметом дослідження є процеси автоматичного керування асинхронним електроприводом пневмогвинтового насоса, а також динамічні та статичні характеристики системи фазового регулювання напруги, що забезпечують стабільність технологічних параметрів транспортування цементу.

Метою роботи є модернізація системи автоматизованого електропривода пневмогвинтового насоса ТА-14Б шляхом впровадження асинхронного тиристорного привода, що забезпечує плавне регулювання швидкості обертання шнека та оптимізацію роботи агрегату залежно від тиску в змішувальній камері. У роботі розроблено систему асинхронного тиристорного електропривода пневмогвинтового насоса ТА-14Б, що забезпечує плавне фазове регулювання напруги живлення двигуна для оптимізації режимів транспортування цементу. Результати імітаційного моделювання підтвердили, що запропонована система забезпечує високу динамічну точність підтримки швидкості шнека при змінах опору пневмотранспортної магістралі та запобігає перевантаженням двигуна. Впровадження цієї системи мінімізує механічний знос шнекового вузла, продовжує термін експлуатації обладнання та підвищує загальну енергоефективність технологічного процесу.

Ключові слова: асинхронний електропривод, тиристорний регулятор напруги, фазове керування швидкістю, пневмогвинтовий насос, імітаційне моделювання, енергоефективність двигуна, математична модель, перехідні процеси

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	9
1.1 Опис технологічного процесу	9
1.1.1 Технологічні характеристики цементу	9
1.2 Пневмогвинтові насоси для цементних сумішей	10
1.3 Види зносу, що виникають під час транспортування сипких	
Матеріалів	12
1.4 Технічні вимоги до пневмогвинтових насосів	13
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА	14
2.1 Принципи побудови систем тиристорний регулятор напруги	
асинхронний двигун	14
2.2 Обґрунтування вибору функціональної схеми електропривода з фазовим	
регулюванням швидкості	15
2.3 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна	17
2.4 Розрахунок механічних та електромеханічних характеристик	
асинхронного двигуна	22
2.5 Структурна схема асинхронного двигуна	29
2.6 Розрахунок перехідних процесів пуску асинхронного двигуна прямим	
включенням у мережу та при зміні навантаження. Аналіз отриманих	
результатів	32
2.7 Обґрунтування та вибір функціональної схеми електропривода	
змінного струму з фазовим регулюванням швидкості. Призначення та	
сфера застосування	36
2.7.1 Обґрунтування та вибір регулятора напруги	36
2.7.2 Розрахунок електромеханічних та механічних характеристик	
розімкнутої системи «регулятор напруги-асинхронний двигун» для різних	
напруг, що задають	37
2.7.3 Аналіз отриманих результатів	38

2.8 Втрати в асинхронному двигуні при роботі на штучних характеристиках	39
2.9 Розрахунок перехідних процесів швидкості та моменту для режиму пуску, скидання, накидання навантаження на валу двигуна для режимів прямого пуску та пуску від задатчиків інтенсивності з різними законами зміни напруги управління та вентиляторної навантаженням на валу	43
2.10 Визначення втрат потужності двигуна під час пуску. Визначення оптимального часу пуску асинхронного двигуна з огляду на мінімізацію втрат. Аналіз отриманих результатів теоретичних розрахунків	46
2.11 Синтез параметрів регулятора швидкості у замкнутій системі «Тиристорний регулятор напруги-асинхронний двигун» для різних напруг	48
2.12 Заходи із охорони праці та безпеки при експлуатації насосу	54
2.12.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів при експлуатації насосу	54
2.8.2 Засоби зниження дії небезпечних і шкідливих виробничих чинників	54
2.8.3 Пожежна безпека	56
ВИСНОВКИ	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	58

ВСТУП

Асинхронні двигуни займають домінуючу позицію в промисловості завдяки балансу між надійністю та економічністю. Проте їх прямий пуск супроводжується значними пусковими струмами, що спричиняє просідання напруги в мережі та зниження електромагнітного моменту двигуна. Для мінімізації динамічних навантажень на кінематичні вузли та забезпечення плавного розгону доцільно використовувати тиристорні регулятори напруги (ТРН). Ці пристрої вигідно відрізняються від частотних перетворювачів нижчою вартістю та меншим рівнем електромагнітних завад.

Використання тиристорних комутаторів дозволяє реалізувати гнучкі стратегії керування: від простого пуску до розгону з чітко заданою динамікою або обмеженням пускових показників. Переваги плавного пуску в системі ТРН-АД полягають у наступному. Збільшення ресурсу ізоляції, а саме обмеження пускових струмів запобігає перегріву обмоток, що є критичним фактором для запобігання міжвитковим замиканням та передчасним відмовам двигуна. Зниження механічної напруженості. Пускові моменти мають коливальний характер і можуть суттєво перевищувати номінальні значення, що призводить до прискореного зносу деталей та зниження довговічності механічних передач. Оптимізація розгону. Поступове збільшення напруги від нуля до номінального рівня дозволяє суттєво зменшити ударні навантаження, зберігаючи при цьому необхідний час виходу на робочий режим. Стабілізація параметрів мережі. Відсутність глибоких просідань напруги виключає вплив на інших споживачів та гарантує стабільний пуск двигуна, потужність якого є співмірною з потужністю джерела живлення. Це важливо, оскільки момент двигуна пропорційний квадрату напруги, і критичне падіння напруги може призвести до нездатності двигуна подолати статичний момент навантаження.

Мета роботи полягає в дослідженні розрахунка статички асинхронного двигуна при регулюванні живильної напруги та побудову математичної моделі системи ТРН-АД у середовищі MATLAB/Simulink.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Опис технологічного процесу

1.1.1 Технологічні характеристики цементу

Цемент - це штучний неорганічний матеріал, необхідний для зв'язування будівельних конструкцій. Його склад базується на поєднанні карбонатних порід (вапняк, крейда, мергель), глинистих компонентів (глина, сланець, лесс, суглинок) та спеціальних мінеральних домішок.

Ключові експлуатаційні властивості:

Механічна міцність. Здатність протистояти навантаженням. Визначається типом добавок (наприклад, гіпсу або шлаку).

Морозостійкість. Опір циклічному заморожуванню та таненню. Забезпечується модифікуючими присадками.

Хімічна стійкість. Включає загальну корозійну витривалість та сульфатостійкість. Останнє важливо для гідротехнічних споруд у солоній воді.

Водонепроникність. Специфічна характеристика швидкотверднучих сумішей, що використовуються для герметизації швів у водному середовищі.

Дисперсність (тонкість помолу). Впливає на швидкість гідратації. Висока якість подрібнення клинкера прямо пропорційна кінцевій міцності бетону.

Цемент є універсальним в'язучим матеріалом. Він використовується для виробництва залізобетону, монтажних розчинів та монолітних конструкцій. Головна перевага цементу перед гіпсом чи вапном - здатність до твердіння у вологому середовищі.

Логістика та подача: матеріал транспортується автотранспортом, залізницею або трубопровідними системами. Пневмотранспорт забезпечує ефективне переміщення цементу безпосередньо від виробника до складських терміналів на відстані до 1000 метрів.

1.2 Пневмогвинтові насоси для цементних сумішей

Пневмогвинтові насоси призначені для транспортування дрібнодисперсних порошків, зокрема цементу, між складами, вагонами-хоперами, автоцистернами та виробничими вузлами. Вони забезпечують переміщення матеріалу вертикально, горизонтально та під нахилом на відстані до 400-430 метрів. Конструкція сучасних вітчизняних установок дозволяє подавати цемент на висоту до 30 метрів, а подальше підвищення продуктивності досягається адаптацією насоса до фізико-механічних властивостей конкретної суміші. На заводах залізобетонних виробів ці насоси ефективно переміщують цемент із силосів безпосередньо до бетонозмішувальних установок. Залежно від конструкції шнека та характеристик електропривода, насоси поділяють на низьконапірні та високонапірні. Компактні розміри обладнання дозволяють монтувати його на мобільні платформи або безпосередньо під залізничні колії без складної перебудови інфраструктури. Важливою перевагою є безперервний цикл подачі: матеріал стабільно рухається через шнек до змішувальної камери, що виключає циклічність роботи, притаманну камерним насосам. Серед технічних обмежень варто виділити високе енергоспоживання приводів, потужність яких варіюється від 10 до 110 кВт, а також потребу в підведенні стисненого повітря. До недоліків експлуатації також належать підвищене зношування шнекового гвинта та відсутність можливості самовсмоктування, що зобов'язує організовувати примусову подачу цементу в приймальний бункер під тиском. Зовнішній вигляд типового промислового пневмонасоса представлено на схемі конструкції. Впровадження системи ТРН-АД дозволяє ефективно регулювати продуктивність насосів, забезпечуючи плавність пуску та зниження динамічних навантажень на механічну частину привода.



Рис.1.1. Зовнішній вигляд пневмонасосу для цементу

Технічні характеристики пневмогвинтових насосів показані в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Технічні характеристики пневмогвинтових насосів

Параметр	ТП-1	ТФ-1	ТА-14Б	ТЦ-1
Продуктивність, тонн/год	7	15	36	63
Дальність подачі, м	230	230	230	230
Висота подачі, м	30...50	30	30	30
Витрата повітря, м³/хв	5	9	14,5	22
Потужність ел. приводу, кВт	15	15	30	37
Тиск стисненого повітря, МПа	0,3	0,2	0,2	0,2

Конструктивне виконання насосного агрегату

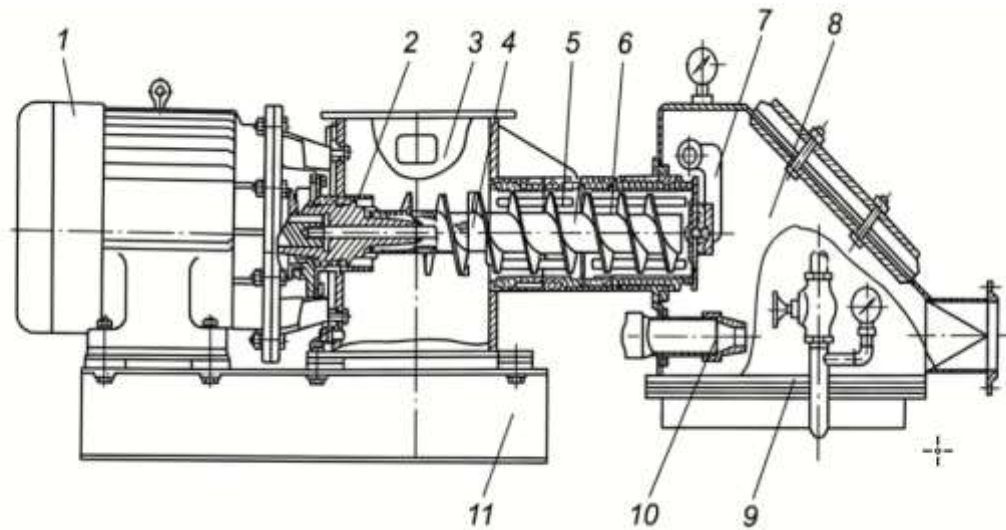
Основні вузли насоса (рис. 1.2) змонтовані на єдиній сталевій рамі. Основними компонентами системи є:

Приймальний вузол: містить корпус із внутрішньою броньовою гільзою, що захищає робочу зону від абразивного зносу.

Транспортувальний механізм: напірний шнек, що приводиться в дію електродвигуном і відповідає за подачу цементної суміші.

Вузол аерації: змішувальна камера, оснащена колектором для подачі стисненого повітря та зворотним клапаном для запобігання зворотному потоку матеріалу.

Вихідна секція: роз'ємний циліндричний блок із броньованими внутрішніми втулками для забезпечення довговічності.



1 - електродвигун; 2 - ущільнення; 3 - корпус; 4 - шнек; 5, 6 - гільза; 7 - зворотний клапан; 8 - змішувальна камера; 9 - аероднище; 10 - сопло; 11 - рама

Рис.1.2.Пневмогвинтовий насос ТА-14Б

1.3 Види зносу, що виникають під час транспортування сипких матеріалів

Експлуатація пневмогвинтових насосів нерозривно пов'язана з деградацією робочих поверхонь через інтенсивний механічний вплив абразивних частинок цементної суміші. У процесі транспортування виникають три основні типи зносу. Газоабразивне руйнування спричинене постійним контактом поверхонь із твердими включеннями, що переносяться повітряним потоком, і призводить до мікроскопічного вибивання, викрашування або зрізання матеріалу на поверхневому рівні. Абразивний знос розвивається при безпосередньому попаданні абразивних частинок (піску, продуктів окислення або дрібних уламків) у вузли тертя, де ці частинки діють подібно до ріжучого інструменту, створюючи глибокі риски та нерівності на деталях ущільнень, тарілках зворотних клапанів та лопатях шнека. Найбільш агресивним є ударно-абразивний знос, при якому тверді частинки при прямому динамічному ударі

залишають на металі характерні сліди у вигляді лунок, розділених між собою металевими перемичками. Цей вид пошкоджень найбільш критичний для броньованих гільз, змішувальних камер, ділянок матеріалопроводу та напірних витків гвинта, що суттєво знижує загальний ресурс обладнання.

1.4 Технічні вимоги до пневмогвинтових насосів

Робочі вузли та системи пневмогвинтових насосів повинні відповідати суворим технічним стандартам, які гарантують надійність та тривалий експлуатаційний ресурс обладнання. Змішувальна камера повинна бути повністю герметичною, щоб унеможливити витік цементу назовні або проникнення зовнішнього повітря в середину. Перед подачею в камеру стиснене повітря обов'язково підлягає осушуванню. Це критично важливо, оскільки навіть незначна кількість вологи в повітрі провокує передчасне твердіння цементної суміші при контакті з нею, що призводить до забивання робочих каналів. Конструкція шнека має передбачати використання змінного кінцевого вузла, який можна швидко замінити. Через інтенсивний абразивний знос робочий ресурс шнека становить не більше 1000 годин, після чого він потребує відновлення геометрії шляхом наплавки зносостійких сплавів. Бронева гільза має аналогічний метод відновлення, проте її термін служби зазвичай удвічі довший. Система електропривода повинна забезпечувати плавний розгін шнека до номінальної частоти обертання. Це дозволяє уникнути різких динамічних навантажень та зменшити рівень зносу внутрішніх поверхонь гільзи та самого гвинта під час пускових процесів.

До змішувальної камери необхідно подавати чітко дозований обсяг повітря, кількість якого має прямо залежати від поточної швидкості обертання шнека для підтримки оптимального режиму аерації. Вузли ущільнення вала шнека повинні забезпечувати надійну ізоляцію, що виключає втрати цементу та перешкоджає потраплянню абразивного пилу у вузли приводу, що значно подовжує термін безвідмовної роботи насосної установки.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Принципи побудови систем тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун

Асинхронні електроприводи займають домінуючу позицію в сучасній промисловості завдяки оптимальному співвідношенню надійності та вартості. Проте прямий пуск двигунів великої потужності супроводжується значними стрибками струму, що викликає просідання напруги в мережі та негативно позначається на електромагнітному моменті двигуна.

Для підвищення енергоефективності та експлуатаційної надійності таких систем широко застосовуються пристрої плавного пуску, зокрема тиристорні регулятори напруги (ТРН). Принцип їхньої роботи базується на фазовому керуванні, яке змінює діюче значення напруги на статорі при сталій частоті струму. Функціональне призначення тиристорних регуляторів. Збереження ресурсу ізоляції. Завдяки обмеженню пускових струмів зменшується тепловий вплив на обмотки двигуна. Це запобігає прискореному старінню ізоляції та виникненню міжвиткових замикань, що є критичними причинами виходу обладнання з ладу. Зниження динамічних навантажень. У момент прямого пуску момент двигуна має виражений коливальний характер і може багаторазово перевищувати статичні значення. ТРН дозволяє згладити ці ударні моменти, захищаючи кінематичні вузли від механічних руйнувань та подовжуючи термін їхньої служби. Системи захисту сучасних ТРН. Прогресивні тиристорні пускові пристрої оснащуються комплексом автоматичних захистів, що гарантують стабільну роботу системи в аварійних режимах: контроль цілісності фаз (захист від обриву); перевірка черговості фаз; захист від перевантажень за струмом; контроль асиметрії фазних напруг; вбудована теплова захист двигуна.

2.2 Обґрунтування вибору функціональної схеми електропривода з фазовим регулюванням швидкості

Вибір системи з фазовим регулюванням напруги (ТРН-АД) зумовлений необхідністю усунення динамічних ударів у кінематиці насоса під час пуску. Завдяки програмному управлінню моментом відкриття тиристорів стає можливим плавний розгін двигуна, що мінімізує механічні напруження та подовжує термін служби механічних передач.

Технічно фазове управління реалізується шляхом зміни кута α відносно точки переходу синусоїди живильної напруги через нуль. Фактично це є різновидом амплітудного параметричного регулювання. Оскільки електромагнітний момент асинхронного двигуна пропорційний квадрату прикладеної напруги, зміна кута дозволяє безпосередньо впливати на форму механічної характеристики двигуна, забезпечуючи необхідний закон розгону та регулювання швидкості.

Такий підхід дозволяє відмовитися від складних та дорогих частотних перетворювачів у задачах, де не потрібне глибоке регулювання швидкості в робочому режимі, але критично важливим є плавний пуск та обмеження пускових струмів. Функціональна схема системи ТРН-АД (рис. 2.1) реалізує зворотний зв'язок, що дозволяє автоматично підтримувати заданий темп наростання напруги, гарантуючи стабільність роботи пневмогвинтового насоса незалежно від ступеня завантаженості бункера.

Використання таких систем дозволяє не лише забезпечити плавний розгін, але й мінімізувати аварійні зупинки, що є критично важливим для безперервних виробничих ліній, таких як подача цементу пневмогвинтовими насосами.

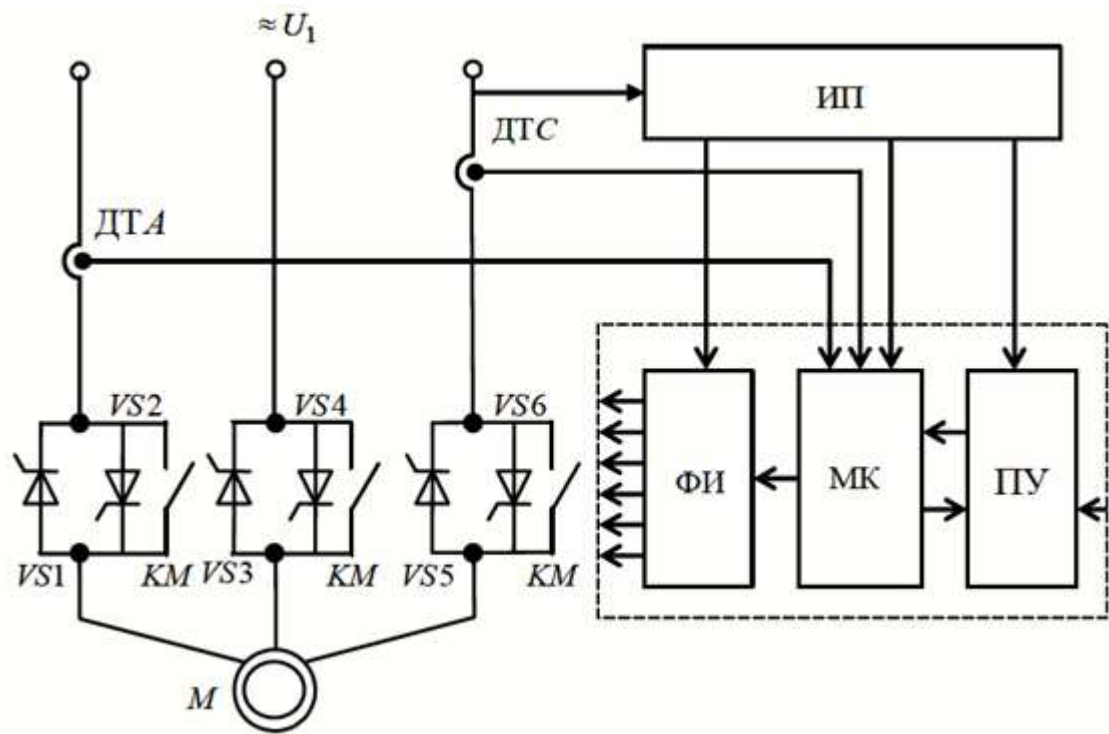


Рис.2.1. Функціональна схема ТРН-АД

Опис схеми керування та силової частини ТРН

Силова частина тиристорного пускового пристрою побудована на базі шести тиристорів (VS1-VS6), що забезпечують плавний розгін трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Оскільки технологічний процес роботи пневмогвинтового насоса не передбачає реверсування, достатньо використання трьох груп тиристорів, що значно спрощує схемотехніку.

Координацію роботи системи здійснює мікроконтролер (МК), який отримує команди через панель управління (ПУ), розміщену на фронтальній частині корпусу. Для керування силовими елементами використовується формувач імпульсів (ФІ), що генерує гальванічно розв'язані позитивні імпульси для відкриття тиристорів.

Важливою особливістю цієї схеми є наявність механічного контактора (КМ). Після завершення динамічного процесу пуску та виходу двигуна на номінальну частоту обертання, тиристорні групи шунтуються контактами контактора. Це дозволяє уникнути непотрібних втрат енергії та нагрівання силових напівпровідників у сталому робочому режимі. Стабільність роботи

електронних вузлів - мікроконтролера та формувача імпульсів - гарантується джерелом живлення (ІП), яке забезпечує їх необхідними стабілізованими рівнями постійної напруги.

Такий підхід до побудови системи дозволяє ефективно поєднати переваги електронного плавного керування під час пуску з енергоефективністю прямого підключення до мережі після виходу на робочий режим.

2.3 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна

У таблиці 2.1 наведено параметри асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором RA160L6.

Таблиця 2.1

Технічні характеристики пневмогвинтових насосів

Параметр	ТП-1	ТФ-1	ТА-14Б	ТЦ-1
Продуктивність, тонн/год	7	15	36	63
Дальність подачі, м	230	230	230	230
Висота подачі, м	30...50	30	30	30
Витрата повітря, м³/хв	5	9	14,5	22
Потужність ел. приводу шнека, кВт	15	15	30	37
Тиск стисненого повітря, МПа	0,3	0,2	0,2	0,2
Габаритні розміри, мм	1925x484x675	2200x820x850	2490x950x800	2585x722x545
Маса, кг	510	560	800	965

Таблиця 2.2

Технічні характеристики електродвигуна RA160L6

Тип	n0, об/хв	U1н, В	Рдв.н, кВт	При номінальному навантаженні (sn,% / cosφн / ηн,%)	Јдв, кг·м²
RA160L6	1000	380	11		

Параметри схеми заміщення визначимо за методикою, викладеною в [8].

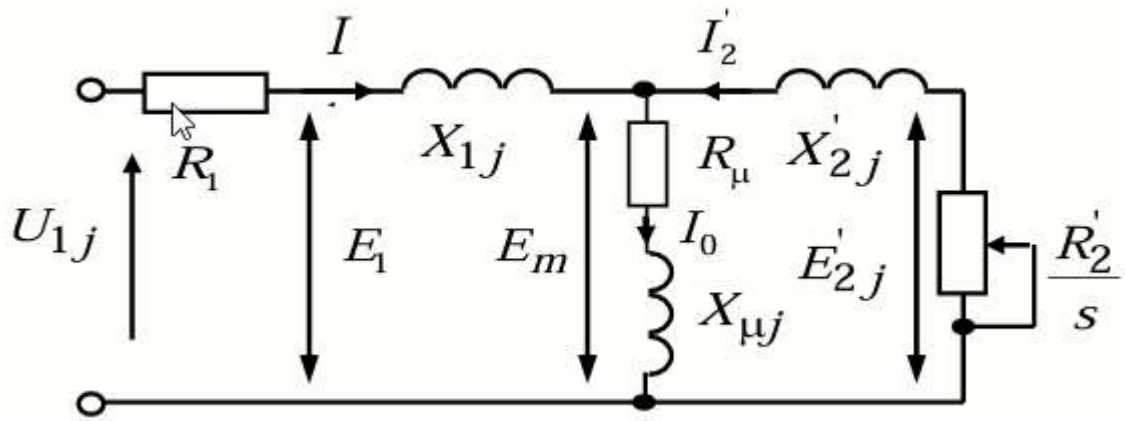


Рис.2.2. Схема заміщення

Розрахунок струму холостого ходу асинхронного двигуна

Формула для розрахунку:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left(p^* \cdot I_{1H} \cdot \frac{1-s_H}{1-p^* \cdot s_H}\right)^2}{1 - \left(p^* \cdot \frac{1-s_H}{1-p^* \cdot s_H}\right)^2}} = \sqrt{\frac{18,418^2 - \left(0,75 \cdot 22,966 \cdot \frac{1-0,03}{1-0,75 \cdot 0,03}\right)^2}{1 - \left(0,75 \cdot \frac{1-0,03}{1-0,75 \cdot 0,03}\right)^2}} \quad (2.1)$$

де

$$I_{1H} = \frac{P_H \cdot 1000}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{11000}{3 \cdot 220 \cdot 0,885 \cdot 0,82} = 22,966 \text{ А} — \text{номінальний струм статора};$$

$$I_{11} = \frac{p^* \cdot P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_z \cdot \eta_z} = \frac{11000 \cdot 0,75}{3 \cdot 220 \cdot 0,76 \cdot 0,893} = 18,418 \text{ А} — \text{струм фази статора при частковому завантаженні};$$

p^* — коефіцієнт завантаження двигуна, приймаємо $p^* = 0,75$;

η_{p^*} — ККД при частковому завантаженні, приймаємо $\eta_{p^*} = 0,893$.

Коефіцієнт потужності при частковому завантаженні, приймаємо згідно з: $\cos \varphi_z = 0,76$.

Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна

Коефіцієнт, що характеризує відношення $\frac{X_\mu + X_{1\sigma}}{X_\mu}$:

$$c_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{10,272}{2 \cdot 6,5 \cdot 22,966} = 1,034 \quad (2.2)$$

Критичне ковзання:

$$s_k = s_n \cdot \frac{m_k + \sqrt{m_k^2 - (1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (m_k - 1))}}{1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (m_k - 1)} =$$

$$= 0,03 \cdot \frac{2,9 + \sqrt{2,9^2 - (1 - 2 \cdot 0,03 \cdot 1 \cdot (2,9 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,03 \cdot 1 \cdot (2,9 - 1)} = 0,191. \quad (2.3)$$

де β - коефіцієнт, значення якого знаходиться в діапазоні 0,6-2,5, приймаємо $\beta = 1$.

Визначимо коефіцієнт:

$$A_1 = m \cdot U_{1n}^2 \cdot \frac{1 - s_n}{2 \cdot C_1 \cdot m_k \cdot P_n} = 3 \cdot 220^2 \cdot \frac{1 - 0,03}{2 \cdot 1,034 \cdot 2,9 \cdot 11000} = 2,134 \quad (2.4)$$

Активний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора асинхронного двигуна:

$$R'_2 = \frac{A_1}{C_1 \cdot \left(\beta + \frac{1}{s_k}\right)} = \frac{2,134}{1,034 \cdot \left(1 + \frac{1}{0,191}\right)} = 0,331 \text{ Ом} \quad (2.5)$$

Активний опір статорної обмотки можна визначити за такою формулою:

$$R_1 = c_1 \cdot R'_2 \cdot \beta = 1,034 \cdot 0,331 \cdot 1 = 0,342 \text{ Ом}$$

Для визначення індуктивного опору короткого замикання X_k спочатку знайдемо допоміжний параметр γ :

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_k}\right)^2 - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,191}\right)^2 - 1^2} = 5,137 \quad (2.6)$$

Тоді індуктивний опір короткого замикання становить:

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_k}\right)^2 - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,191}\right)^2 - 1^2} = 5,137 \quad (2.7)$$

Індуктивний опір статорної обмотки визначається за виразом:

$$X_{1H} = 0,42 \cdot X_{KH} = 0,42 \cdot 1,759 = 0,739 \text{ Ом} \quad (2.8)$$

Ці розрахунки дозволяють точно налаштувати систему керування тиристорним регулятором напруги, забезпечуючи оптимальні характеристики пуску двигуна для роботи з пневмогвинтовим насосом.

Індуктивність обмотки статора, зумовлена потоком розсіювання в номінальному режимі:

$$L_{1H} = \frac{X_{1H}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,739}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 2,351 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (2.9)$$

Індуктивний опір роторної обмотки, приведений до статорної, розраховується як:

$$X'_{2H} = \frac{0,58 \cdot X_{KH}}{c_1} = \frac{0,58 \cdot 1,759}{1,034} = 0,986 \text{ Ом} \quad (2.10)$$

Індуктивність обмотки ротора, зумовлена потоком розсіювання в номінальному режимі:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{1,45}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 3,211 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (2.11)$$

Для верифікації раніше отриманих значень проводиться розрахунок критичного ковзання s_{K1} за уточненою формулою:

$$s_{K1} = \frac{C_1 \cdot R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2}} = \frac{1,034 \cdot 0,339}{\sqrt{0,342_{\text{в}}^2 + 1,759^2}} = 0,191 \quad (2.12)$$

Оскільки значення $s_K = s_{K1}$, коригування коефіцієнта β не потребується.

Для подальшого моделювання системи ТРН-АД важливо визначити ЕРС гілки намагнічування E_1 , що наводиться потоком у повітряному зазорі в номінальному режимі:

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

$$= \sqrt{(220 \cdot 0,82 - 22,966 \cdot 0,342)^2 + (220 \cdot 0,572 - 22,966 \cdot 0,739)^2} = 2$$
(2.13)

$$(\text{де } \sin \varphi_H = \sin(\arccos(0,82)) = 0,572)$$

Знаючи значення ЕРС та струму холостого ходу I_0 , отримуємо індуктивний опір контуру намагнічування X_μ :

$$X_\mu = \frac{E_1}{I_0} = \frac{204,06}{10,272} = 19,866 \text{ Ом}$$
(2.14)

Результуюча індуктивність, зумовлена магнітним потоком у повітряному зазорі, що створюється сумарною дією струмів статора (індуктивність контуру намагнічування):

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{19,866}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,063 \text{ Гн}$$
(2.15)

Розраховані параметри схеми заміщення зведені в таблицю 2.3.

Таблиця 2.3

Параметри схеми заміщення електродвигуна

R_1 , Ом	X_{1H} , Ом	L_{1H} , Гн	R_2' , Ом	X_{2H}' , Ом	L_{2H}' , Гн	X_μ , Ом	X_{KH} , Ом	L_μ , Гн
0,342	0,739	0,002351	0,331	0,986	0,003139	19,866	1,759	0,063

2.4 Розрахунок механічних та електромеханічних характеристик асинхронного двигуна

Синхронна кутова швидкість:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50}{3} = 104,72 \text{ рад/с} \quad (2.16)$$

Номінальна кутова швидкість:

$$\omega_H = \omega_0 \cdot (1 - s_H) = 104,72 \cdot (1 - 0,03) = 101,578 \text{ рад/с} \quad (2.17)$$

Критична кутова швидкість:

$$\omega_K = \omega_0 \cdot (1 - s_K) = 104,72 \cdot (1 - 0,191) = 84,711 \text{ рад/с} \quad (2.18)$$

Природна електромеханічна характеристика для частоти мережі 50 Гц розраховується за наступним виразом:

$$I_1(\omega) = \sqrt{I_0^2 + I_2'(\omega)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(\omega) \cdot \sin \varphi_2(s)} \quad (2.19)$$

Струм холостого ходу (приведений до обмотки статора):

$$I_0 = \frac{U_{1\phi H}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1H} + X_\mu)^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,342^2 + (0,739 + 19,866)^2}} = 10,272 \text{ А} \quad (2.20)$$

Струм ротора (I_2) як функція ковзання (s) обчислюється за формулою:

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\phi H}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu}\right)^2}} \quad (2.21)$$

Розрахунок струмів ротора в характерних режимах

Струм у роторі при номінальному ковзанні ($s_H = 0,03$):

$$I'_{2H}(s) = \frac{U_{1\phi H}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s_H}\right)^2 + X_{KH}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s_H \cdot X_\mu}\right)^2}} =$$

$$= \frac{220}{\sqrt{\left(0,342 + \frac{0,331}{0,03}\right)^2 + 1,759^2 + \left(\frac{0,342 \cdot 0,331}{0,03 \cdot 19,866}\right)^2}} = 19,111 \text{ A} \quad (2.22)$$

Струм у роторі при критичному ковзанні ($s_{кр} = 0,191$):

$$I'_{2кр}(s) = \frac{U_{1\phi H}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s_{кр}}\right)^2 + X_{KH}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s_{кр} \cdot X_\mu}\right)^2}} =$$

$$= \frac{220}{\sqrt{\left(0,342 + \frac{0,331}{0,191}\right)^2 + 1,759^2 + \left(\frac{0,342 \cdot 0,331}{0,191 \cdot 19,866}\right)^2}} = 80,884 \text{ A} \quad (2.23)$$

Вираз для визначення синуса кута фазового зсуву $\varphi_2(s)$, що залежить від ковзання (швидкості обертання ротора), має вигляд:

$$\sin \varphi_2(s) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}}\right)^2 + X_{KH}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \cdot X_\mu}\right)^2}} \quad (2.24)$$

$$\sin \varphi_{2H}(s) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s_H}\right)^2 + X_{KH}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s_H \cdot X_\mu}\right)^2}} =$$

$$= \frac{1,759}{\sqrt{\left(0,342 + \frac{0,331}{0,03}\right)^2 + 1,759^2 + \left(\frac{0,342 \cdot 0,331}{0,03 \cdot 19,866}\right)^2}} = 0,153 \text{ A} \quad (2.25)$$

Чинне значення струму холостого ходу при критичному ковзанні:

$$\begin{aligned} \sin \varphi_{2kp}(s) &= \frac{X_{KH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s_{kp}}\right)^2 + X_{KH}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_{kp} \cdot X_\mu}\right)^2}} = \\ &= \frac{1,759}{\sqrt{\left(0,342 + \frac{0,331}{0,191}\right)^2 + 1,759^2 + \left(\frac{0,342 \cdot 0,331}{0,191 \cdot 19,866}\right)^2}} = 0,647 \text{ A} \end{aligned} \quad (2.26)$$

Струм статора при критичному ковзанні:

$$\begin{aligned} I_1(\omega_{kp}) &= \sqrt{I_0^2 + I_2'(\omega_{kp})^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(\omega_{kp}) \cdot \sin \varphi_{2kp}(s_{kp})} = \\ &= \sqrt{10,272^2 + 80,87^2 + 2 \cdot 10,272 \cdot 80,87 \cdot 0,647} = 87,458 \text{ A} \end{aligned} \quad (2.27)$$

На рис.2.3 показано природну електромеханічну характеристика струму статора.

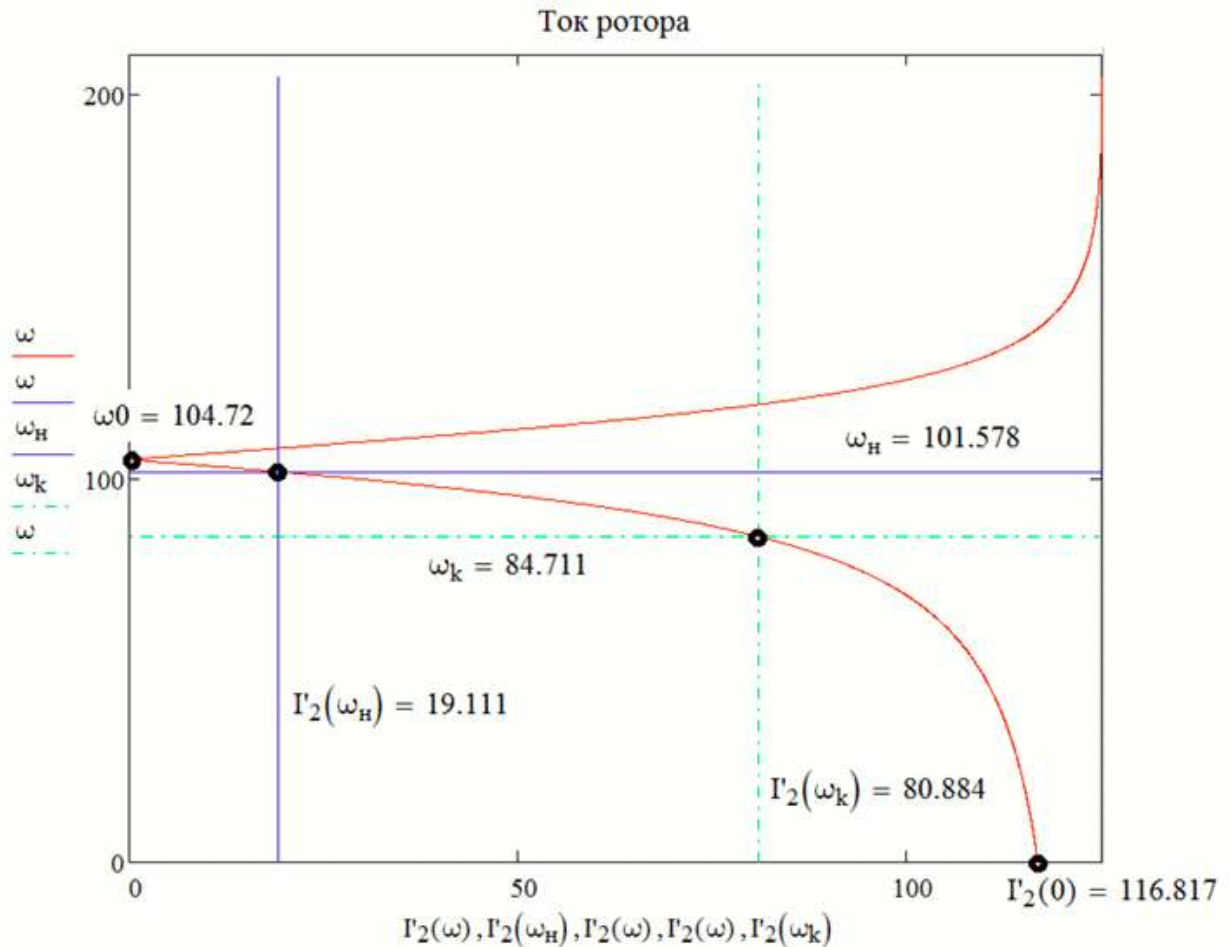


Рис.2.3. Природна електромеханічна характеристика струму ротора

Номінальна швидкість обертання двигуна дорівнює $\omega_n = 101,578$ рад/с, струм ротора двигуна при номінальній швидкості дорівнює $I_2'(\omega_n) = 19,111$ А. На електромеханічній характеристиці видно перетин ліній швидкості та струму, отже, номінальна точка характеристики розрахована правильно.

Другою контрольною точкою є критична, при якій момент є максимальним. У цій точці лінія швидкості зі значенням $\omega_k = 84,711$ рад/с перетинається з лінією $I_2'(\omega_k) = 80,884$ А. Відповідно, точку розраховано вірно. При ковзанні, що дорівнює одиниці (режим короткого замикання), струм у роторі двигуна дорівнює 116,817 А. При синхронній швидкості обертання струм дорівнює нулю, а швидкість обертання дорівнює 104,72 рад/с, ковзання дорівнює нулю.

На рисунку 2.4 показана природна електромеханічна характеристика для струму статора.

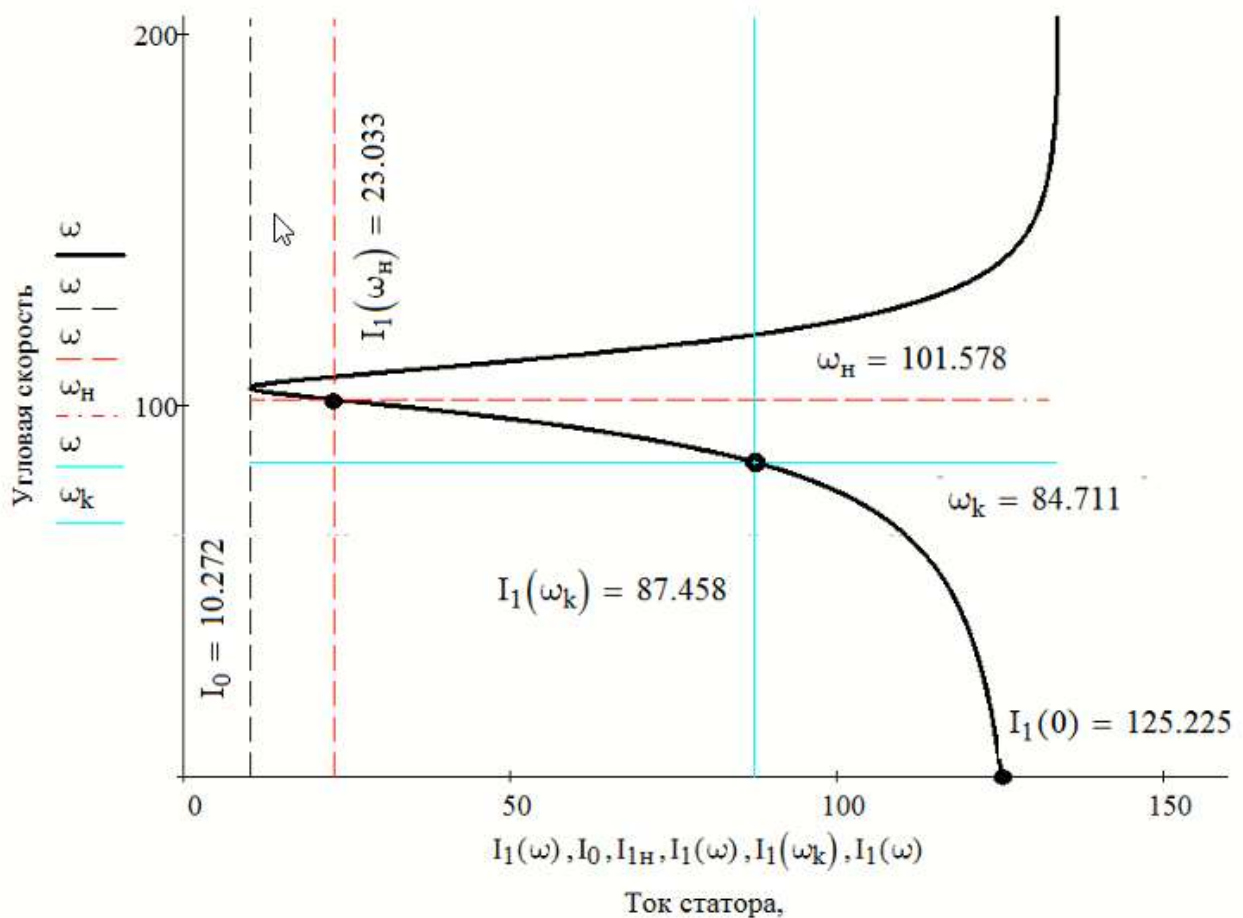


Рис.2.4. Природна електромеханічна характеристика для струму статора

Першою контрольною точкою є точка номінального режиму роботи при номінальній швидкості обертання двигуна, яка дорівнює 101,578 рад/с. Струм статора двигуна при номінальній швидкості дорівнює $I_1(\omega_H) = 23$ А. У точці номінального режиму роботи відбувається перетин лінії струму статора та номінальної швидкості обертання двигуна, отже, точку розраховано правильно. Другою контрольною точкою є критична, при якій момент є максимальним. У цій точці лінія швидкості зі значенням $\omega_k = 84,711$ рад/с перетинається з лінією $I_1(\omega_k) = 87,458$ А. Відповідно, точку розраховано правильно. При ковзанні, що дорівнює одиниці (режим короткого замикання), струм у роторі двигуна дорівнює 125,225 А. Це значення не збігається з

розрахунковим. Це пов'язано з витісненням струму у провідниках: відповідно, опір зростає, отже, пусковий струм стає меншим. Також на характеристиці видно, що вона починається не від початку осі ординат (осі швидкості), а від певного значення, яке дорівнює струму холостого ходу двигуна.

Він дорівнює $I_0 = 10,272 \text{ A}$.

Виходячи з отриманих результатів, можна стверджувати, що характеристика побудована правильно, оскільки відбувається перетин номінального струму та номінальної швидкості в номінальному режимі, перетин лінії критичної швидкості та струму при критичному ковзанні в точці критичного ковзання, а швидкість дорівнює синхронній у точці перетину характеристики з лінією струму холостого ходу. За паспортними даними номінальний струм двигуна дорівнює 23 А, а за розрахунковими даними - 22,966 А, що підтверджує правильність розрахункових виразів.

Формула для розрахунку природної механічної характеристики:

$$M(\omega) = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} \quad (2.28)$$

Перевірка адекватності розрахункових параметрів двигуна

При знайдених параметрах розраховуються значення номінального електромагнітного моменту двигуна.

$$M_{\Sigma M, H}^* = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_H \cdot \left[X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_H} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_H \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,331}{104,72 \cdot 0,03 \cdot \left[1,759^2 + \left(0,342 + \frac{0,331}{0,03} \right)^2 + \left(\frac{0,342 \cdot 0,331}{0,03 \cdot 19,866} \right)^2 \right]} = 115,436 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.29)$$

$$M_{\Sigma M, H}^{**} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{(L_m + L_{2\sigma})} \cdot \Psi_{2H} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1H}^2 - I_0^2} =$$

$$= \frac{3}{2} \cdot 3 \cdot \frac{0,063}{(0,063 + 3,139 \cdot 10^{-3})} \cdot 0,919 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{23^2 - 10,272^2} = 114,402 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.30)$$

$$\Psi_{2H} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m = \sqrt{2} \cdot 10,272 \cdot 0,063 = 0,919 \text{ Вб}. \quad (2.31)$$

Номинальний момент двигуна дорівнює:

$$M_{двH} = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{11000}{101,578} = 108,291 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.32)$$

Повинні виконуватись умови:

$$M_{дв, H} < M_{\Sigma M, H}^* \leq 1,1 \cdot M_{дв, H} = 108,291 < 115,436 \leq 119,1201; \quad (2.33)$$

$$M_{\Sigma M, H}^{**} \approx M_{\Sigma M, H}^* \cdot 115,436 \approx 114,402$$

На рисунку 2.5 показано природну механічну характеристику.

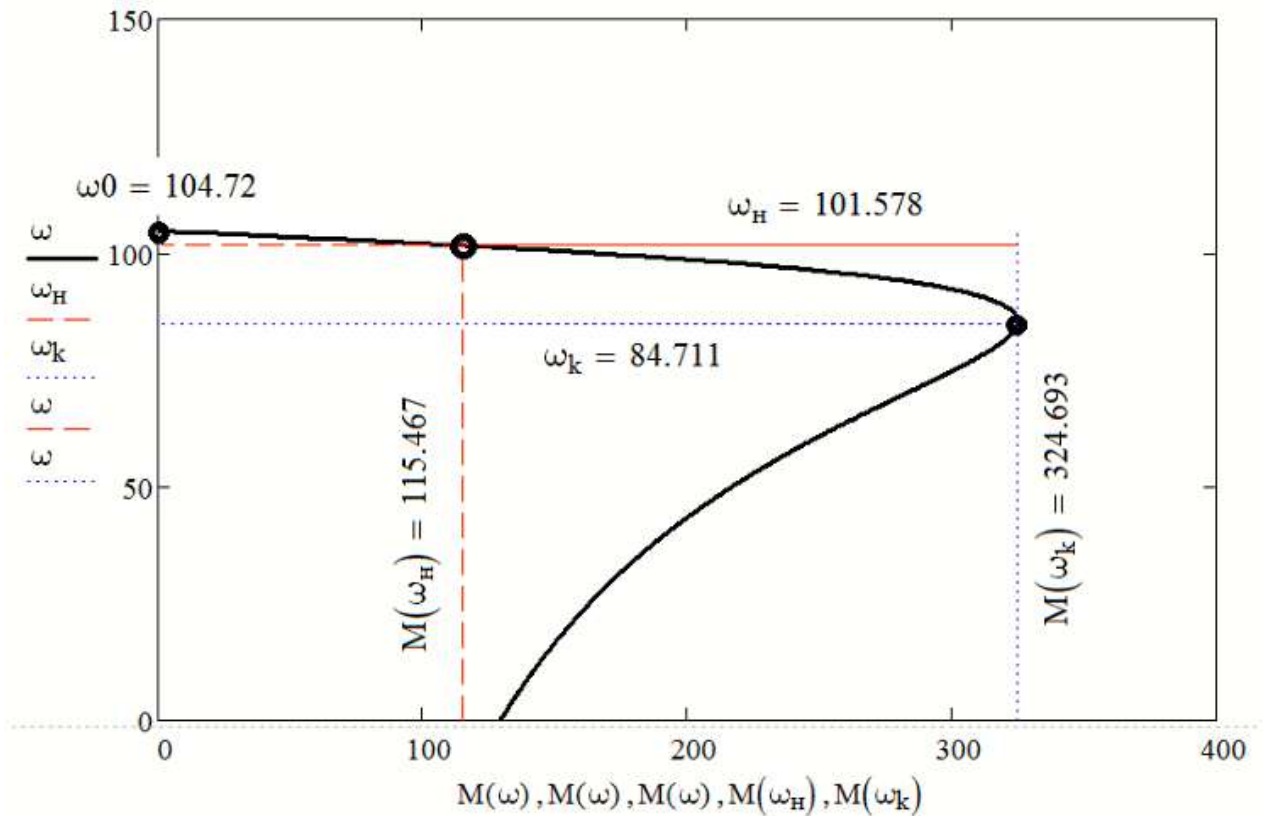


Рис.2.5.Механічна характеристика

Першою контрольною точкою є точка номінального режиму роботи при номінальній швидкості обертання двигуна, яка дорівнює 101,578 рад/с. Момент двигуна при номінальній швидкості дорівнює $M = 115,467$ Н·м. У точці номінального режиму роботи відбувається перетин лінії моменту двигуна та номінальної швидкості обертання двигуна, отже, точку розраховано правильно.

Другою контрольною точкою є критична, при якій момент є максимальним. У цій точці лінія швидкості зі значенням $\omega_n = 84,711$ рад/с перетинається з лінією моменту $M = 324,693$ Н·м. Відповідно, точку розраховано правильно.

2.5 Структурна схема асинхронного двигуна

Структурна схема асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у системі координат, що обертається (d, q), представлена на рисунку 2.6 [8].

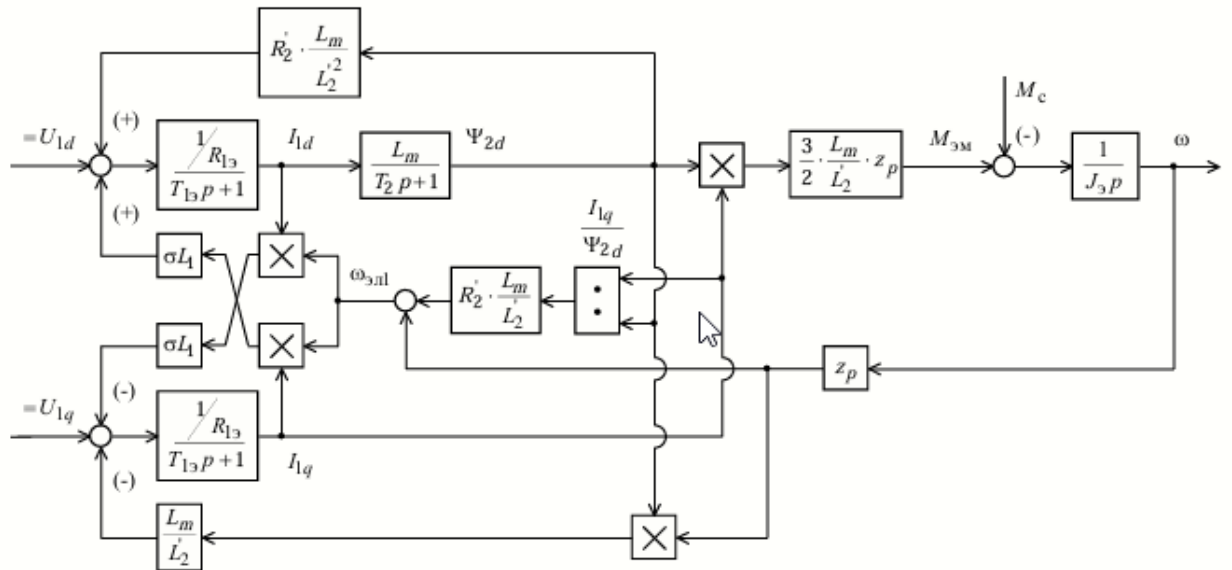


Рис.2.6. Структурна схема АТ у системі координат, що обертається d, q

Математичний опис даної моделі:

$$\begin{cases}
 \frac{dI_{1d}}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1d} - \frac{R_{13}}{\sigma \cdot L_1} \cdot I_{1d} + \frac{R_2' \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2'} \cdot \Psi_{2d} + \omega_{\text{кc}} \cdot I_{1q} \\
 \frac{dI_{1q}}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1q} - \frac{R_{13}}{\sigma \cdot L_1} \cdot I_{1q} - \omega_{\text{кc}} \cdot I_{1d} - \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2'} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2d} \\
 \frac{d\Psi_{2d}}{dt} = -\frac{R_2'}{L_2'} \cdot \Psi_{2d} + \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2'} \cdot I_{1d} \\
 0 = -\frac{R_2' \cdot L_m}{L_2'} \cdot I_{1q} - (\omega_{\text{кc}} - z_p \cdot \omega) \cdot \Psi_{2d} \\
 M_{3\text{м}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2'} \cdot z_p \cdot \Psi_{2d} \cdot I_{1q} \\
 J_3 \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{3\text{м}} - M_c
 \end{cases} \quad (2.34)$$

$U_{1d} = U_{1q} = U_1$ — постійні за формою складові напруги статора в орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора Ψ_2 , що обертається синхронно з полем статора, системі координат d, q .

I_{1d}, I_{1q} — складові струму статора в системі координат d, q , А.

$\Psi_{2d} = |\Psi_2|$ — потокозчеплення ротора в системі координат d, q , Вб.

В операторній формі запису:

$$\begin{cases}
 U_{1d} = R_{1\sigma} (T_{1\sigma} \cdot p + 1) \cdot I_{1d} - \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2'^2} \cdot \Psi_{2d} - \omega_{\kappa\sigma} \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1q}; \\
 U_{1q} = R_{1\sigma} (T_{1\sigma} \cdot p + 1) \cdot I_{1q} + \omega_{\kappa\sigma} \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1d} - \frac{L_m}{L_2'^2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2d}; \\
 0 = (T_2 p + 1) \cdot \Psi_{2d} - L_m \cdot I_{1d}; \\
 \omega_{\kappa\sigma} = z_p \cdot \omega + \frac{L_m \cdot R_2'}{L_2'} \cdot \frac{I_{1q}}{\Psi_{2d}}; \\
 M_{\text{эм}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2'} \cdot z_p \cdot \Psi_{2d} \cdot I_{1q}; \\
 \omega = \frac{1}{J_\sigma \cdot p} \cdot (M_{\text{эм}} - M_c).
 \end{cases} \quad (2.35)$$

Цим рівнянням відповідає структурна схема (рисунк 2.7).

2.6 Розрахунок перехідних процесів пуску асинхронного двигуна прямим включенням у мережу та при зміні навантаження. Аналіз отриманих результатів

Схема отримання графіків прямого пуску показано на рис. 2.7.

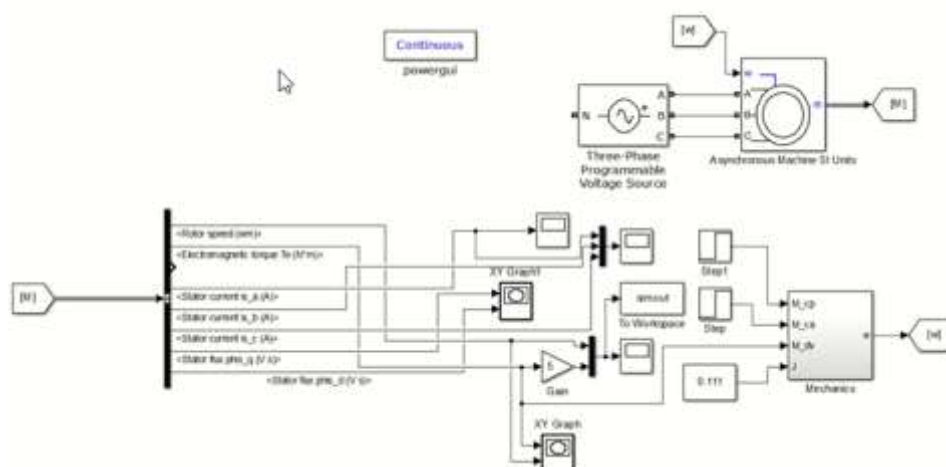


Рис. 2.7. Імітаційна модель для отримання перехідних процесів прямого пуску

Параметри двигуна показано на рис.2.8.

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]:

Stator resistance and inductance [Rs(ohm) Lls(H)]:

Rotor resistance and inductance [Rr'(ohm) Llr'(H)]:

Mutual inductance Lm (H):

Pole pairs p ():

Рис.2.8. Параметри двигуна

На рисунках 2.9, 2.10, 2.11 та 2.12 показано графіки перехідних процесів двигуна при пуску та прикладанні статичного навантаження для струмів, електромагнітного моменту двигуна та частоти обертання.

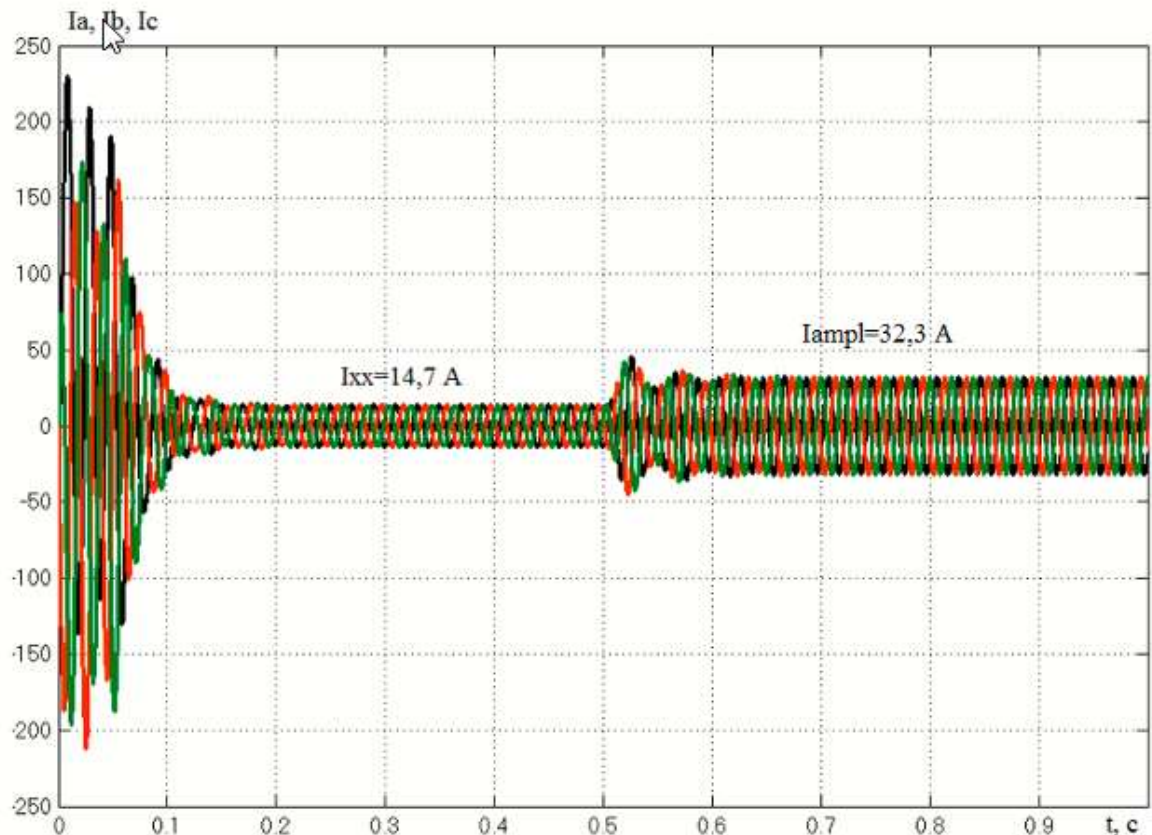


Рис.2.9. Графік струмів статора

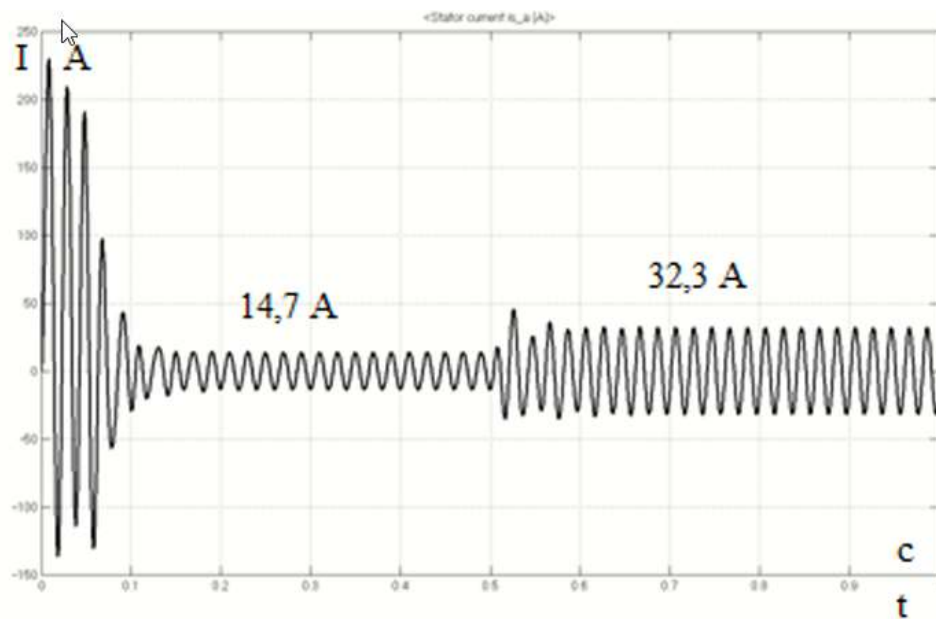


Рис.2.10. Графік струму статора фази А

На рисунках 2.9 і 2.10 видно, що при прямому пуску відбувається великий стрибок струму, у зв'язку з тим, що в початковий момент пуску ротор нерухомий, тобто ковзання дорівнює одиниці. Відповідно, двигун працює як трансформатор, ніби його вторинні обмотки замкнуті. Потім ковзання починає зменшуватися, двигун набирає швидкість, і струм падає до струму холостого ходу, який дорівнює $I_{1h} \approx 22,9$ А (розрахунковий 22,966 А) та $I_0 \approx 10,3$ А (розрахунковий 10,272 А); розрахунковий струм практично дорівнює струму при моделюванні. Потім відбувається накидання навантаження, після чого струм збільшується до певної величини. Отримані розрахункові значення та графічні практично однакові, що свідчить про правильність моделювання двигуна.

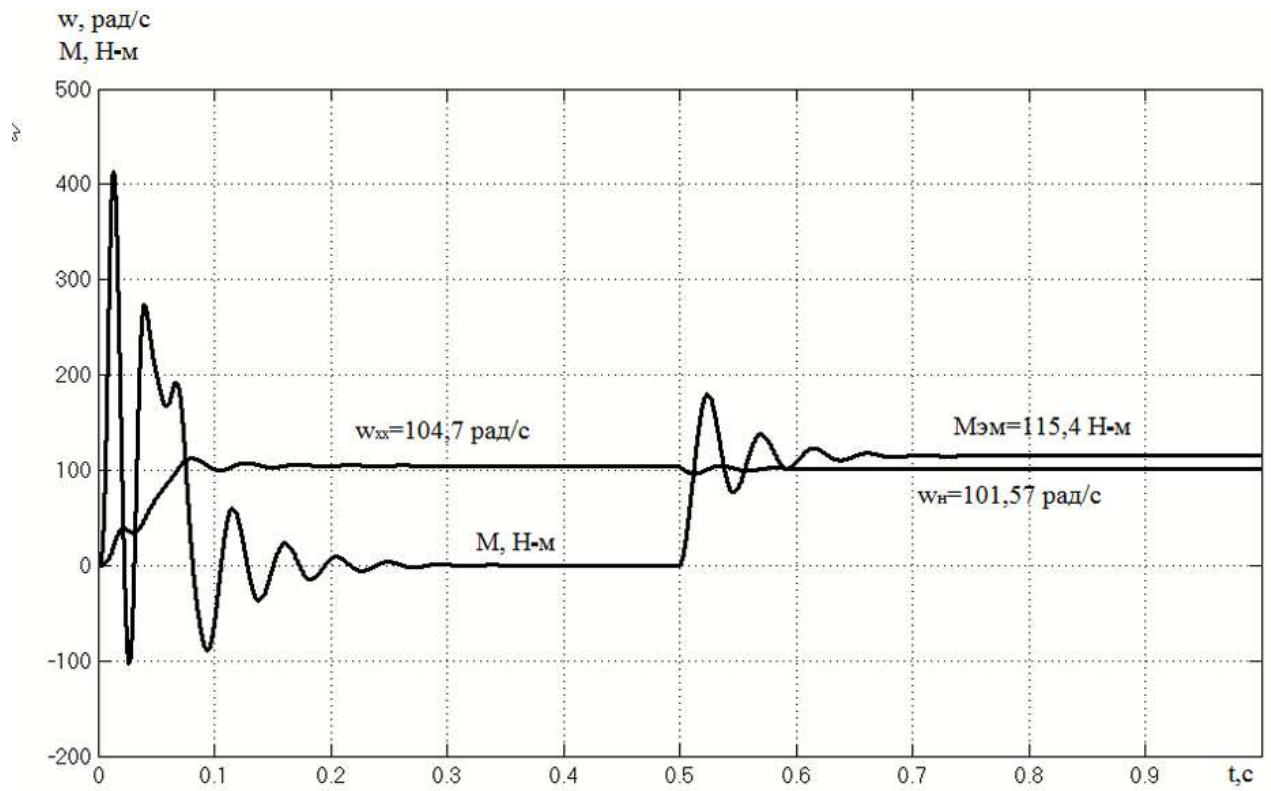


**Рис. 2.11. Графік електромагнітного моменту та частоти обертання
двигуна**

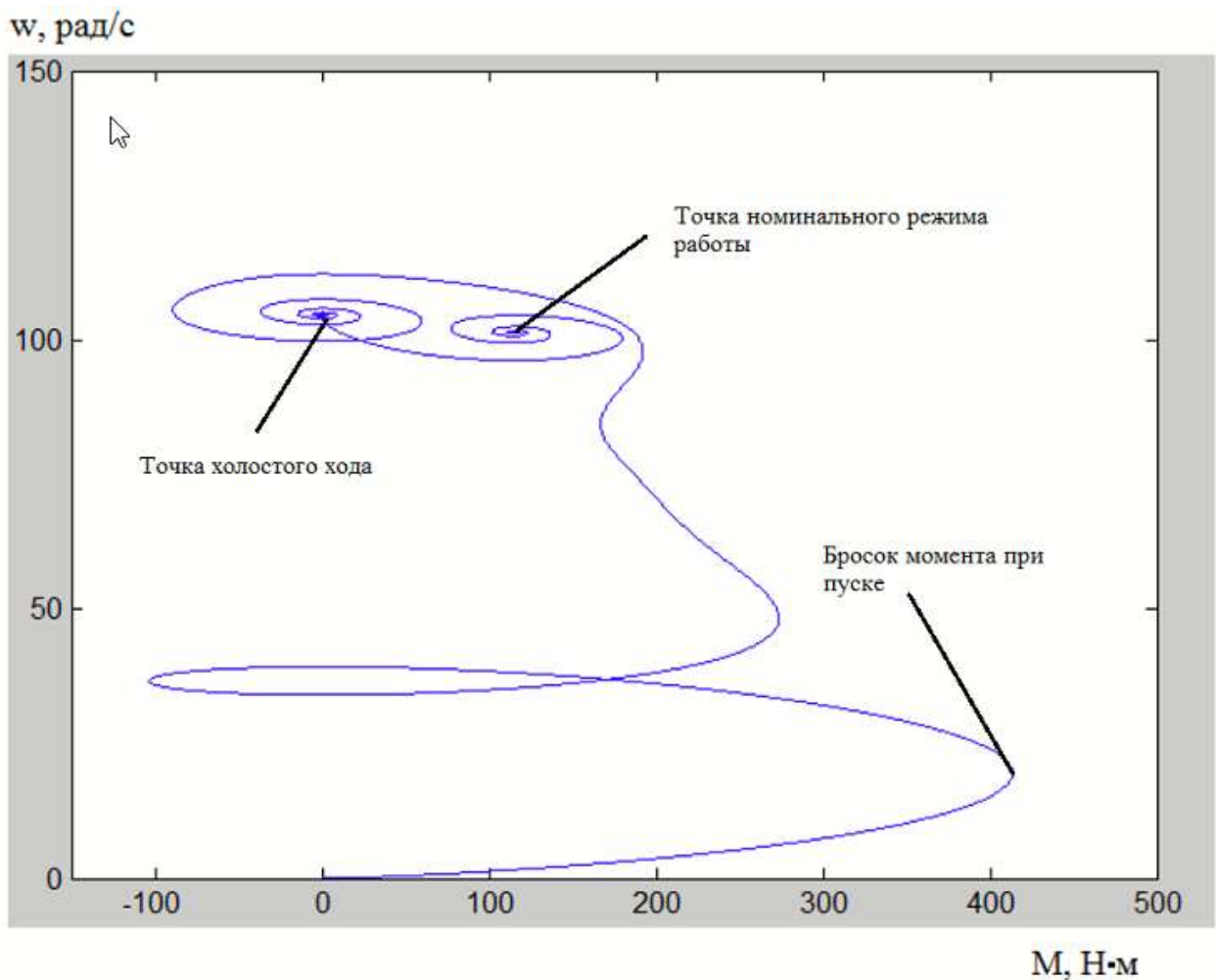


Рис.2.12. Динамічна механічна характеристика

На рисунку 2.12 видно, що при пуску двигуна відбувається великий стрибок моменту. У подальшому момент падає до нуля, оскільки двигун обертається на холостому ходу. Після чого відбувається накидання навантаження і момент стає рівним $M = 115,4$ Н·м. Швидкість на холостому ходу дорівнює синхронній швидкості обертання, тобто $\omega_0 = 104,7$ рад/с.

При накиданні номінального навантаження частота обертання двигуна падає до номінальної частоти обертання $\omega_1 = 101,57$ рад/с.

На динамічній механічній характеристиці показано залежність частоти обертання двигуна від електромагнітного моменту. На рисунку 19 видно, що стрибок моменту дорівнює стрибку моменту на рисунку 18. У подальшому двигун виходить на усталений режим - холостий хід (характеристика моменту обертається навколо даної точки $\omega = \omega_0, M = 0$).

Потім відбувається накидання навантаження, і характеристика починає обертатися навколо точки номінального режиму роботи (M_n, ω_n).

2.7 Обґрунтування та вибір функціональної схеми електропривода змінного струму з фазовим регулюванням швидкості. Призначення та сфера застосування.

2.7.1 Обґрунтування та вибір регулятора напруги

Оскільки пневмогвинтовий насос має шнек, то, виходячи з таблиці 4.2 [14], привод має важкий пуск. Отже, потрібен софтстартер (пристрій плавного пуску), що дозволяє здійснити обмеження струму при такому пуску. Важкий режим роботи характеризується наявністю навантаження, що має більше значення моменту інерції та потребує значення пускового струму $I_{\text{пуск}} < 4,5 \cdot I_n$, з часом пуску, що не перевищує 30 с.

Для електропривода обираємо софтстартер ЕНЕРДЖИСЕЙВЕР ES11 (ES11) вик. IP54 УХЛ4 380В, 24 А, 11 кВт із такими характеристиками [9], наведеними в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

Контролер	Характеристики
ЕнерджиСейвер ES11 вик. IP54 УХЛ4 380В, 24А, 11кВт	Номінальна напруга, В: 380
	Допустимий номінальний струм двигуна при легкому та нормальному режимі запуску, А, не більше: 24
	Допустимий номінальний струм двигуна при важкому режимі запуску, А, не більше: 24
	Допустимий номінальний струм двигуна при дуже важкому режимі запуску, А, не більше: 24
	Функція енергозбереження та корекції коефіцієнта потужності: +
	Наявність інтерфейсу RS485: +
	Ступінь захисту: IP54
	Діапазон робочих температур: -10...+40 °C

Ступінь захисту **IP54** є оптимальним вибором для роботи в умовах цементного виробництва. раховуючи специфіку роботи гвинтового насоса, де

концентрація пилу в повітрі може бути високою, вибір IP54 суттєво подовжує термін служби софтстартера (пристрою плавного пуску), запобігаючи перегріву через забруднення радіаторів та коротким замиканням на платах.

2.7.2 Розрахунок електромеханічних та механічних характеристик розімкнутої системи «регулятор напруги-асинхронний двигун» для різних напруг, що задають

На рисунках 2.13, 2.14 показані механічні та електромеханічні характеристики, отримані для $0.2U_{1н}$, $0.4U_{1н}$, $0.6U_{1н}$, $0.8U_{1н}$.

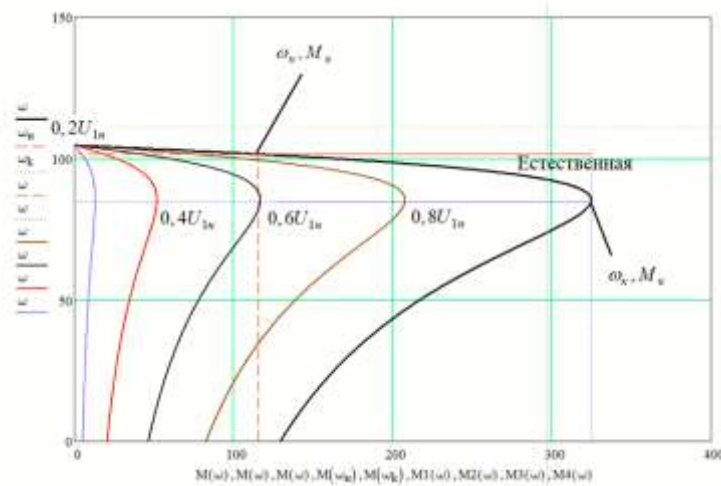


Рис.2.13. Механічні характеристики при зміні живильної напруги

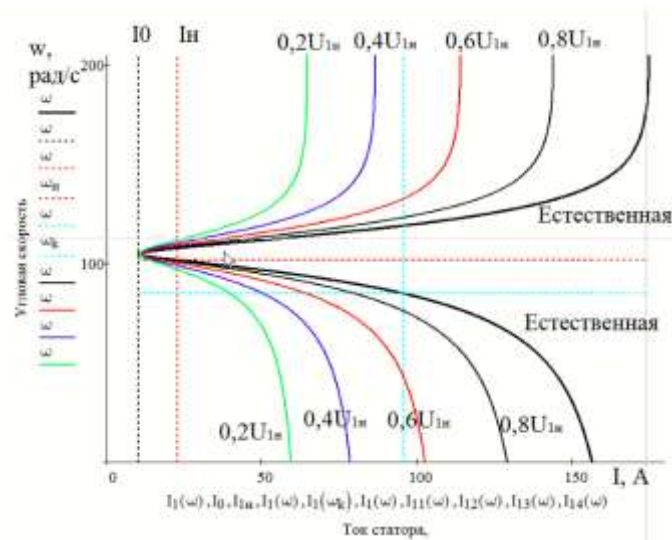


Рис. 2.14. Електромеханічні характеристики при зміні напруги живлення

2.7.3 Аналіз отриманих результатів

При зміні напруги живлення істотно зменшується критичний момент двигуна (пропорційно квадрату напруги).

$$M(\omega) = \frac{3 \cdot U_{1\phi n}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \cdot \left[X_{\kappa n}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} \quad (2.36)$$

Ці характеристики отримані без урахування падінь напруги в мережі живлення, при комутації тиристорів тощо. Отже, у реальному приводі двигун може не запуститися при великому статичному навантаженні. Аналізуючи отримані електромеханічні характеристики, можна зробити висновок про те, що пропорційно напрузі зменшується струм короткого замикання, що сприятливо позначається на двигуні та мережі живлення, а також на динаміці електропривода. З електромеханічних характеристик видно, що струм короткого замикання знизився практично в 3 рази при напрузі живлення $0,2U_{1n}$ порівняно з природною характеристикою при номінальній напрузі. Також зменшується

споживаний струм двигуна при однакових швидкостях. Однак вирішальне значення мають механічні характеристики.

2.8 Втрати в асинхронному двигуні при роботі на штучних характеристиках

При роботі на природній характеристиці втрати визначаються наступними виразами: Для повного опису втрат при роботі на штучних характеристиках (яку забезпечує ваш пристрій плавного пуску), вам слід додати формули, що враховують вплив регульованої напруги (U) та ковзання (s). Зокрема:

$$\begin{aligned}\Delta P_{M1} &= \left[\frac{I_0}{I_{1H}} + \left(1 - \frac{I_0}{I_{1H}} \right) \mu_c^2 \right] \cdot \Delta P_{M1H}; \\ \Delta P_{M2} &= \mu_c^2 \cdot \Delta P_{M2H}; \\ \Delta P_{c1} &= \left[B + (1 - B) \mu_c^2 \right] \cdot \Delta P_{c1H},\end{aligned}\tag{2.37}$$

$$\begin{aligned}\Delta P_{M1} &= 1,1 \cdot \mu_c^2 \left[\frac{I_0 \cdot s_H}{I_{1H} \cdot s} + \left(1 - \frac{I_0}{I_{1H}} \right) \frac{s_H}{s} \right] \cdot \Delta P_{M1H}; \\ \Delta P_{M2} &= 1,1 \cdot \mu_c^2 \left(\frac{s}{s_H} \right) \cdot \Delta P_{M2H}; \\ \Delta P_{c1} &= \mu_c^2 \cdot \left[B \frac{s_H}{s} + (1 - B) \frac{s}{s_H} \right] \cdot \Delta P_{c1H}.\end{aligned}\tag{2.38}$$

Розрахунок втрат для природної характеристики:

$$\begin{aligned}I_2(\omega_H) &= 19.211 & \omega_H &= 101.578 & \Gamma_2(101.85) &= 17.613 \\ \Gamma_{22} &:= \Gamma_2(\omega_H) \\ \Delta P_{M1H} &:= 3 \cdot I_{1H}^2 \cdot R_1 = 541.739 \\ \Delta P_{M2H} &:= 3 \cdot \Gamma_{22}^2 \cdot R_2' = 366.442 \\ \Delta P_H &:= \frac{P_H \cdot (1 - \eta_H)}{\eta} = 1.429 \times 10^3\end{aligned}\tag{2.39}$$

$$\begin{aligned}
\Delta P_{c1H} &:= \Delta P_H - \left(\Delta P_{m1H} + 1.5 \cdot 10^{-2} \cdot P_H + 10^{-2} \cdot \frac{P_H \cdot s_H}{1 - s_H} \right) = 719.237 \\
M_c &:= M(101.61) = 114.419 \\
\mu_c &:= \frac{M_c}{M_{mn}} = 0.991 \\
\Delta P_{m1} &:= \left[\frac{I_0}{I_{1H}} + \left(1 - \frac{I_0}{I_{1H}} \right) \mu_c^2 \right] \cdot \Delta P_{m1H} = 536.656 \\
\Delta P_{m2} &:= \mu_c^2 \cdot \Delta P_{m2H} = 360.016 \\
\Delta P &:= \Delta P_{m1} + \Delta P_{m2} + \Delta P_{c1H} = 1.616 \times 10^3
\end{aligned}$$

(2.40)

Розрахунок втрат для характеристики при 0,8U:

$$\begin{aligned}
\omega_{08} &:= 99.919 \\
s_{08} &:= \frac{\omega_0 - \omega_{08}}{\omega_0} = 0.046 \\
M_c &:= 106.83 = 106.83 \\
\mu_c &:= \frac{M_c}{M_{mn}} = 0.925 \\
\Delta P_{m11} &:= 1.1 \cdot \mu_c^2 \left[\frac{I_0 \cdot s_H}{I_{1H} \cdot s_{08}} + \left(1 - \frac{I_0}{I_{1H}} \right) \frac{s_H}{s_{08}} \right] \cdot \Delta P_{m1H} = 333.987 \\
\Delta P_{m21} &:= 1.1 \mu_c^2 \cdot \Delta P_{m2H} \cdot \left(\frac{s_{08}}{s_H} \right) = 527.55
\end{aligned}$$

(2.41)

$$B := 0.98$$

$$\begin{aligned}
\Delta P_{c11} &:= \mu_c^2 \cdot \left[B \cdot \frac{s_H}{s_{08}} + (1 - B) \cdot \frac{s_{08}}{s_H} \right] \cdot \Delta P_{c1H} = 413.869 \\
\Delta P_1 &:= \Delta P_{m11} + \Delta P_{m21} + \Delta P_{c11} = 1.275 \times 10^3
\end{aligned}$$

(2.42)

Розрахунок втрат для 0,6U:

$$\omega_{08} := 99.919$$

$$s_{08} := \frac{\omega_0 - \omega_{08}}{\omega_0} = 0.046$$

$$M_c := 106.83 = 106.83$$

$$\mu_c := \frac{M_c}{M_{emn}} = 0.925$$

(2.41)

$$\Delta P_{m11} := 1.1 \cdot \mu_c^2 \left[\frac{I_0 \cdot s_H}{I_{1H} \cdot s_{08}} + \left(1 - \frac{I_0}{I_{1H}} \right) \frac{s_H}{s_{08}} \right] \cdot \Delta P_{m1H} = 333.987$$

$$\Delta P_{m21} := 1.1 \mu_c^2 \cdot \Delta P_{m2H} \cdot \left(\frac{s_{08}}{s_H} \right) = 527.55$$

$$B := 0.98$$

$$\Delta P_{c11} := \mu_c^2 \cdot \left[B \cdot \frac{s_H}{s_{08}} + (1 - B) \cdot \frac{s_{08}}{s_H} \right] \cdot \Delta P_{c1H} = 413.869$$

(2.42)

$$\Delta P_1 := \Delta P_{m11} + \Delta P_{m21} + \Delta P_{c11} = 1.275 \times 10^3$$

Розрахунок втрат для 0,6U:

$$\omega_{06} := 96.3$$

$$s_{06} := \frac{\omega_0 - \omega_{06}}{\omega_0} = 0.08$$

$$M_c := 89.3 = 89.3$$

$$\mu_c := \frac{M_c}{M_{emn}} = 0.774$$

(2.43)

$$\Delta P_{m11} := 1.1 \cdot \mu_c^2 \left[\frac{I_0 \cdot s_H}{I_{1H} \cdot s_{06}} + \left(1 - \frac{I_0}{I_{1H}} \right) \frac{s_H}{s_{06}} \right] \cdot \Delta P_{m1H} = 133.063$$

$$\Delta P_{m21} := 1.1 \mu_c^2 \cdot \Delta P_{m2H} \cdot \left(\frac{s_{06}}{s_H} \right) = 646.503$$

$$B := 0.98$$

(2.44)

$$\Delta P_{c11} := \mu_c^2 \cdot \left[B \cdot \frac{s_H}{s_{06}} + (1 - B) \cdot \frac{s_{06}}{s_H} \right] \cdot \Delta P_{c1H} = 180.459$$

$$\Delta P_1 := \Delta P_{m11} + \Delta P_{m21} + \Delta P_{c11} = 960.024$$

Розрахунок втрат для 0.4 U:

$$\begin{aligned}
\omega_{04} &:= 84.919 \\
s_{04} &:= \frac{\omega_0 - \omega_{04}}{\omega_0} = 0.189 \\
M_c &:= 52.417 = 52.417 \\
\mu_c &:= \frac{M_c}{M_{emn}} = 0.454 \\
\Delta P_{m11} &:= 1.1 \cdot \mu_c^2 \left[\frac{I_0 \cdot s_H}{I_{1H} \cdot s_{04}} + \left(1 - \frac{I_0}{I_{1H}} \right) \frac{s_H}{s_{04}} \right] \cdot \Delta P_{m1H} = 19.495 \\
\Delta P_{m21} &:= 1.1 \mu_c^2 \cdot \Delta P_{m2H} \cdot \left(\frac{s_{04}}{s_H} \right) = 523.834
\end{aligned} \tag{2.45}$$

$$\begin{aligned}
B &:= 0.98 \\
\Delta P_{c11} &:= \mu_c^2 \cdot \left[B \cdot \frac{s_H}{s_{04}} + (1 - B) \cdot \frac{s_{04}}{s_H} \right] \cdot \Delta P_{c1H} = 41.752 \\
\Delta P_1 &:= \Delta P_{m11} + \Delta P_{m21} + \Delta P_{c11} = 585.081
\end{aligned} \tag{2.46}$$

Для напруги 0,2 U_{1H} розрахунок втрат не проводився, оскільки при такій напрузі двигун не розвиває достатнього моменту для стабільної роботи на цій характеристиці.

Як свідчать розрахунки, при зниженні напруги сумарні втрати зменшуються. Це пояснюється тим, що зі зменшенням напруги жорсткість механічної характеристики двигуна падає, і точка перетину з кривою навантаження зміщується в область нижчих швидкостей. Оскільки вентиляторне навантаження прямо залежить від швидкості обертання ($M_n, \propto \omega^2$), момент опору також суттєво зменшується. Якби навантаження було постійним (активним або реактивним), втрати в двигуні зросли б через збільшення ковзання.

2.9 Розрахунок перехідних процесів швидкості та моменту для режиму пуску, скидання, накидання навантаження на валу двигуна для режимів прямого пуску та пуску від задатчиків інтенсивності з різними законами зміни напруги управління та вентиляторної навантаженням на валу

На рис.2.15 показано графік прямого запуску двигуна.

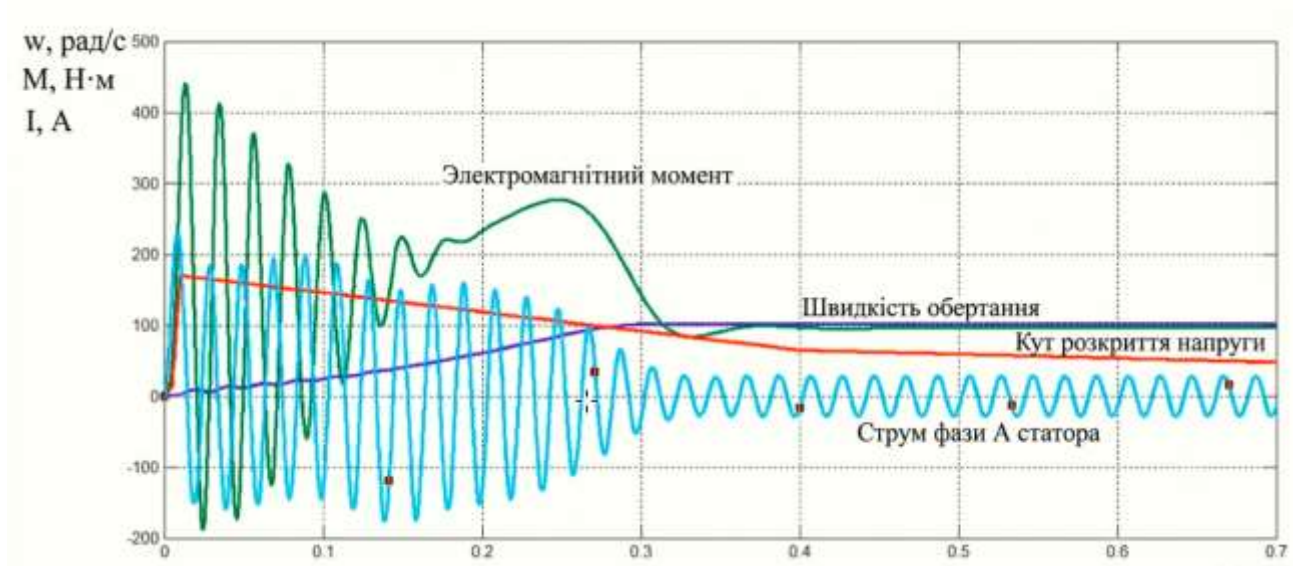


Рис.2.15.Прямий пуск двигуна

На рис. 2.16 показано графік плавного пуску при лінійному задатчику інтенсивності з часом розкриття напруги 3 секунди.

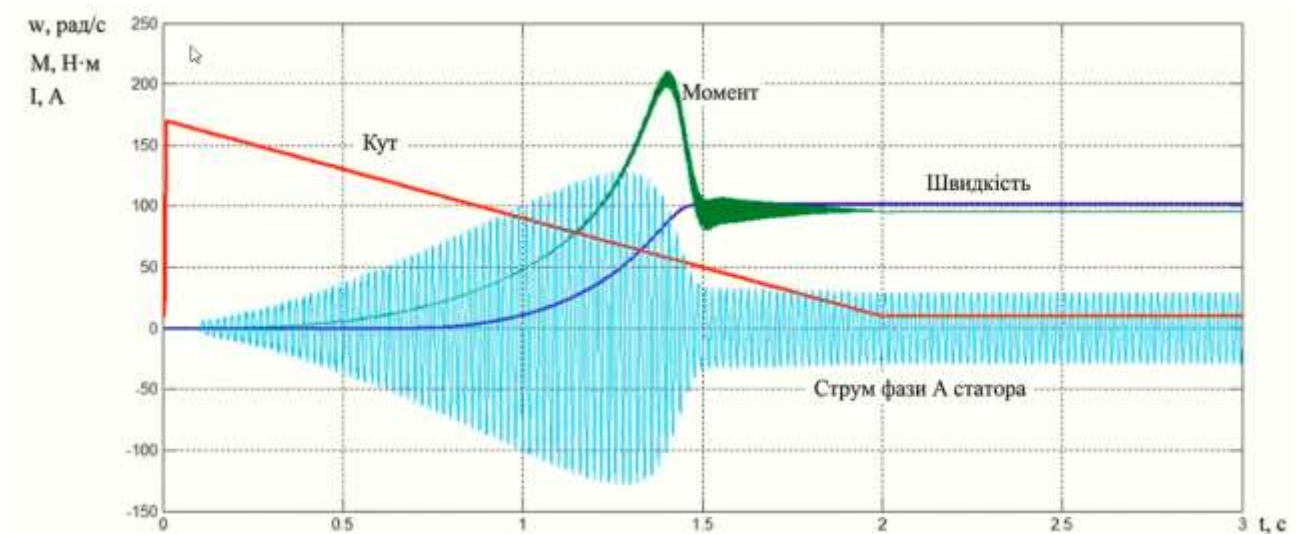


Рис.2.16. Плавний пуск при лінійному задатчику інтенсивності часом розкриття напруги 3 секунди

На рис. 2.17 показаний графік плавного пуску при S-подібному задатчик інтенсивності з часом розкриття напруги 2 секунди.

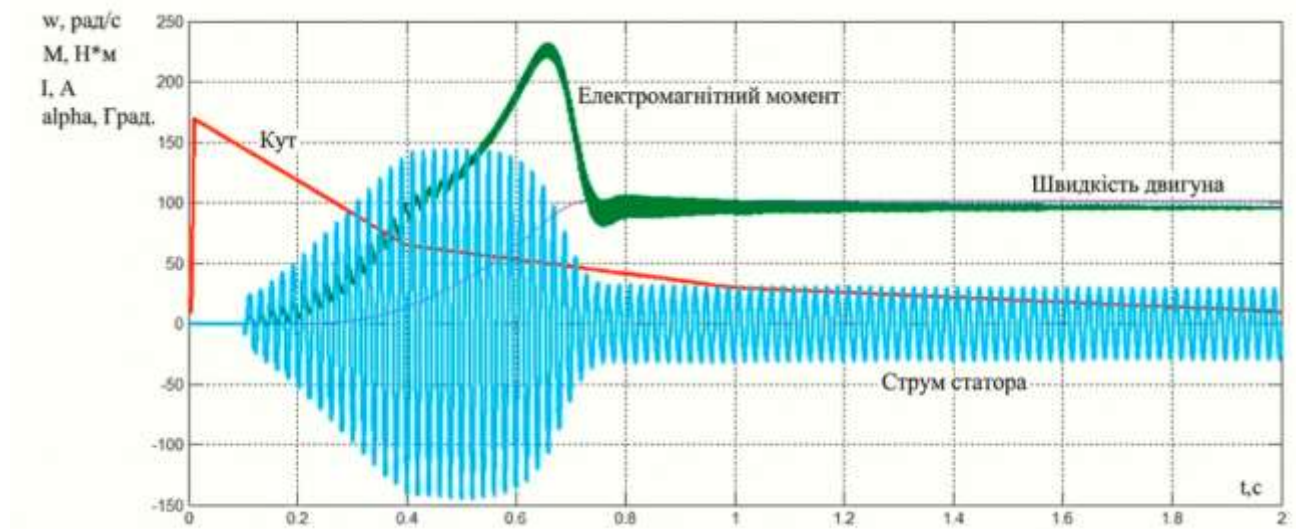


Рис. 2.17. Плавний пуск при S-подібному задатчику інтенсивності з часом розкриття напруги 2 секунди

На рис.2.18 показаний графік плавного пуску при лінійному задатчику інтенсивності з часом розкриття напруги 3 секунди.

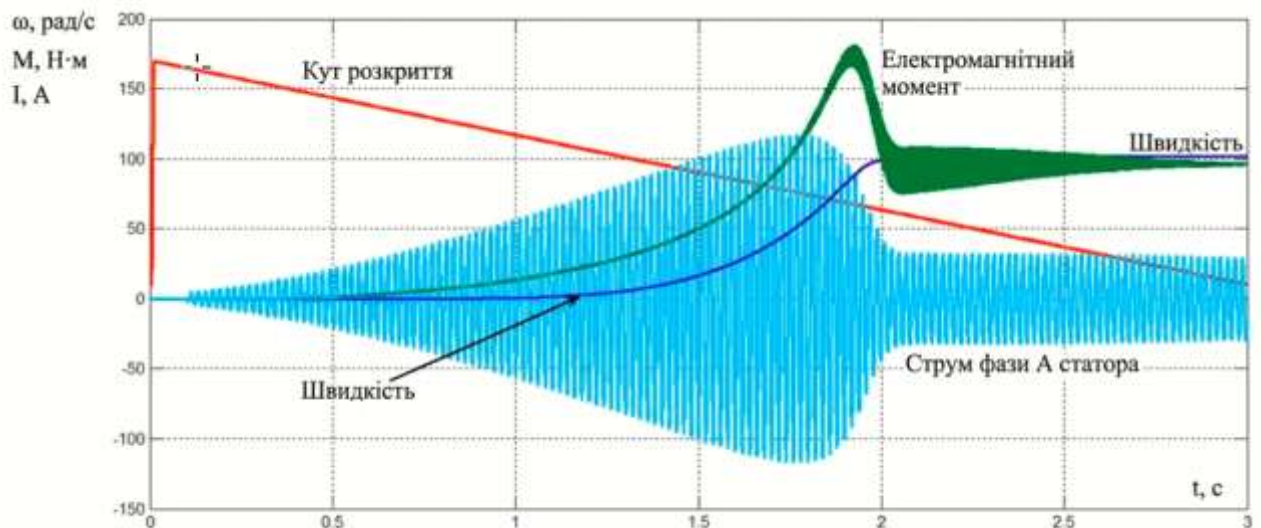


Рис. 2.18. Плавний пуск при лінійному задатчику інтенсивності з часом розкриття напруги 3 секунди

На рис.2.19. показаний графік плавного пуску для експоненційного задатчика інтенсивності з часом розкриття напруги 3 секунди.

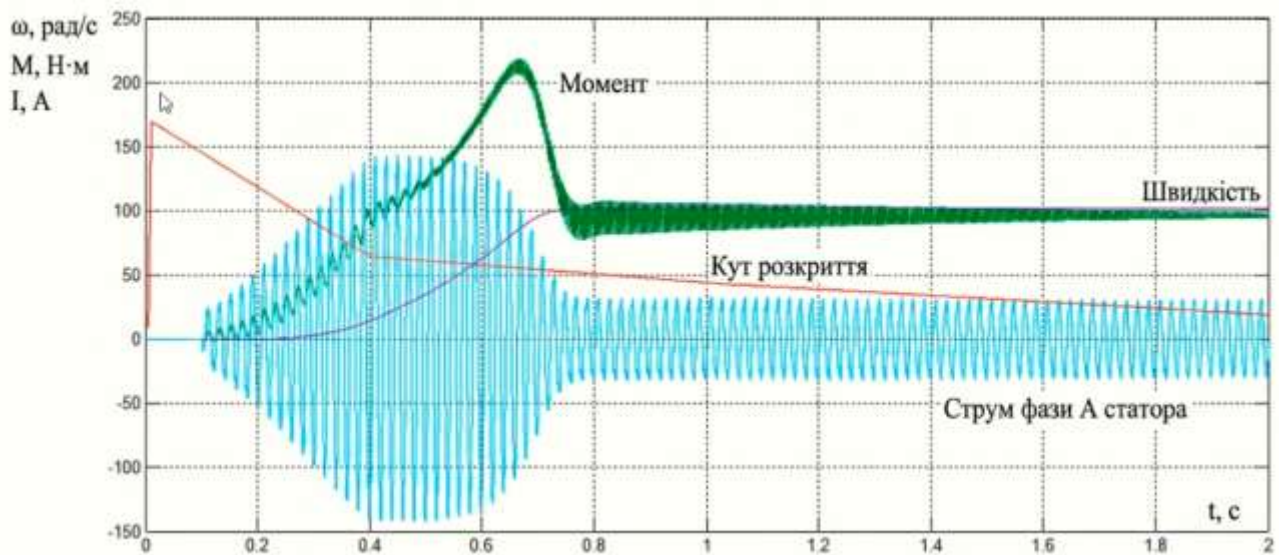


**Рис.2.19. Плавний пуск для експоненційного задатчика інтенсивності
з часом розкриття напруги 3 секунди**

Наведені часові діаграми демонструють ефективність застосування системи плавного пуску: амплітуду коливань електромагнітного моменту вдалося знизити вчетверо відносно номінального значення, а пусковий струм зменшився майже вдвічі.

Процес поступового відмикання тиристорів супроводжується споживанням енергії, тому виникає необхідність оптимізації динаміки зміни кута керування. Повільне зростання струму статора вказує на потенціал для покращення динаміки пуску шляхом корекції швидкості зміни кута на початковій стадії.

Початок обертання ротора відбувається в момент, коли динамічний момент двигуна перевершує момент статичного опору навантаження. До цього моменту двигун перебуває у нерухомому стані. Порівняльний аналіз показав, що пікове значення моменту при використанні лінійного задавача становить 180,8 Н·м, тоді як для S-подібного - 225 Н·м. При цьому лінійний задавач забезпечує час виходу на повну напругу 3 секунди, а S-подібний - 2 секунди. Використання

лінійного задавача інтенсивності дозволяє суттєвіше обмежити струм, проте S-подібний задавач забезпечує вищу швидкість розгону електропривода.

Необхідно зазначити, що навіть при використанні засобів плавного пуску струмові навантаження залишаються досить високими. Це обумовлено вентиляторним характером навантаження на валу, де споживаний струм тісно пов'язаний із частотою обертання. В режимі плавного пуску на холостому ході пусковий струм не перевищує 2 номінальних значень.

2.10 Визначення втрат потужності двигуна під час пуску. Визначення оптимального часу пуску асинхронного двигуна з огляду на мінімізацію втрат. Аналіз отриманих результатів теоретичних розрахунків

Для обліку потужності, що споживається двигуном, використовуємо блок розрахунку [10].

Механічна потужність на валу двигуна:

$$P_{\text{мех}} = M \cdot \omega \quad (2.47)$$

де M та ω - момент і кутова швидкість двигуна.

Повна потужність, що споживається з мережі (2.48)

$$P_s = \frac{3}{2}(U_{sx} \cdot I_{sx} + U_{sy} \cdot I_{sy})$$

де I_{sx} , I_{sy} , U_{sx} , U_{sy} - проєкції векторів струму та напруги статора у системі координат, що обертається.

Баланс потужностей (без урахування втрат у сталі):

$$P_s = P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{сэл}} + \Delta P_{\text{тэл}} \quad (2.49)$$

Загальні втрати з балансу потужностей:

$$\Delta P = P_s - P_{\text{мех}} \quad (2.50)$$

Втрати в колах статора:

$$\Delta P_{s\text{эл}} = R_s \cdot I_{sx}^2 + R_s \cdot I_{sy}^2$$

де R_s - опір кіл статора.

Втрати в колах ротора:

$$\Delta P_{r\text{эл}} = \Delta P - \Delta P_{s\text{эл}} \quad (2.51)$$

Енергія, що споживається з мережі:

$$W_s = \int_0^{T_{\text{ц}}} P_s dt \quad (2.52)$$

де $T_{\text{ц}}$ - час циклу роботи виробничого механізму.

Енергія втрат:

$$\Delta W = \int_0^{T_{\text{ц}}} (P_s - P_{\text{мех}}) dt \quad (2.53)$$

Цикловий ККД ($\eta_{\text{ц}}$) визначається як відношення механічної енергії до енергії, спожитої з мережі за робочий цикл:

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{W_{\text{мех}}}{W_s} = \frac{\int_0^{T_{\text{ц}}} P_{\text{мех}} dt}{\int_0^{T_{\text{ц}}} P_s dt} \quad (2.54)$$

Таблиця 2.5

Порівняння енергетичних показників для різних задавачів інтенсивності (ЗІ)

ЗІ	$P_{\text{мех}}$	P_s	$\Delta P_{\text{сел}}$	$\Delta P_{\text{гел}}$	W_s	ΔW	$\eta_{\text{ц}}, \%$
Лінійний, 2 с	$1,786 \cdot 10^4$	10420	3369	5980	$2,721 \cdot 10^4$	9349	65,5
Нелінійний, 2 с	$2,486 \cdot 10^4$	10420	3173	5567	$3,36 \cdot 10^4$	8741	76

Як свідчать дані таблиці 2.5, застосування нелінійного задавача інтенсивності дозволяє знизити втрати як у сталі статора, так і в колах ротора, що призводить до підвищення загального ККД системи. Проте спостерігається зростання механічних втрат та загальної споживаної потужності. Це пояснюється тим, що при нелінійному законі керування обмеження пускового струму є менш жорстким через вищий темп його наростання.

Водночас варто враховувати, що занадто тривалий пуск є небажаним для надійної експлуатації електропривода. Таким чином, нелінійний задавач інтенсивності з експоненціальним законом зміни кута відмикання тиристорів є ефективнішим за лінійний аналог. Оптимальним режимом роботи є пуск тривалістю 2 секунди з використанням нелінійного задавача.

2.11 Синтез параметрів регулятора швидкості у замкнутій системі «Тиристорний регулятор напруги-асинхронний двигун» для різних напруг

Лінеаризовану схему системи ТРН-АТ показано на рис.2.20.

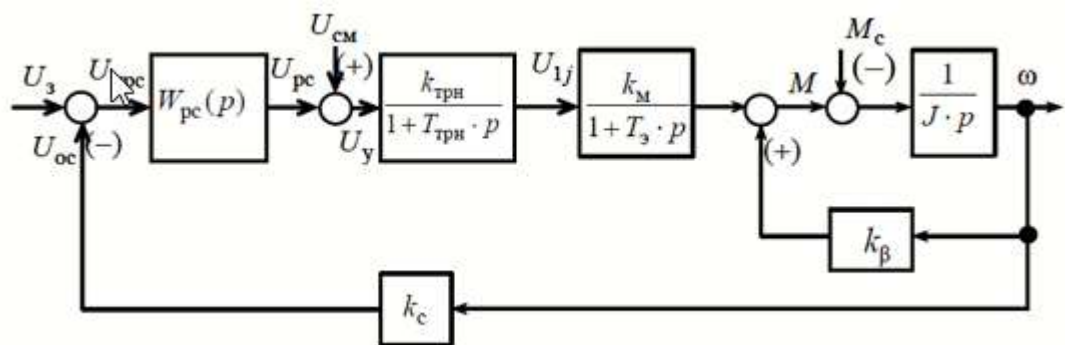


Рис. 2.20. Лінеаризована схема системи ТРН-АТ

$W_{pc}(p)$ — передавальна функція регулятора швидкості;

$k_c = k_{дс} \cdot k_{ос}$ — коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю, В·с/рад;

$k_{дс}$ — коефіцієнт передачі датчика швидкості, В·с/рад;

$k_{ос}$ — коефіцієнт узгодження, в.о.;

$k_{трн} = k_n \cdot k_i$ — коефіцієнт підсилення тиристорного регулятора напруги (ТРН);

$T_{трн}$ — стала часу тиристорного регулятора напруги;

J_Σ — сумарний момент інерції електропривода.

Як розрахунковий показник чутливості за моментом k_m обрано його максимальне значення, рівне $2M_{\text{кн}}$. Саме в цій точці умови стійкості контуру регулювання швидкості є найбільш критичними. Ми приймаємо $k_\beta = 0$, що означає розгляд абсолютно м'якої механічної характеристики асинхронного двигуна в межах зони регулювання. Таке спрощення є цілком прийнятним для синтезу параметрів регулятора, оскільки основний діапазон регулювання збігається з ділянкою нестійкості характеристик. Тим не менш, під час аналізу перехідних процесів необхідно враховувати максимально можливе додатне значення β , оскільки це також зумовлює найменш сприятливі умови для стійкості системи [14]. Передавальна функція розімкненого контуру:

$$W_{\text{кс}}(p) = W_{\text{рс}}(p) \cdot \frac{k_{\text{трн}}}{1 + T_{\text{трн}} \cdot p} \cdot \frac{k_m}{1 + T_3 \cdot p} \cdot \frac{1}{J_\Sigma \cdot p} \cdot k_c \quad (2.55)$$

Для знаходження коефіцієнта жорсткості використовуємо наступну формулу:

$$k_\beta(\omega) := \frac{d}{d\omega} \left[\frac{3 \cdot (U_{1\text{н}})^2 \cdot R'_2}{(\omega_0 - \omega) \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}} \right)^2 + X_{\text{кн}}^2 \right]} \right] \quad (2.56)$$

Графік залежності коефіцієнта жорсткості від швидкості показано на рис.2.21.

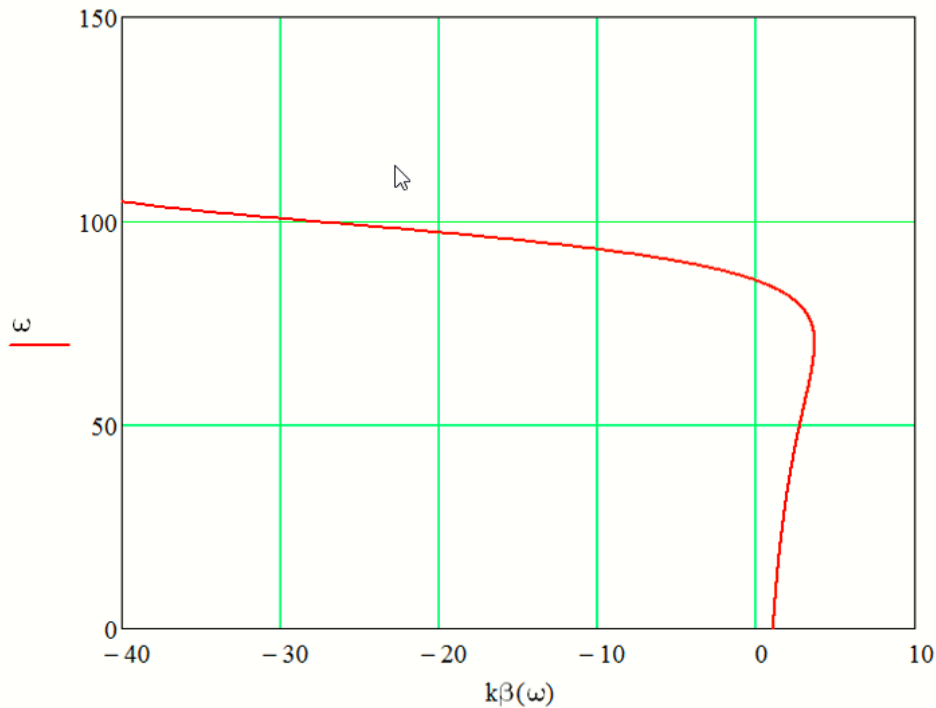


Рис. 2.21. Залежність коефіцієнта жорсткості від швидкості

Дослідження показало, що в діапазоні від нульової швидкості до швидкості ідеального холостого ходу коефіцієнт жорсткості варіюється в межах від 3,69 Н·м·с/рад до 39,947 Н·м·с/рад. Для стабільної ділянки механічної характеристики жорсткість розраховується як:

$$k_{\beta 1} = -\frac{1}{s_H} = -33,333 \quad (2.57)$$

де s_H - номінальне ковзання двигуна.

При аналізі нестійкої ділянки характеристики доцільно застосовувати значення жорсткості у відносних одиницях, які визначаються відношенням різниці максимального та пускового моментів до відповідного інтервалу ковзання:

$$k_{\beta*} = \frac{k_{max} - k_{\Pi}}{1 - s_K} \quad (2.58)$$

$$k_{\beta 1_1} := \frac{2.9 - 2.5}{1 - s_K} = 0.494$$

Окрім того, для оцінки керованості системи при номінальній напрузі статора застосовується аналітичний вираз для визначення коефіцієнта чутливості за моментом (k_M), що враховує параметри схеми заміщення АД.

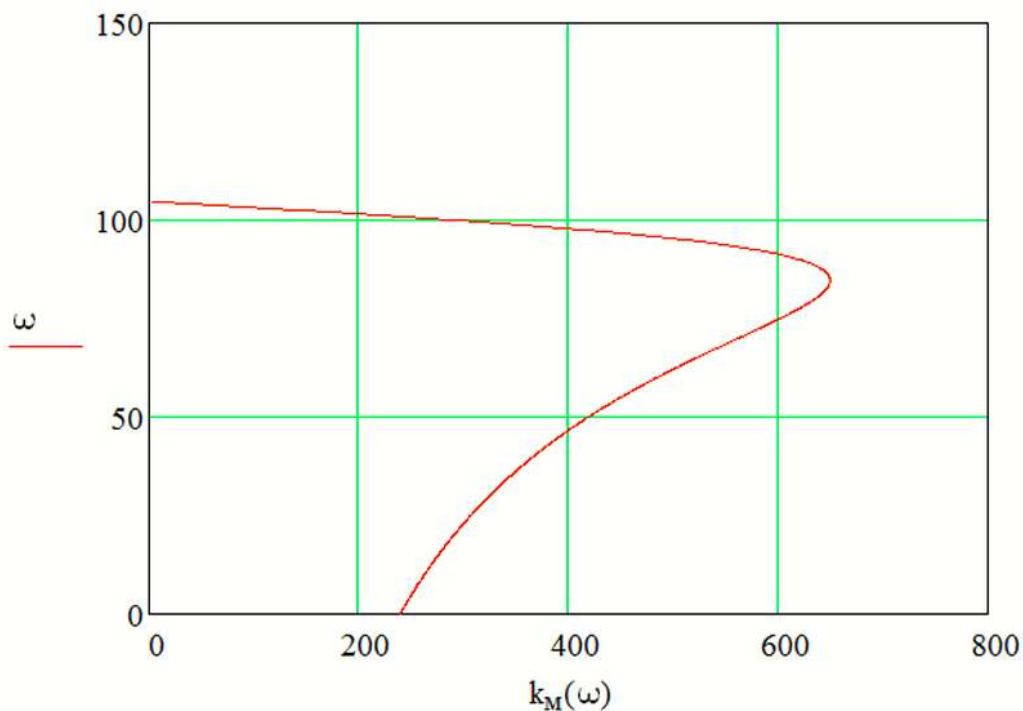


Рис. 2.22. Залежність коефіцієнта чутливості на момент

Коефіцієнт чутливості за моментом:

$$k_{M \max} = 2 \cdot M_{\text{кн}} \cdot 1 = 2 \cdot 324,693 \cdot 1 = 649,386 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{В}^{-1}$$

У відносних одиницях: (2.59)

$$k_{M \max *} = 2 \cdot k_{\max} = 2 \cdot 2,9 = 5,8 \text{ о.о.}$$

Знайдені значення жорсткості $k_{\beta \max *}$ та коефіцієнта чутливості за моментом $k_{M \max *}$ використовуватимуться під час синтезу параметрів регуляторів асинхронного електропривода із зворотним зв'язком за швидкістю. Напруга насичення регулятора:

$$U_{\text{рс} \max *} = 1,0 \text{ о.о.}$$

Напруга насичення суматора:

$$U_{y \max *}=1,0 \text{ в.о.}$$

Тиристорний регулятор напруги приймаємо за аперіодичну ланку з постійною часу:

$$T_{\text{трн}} = \frac{1}{2 \cdot m \cdot f_1} = \frac{1}{2 \cdot 6 \cdot 50} = 0,00167 \text{ с}$$

де m -число керованих напівперіодів напруги за період напруги мережі живлення; (2.60)

f_1 - частота мережі живлення.

Постійна часу тиристорного регулятора напруги у відносних одиницях:

$$T_{\text{трн}*} = T_{\text{трн}} \cdot \omega_{\delta} = 0,00167 \cdot 314,15 = 0,525 \text{ в.о.}$$

Коефіцієнт передачі тиристорного регулятора напруги:

$$k_{\text{трн}} = \frac{U_{1\text{н}}}{U_{y \max}} = \frac{220}{10} = 22 \text{ в.о.}$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю:

$$k_{c*} = 1 \text{ в.о.}$$

Розрахунок базових одиниць:

$$U_{\delta} := \sqrt{2} \cdot U_{1\text{н}} = 311,127 \quad (2.61)$$

$$I_{\delta} := \sqrt{2} \cdot I_{1\text{н}} = 32,479$$

$$P_{\delta} := \frac{3}{2} \cdot U_{\delta} \cdot I_{\delta} = 1,516 \cdot 10^4$$

$$M_6 := \frac{P_6}{\omega_6} = 144,75$$

Електромагнітна постійна часу двигуна у відносних одиницях:

$$T_{\Delta*} = T_{\Delta} \cdot \omega_6 = 0,008154 \cdot 314 = 2,562 \text{ в.о.}$$

Сумарна мала постійна часу:

$$T_m = T_{\text{трн}} + T_{\Delta} = 0,00167 + 0,008154 = 0,009821 \text{ сек}$$

$$T_{m*} = T_m \cdot \omega_6 = 0,009821 \cdot 314,15 = 3,085 \text{ в.о.}$$

Еквівалентний момент інерції у відносних одиницях:

$$H = \frac{J_{\Sigma}}{J_6} = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_6^2}{M_6} = \frac{0,111 \cdot 4 \cdot 314,15^2}{144,75} = 302,717 \text{ в.о.}$$

Коефіцієнт передачі регулятора швидкості при налаштуванні на модульний оптимум визначається за формулою:

$$k_{\text{pc}} = \frac{H}{a_{\mu c} \cdot T_{m*} \cdot k_{c*} \cdot k_{\text{трн}} \cdot k_{m*}} = \frac{302,717}{2 \cdot 3,085 \cdot 1 \cdot 22 \cdot 5,8} = 0,384$$

2.12 Заходи із охорони праці та безпеки при експлуатації насосу

2.12.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів при експлуатації насосу

Під час експлуатації насосного агрегату, що функціонує на базі асинхронного тиристорного електропривода, виникає низка виробничих ризиків, зумовлених специфікою функціонування силової електроніки та механічного обладнання. Основною загрозою є можливість ураження персоналу електричним струмом через пошкодження ізоляції чи наявність напруги на корпусах обладнання, особливо в силових колах тиристорного перетворювача. Функціонування насоса супроводжується підвищеним рівнем шуму та вібрації, які при тривалому впливі негативно впливають на стан здоров'я операторів. Важливим фактором безпеки є нагрівання компонентів привода та самого електродвигуна, що створює ризик виникнення пожежі або термічних опіків. Крім того, наявність рухомих елементів насосної установки потребує суворого дотримання вимог безпеки для запобігання механічним травмам. Специфічні умови перекачування цементу, що є абразивним та пилоутворюючим матеріалом, зумовлюють ризик забруднення робочої зони, що вимагає забезпечення ефективної вентиляції та використання засобів індивідуального захисту. Інтеграція складних систем автоматизації та тиристорного регулювання напруги додатково вимагає високого рівня кваліфікації обслуговуючого персоналу для мінімізації помилок при налаштуванні та експлуатації, які можуть призвести до аварійних ситуацій.

2.8.2 Засоби зниження дії небезпечних і шкідливих виробничих чинників

Для забезпечення безпеки під час роботи з насосною установкою, оснащеною тиристорним електроприводом, необхідно впровадити комплекс

технічних та організаційних заходів. З метою нівелювання ризику ураження електричним струмом ключовим завданням є забезпечення надійного заземлення або занулення всіх металевих корпусів, а також регулярна перевірка стану ізоляції силових та контрольних кабелів. Для захисту персоналу від впливу шумів та вібраційних навантажень обов'язковим є використання звукоізолюючих кожухів та встановлення обладнання на віброгасильні опори, додатково персонал має бути забезпечений засобами індивідуального захисту органів слуху. Безпека при роботі з цементом, що характеризується високою абразивністю та здатністю утворювати пил, досягається через герметизацію вузлів насоса та організацію локальної витяжної вентиляції, що мінімізує концентрацію зважених часток у повітрі. Для запобігання термічним перевантаженням привода передбачається встановлення автоматизованих систем контролю температури з функціями аварійного вимкнення при досягненні критичних значень. Щоб виключити травматизм від рухомих частин механізму, необхідно обладнати всі обертові елементи захисними огорожувальними конструкціями із системою блокування, яка перериває живлення при несанкціонованому відкритті. Підвищення безпеки експлуатації тиристорних перетворювачів забезпечується впровадженням систем плавного пуску та обмеження струмів, а також проведенням регулярного навчання персоналу щодо правил безпечної роботи з напівпровідниковою технікою, що дозволяє суттєво зменшити ймовірність виникнення технічних інцидентів.

2.8.3 Пожежна безпека

Заходи забезпечення пожежної безпеки

Згідно з нормативними вимогами, кожна зона розташування насосної установки має бути оснащена пожежним щитом, який містить повний набір первинних засобів пожежогасіння. До обов'язкового складу такого щита входить ломик, лопата, конусні відра, кошма (вогнетривке полотно) та ящик із сухим піском, який використовується для локалізації проливів паливно-мастильних

матеріалів або гасіння осередків загоряння електрообладнання, де неможливе використання води. Весь інвентар на щиті має бути розміщений у доступному місці, а його стан - перевірятися під час регулярних оглядів.

Важливим компонентом є організація шляхів евакуації: вони повинні залишатися вільними від будь-яких сторонніх предметів чи захаращення будівельними матеріалами, зокрема цементом. Евакуаційні проходи обов'язково позначаються фотолюмінесцентними знаками, які забезпечують видимість напрямку руху навіть при повному відключенні основного освітлення. Двері на шляхах евакуації повинні обладнуватися системою «антипаніка» для безперешкодного виходу персоналу в екстрених ситуаціях.

Організаційним фундаментом безпеки є безперервна система навчання. Кожен працівник, що допускається до роботи з тиристорним електроприводом, проходить первинний, повторний, позаплановий та цільовий інструктажі. Програма підготовки обов'язково містить розділ щодо практичного відпрацювання навичок користування вогнегасниками, алгоритму передачі повідомлення про пожежу на центральний пульт та правил перемикання обладнання в безпечний стан перед евакуацією. Результати проведення інструктажів фіксуються у відповідному журналі із зазначенням підписів відповідальних осіб, що підтверджує готовність персоналу до оперативних дій при виникненні загрози.

ВИСНОВКИ

У межах проведеного дослідження було проаналізовано технологічні аспекти перекачування цементних сумішей пневмогвинтовими насосними установками, визначено конструктивні вимоги до цього обладнання та специфіку його експлуатації у виробничих умовах. За результатами аналізу для реалізації привода було обрано асинхронний двигун із короткозамкненим ротором типу RA160L6. Виконано ідентифікацію параметрів його Т-подібної схеми заміщення на основі номінальних паспортних даних, що дозволило розрахувати природні механічні та електромеханічні характеристики агрегату. Обґрунтовано доцільність застосування тиристорного регулятора напруги (ТРН) для забезпечення функцій плавного пуску та енергоефективного керування швидкістю. Шляхом математичного моделювання побудовано робочі характеристики електропривода при живленні двигуна через тиристорний перетворювач. Проведено порівняльний аналіз прямого пуску та плавного пуску з використанням задавачів інтенсивності (ЗІ) різних типів - лінійного та S-подібного (нелінійного) - при різних часових інтервалах розгону.

Аналіз отриманих перехідних процесів (зміна струму статора, швидкість обертання, електромагнітний момент) підтвердив ефективність застосування системи плавного пуску. Встановлено, що використання нелінійного (S-подібного) задавача інтенсивності з тривалістю розгону 2 секунди дозволяє досягти оптимальних показників: істотного зниження пускових струмів та зменшення амплітуди коливань електромагнітного моменту. На основі розрахунку інтегральних показників втрат потужності під час перехідних процесів доведено перевагу обраного режиму, який забезпечує найвищий рівень енергетичної ефективності системи в заданих експлуатаційних умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дуда В. Цемент / Пер. з нім. Є. Ш. Фельдмана. 1981. 464 с.
2. Євтюков С.А., Шапунов М.М. Довідник з пневмокомплексів та пневмотранспортного обладнання. ДНК, 2005. 456 с.
3. Патон Б.Є. Технологія електричного зварювання металів і сплавів плавленням. 1974. 768 с.
4. Чернишов О. Ю. Електропривод змінного струму: навчальний посібник. 2010. 218 с.
5. Удут Л. С. Проектування та дослідження автоматизованих електроприводів: навчальний посібник. Ч. 8. Асинхронний частотно-регульований електропривод / Л. С. Удут, О. П. Мальцева, Н. В. Кояїн; Томський політехнічний університет. 2-ге вид., перероб. і доп. Т. 2014. 648 с.
6. Клепиков В. Б., Руднєв Ю. В. Автоматизований електропривод промислових установок: підручник для ЗВО. Харків: Еспада, 2018. 384 с.
7. Маляр В. С. Розрахунок та характеристики асинхронних двигунів у системах електропривода : навч. посіб. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. 196 с.
8. Ткачук О.І., Вовк В.М., Кузнецов Д.О. Системи керування асинхронними частотно-регульованими електроприводами: навч. посіб. Київ: Каравела, 2021. 288 с.
9. Морозов В.В. Управління проєктами: від планування до реалізації: навч. посіб. Київ: КНЕУ, 2016. 320 с.
10. Бушуєв С.Д. Підручник для бакалаврів. Київ: Саміт-Книга, 2020. 440 с.
11. Варналій З.С. Основи підприємницької діяльності: довідник підприємця. Київ: Знання, 2019. 380 с.
12. Олійник О.В., Шорникова Н. М. Аудит та облік розрахунків з оплати праці на підприємстві: навч. посіб. Житомир: ПП «Рута», 2018. 112 с.

- 13.ДСТУ EN 614-1:2019 (EN 614-1:2006 + A1:2009, IDT). Безпечність машин. Ергономічні принципи проектування. Частина 1. Термінологія та загальні принципи.
- 14.ДСТУ 9221:2023 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Гранично допустимі рівні напруг дотику та струмів. Київ: УкрНДНЦ, 2023.
- 15.ДСТУ 9113:2021 Електробезпека. Захисне заземлення та занулення електроустановок. Технічні вимоги та правила улаштування. Київ: УкрНДНЦ, 2021.
- 16.ДСТУ 8749:2017 Охорона атмосферного повітря. Правила встановлення допустимих викидів забруднюючих речовин промисловими підприємствами. Київ: УкрНДНЦ, 2017.



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

141-123-2026арб

Автор

141-123-2026арб

Науковий керівник / Експерт

Модло Є.О.

ІД документу

334292852

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

підрозділ

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

ЗВІТ

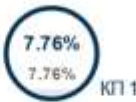
Дата звіту

6/12/2026

Дата редагування

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



5165

Кількість слів



42520

Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати намісний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		13
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		30

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Колір тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз	Колір тексту
#	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНОХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА (URL (НАЗВА БАЗИ))	

ЗГОДА здобувача освіти Державного університету економіки і технологій про
перевірку кваліфікаційної роботи на прояви академічного плагіату
та розміщення в Репозитарії ДУЕТ

Я, Шахнюк Ілля Сергійович, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу. Стверджую, що кваліфікаційна бакалаврська робота «Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Асинхронний тиристорний електропривод пневмогвинтового насосу для цементу» виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають покликання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про запобігання та виявлення академічного плагіату в роботах здобувачів вищої освіти Державного університету економіки і технологій ознайомлений. Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі порушення норм академічної доброчесності робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Також я поінформований, що відповідно до пункту 5.8 «Положення про Репозитарій (електронну базу даних) Державного університету економіки і технологій» згадана робота буде розміщена в Електронному архіві Університету (Репозитарії ДУЕТ) та ознайомлений з умовами такого розміщення.

Дата 01.06.2026

Підпис