

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування закладу вищої освіти)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему **«Оптимізація системи автоматичного керування процесом
гомогенізації в прокатному виробництві»**

Виконав: студент 2 курсу, групи 601МЕ

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Теребецький А. Б.

(прізвище та ініціали)

Керівник Бороздін М. К.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Шефер О. В.

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2024 рік

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
 Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і
 робототехніки

Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри автоматки,
 електроніки та телекомунікацій
 _____ О.В. Шефер
 “ ____ ” _____ 2024 р.

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Теребецькому Андрію Богдановичу

1. Тема проекту (роботи) «Оптимізація системи автоматичного керування процесом гомогенізації в прокатному виробництві»
керівник проекту (роботи) Бороздін Микола Кирилович, к.т.н., доцент,
затверджена наказом вищого навчального закладу від 09.08.2024 року № 818-ф,а
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 19.12.2024 р.
3. Вихідні дані до проекту (роботи). Вихідними даними є матеріали зібрані під час проходження переддипломної практики.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. Аналіз електромагнітного впливу на БПЛА. Огляд існуючих БПЛА, що піддаються впливу НКЕВ. Аналіз способів керування БПЛА. Аналіз телекомунікаційної системи керування БПЛА. Розроблення методу для оцінки стійкості в умовах впливу електромагнітних імпульсів. Критерії оцінки стійкості функціонування телекомунікаційної системи управління БПЛА. Оцінка критеріїв відмови стійкого функціонування БПЛА. Дослідження особливостей впливу НКЕВ на телекомунікаційні системи управління БПЛА. Визначення мінімально допустимих рівнів НКЕВ, що впливають на стійкість телекомунікаційних пристроїв системи управління. Визначення уразливих електронних частин БПЛА від дії зовнішнього опромінювання. Автоматизація процесу тестування стійкості безпілотного літального апарату до впливу НКЕВ. Шляхи знаходження поля випромінювання щодо БПЛА. Розроблення алгоритму тестування та візуалізації параметрів телекомунікаційної системи керування БПЛА. Висновки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):
Актуальність теми, об'єкт, предмет та мета роботи. Зони повітряного простору (НКУ – наземний комплекс управління). Оптимальний спосіб курування БПЛА. Процес розповсюдження електромагнітних перешкод у внутрішньому просторі БПЛА. Розподіл телекомунікаційної системи в межах простору БПЛА. Структура розташування бортового радіо-електронного обладнання БПЛА. Структурна схема телекомунікаційної системи керування БПЛА. Амплітудно-часова характеристика карти пам'яті після опромінення НКЕВ. залежність числа втрачених блоків від

частоти повторення імпульсів завади. Структурна схема методу тестування стійкої роботи БПЛА. Алгоритм тестування параметрів телекомунікаційної системи. Схема вимірювання основних параметрів. Схема перевірки коректності визначення параметрів.

б. Дата видачі завдання 02.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор №	Назва етапів магістерської роботи	Термін та обсяг виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
		Термін	Категорія	Обсяг	
1		07.10.24		15%	Пл. 1
2		16.10.24	I	25%	Пл. 2, 3
3		05.11.24		40%	Пл.4, 5
4		12.11.24		50%	Пл.6
5		19.11.24	II	60%	Пл.7
6		26.11.24		70 %	Пл. 8,9
7		11.12.24		90 %	Пл. 10
8		19.12.24	III	100%	Пл. 11, 12

Магістрант _____ Теребецький А. Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Бороздін М. К.
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1. Технологічна частина	8
1.1. Опис технологічного процесу прокатного стану 700.....	8
1.2. Конструкція й принцип дії механізму.....	12
1.3. Технічні й технологічні дані	14
1.4. Вимоги до електропривода машини вивантаження	16
1.5. Постановка завдань кваліфікаційної роботи	18
2. Розрахунково конструкторська частина.....	19
2.1. Розрахунок механічної частини електропривода	19
2.1.1. Кінематична й розрахункова схеми механічної частини електропривода.....	19
2.1.2. Розрахунок обертових і поступальних моментів інерції, мас що рухаються	20
2.1.3. Розрахунок коефіцієнтів жорсткості зв'язків.....	26
2.1.4. Приведення жорсткості і моментів інерції до тримасової системи.....	26
2.1.5. Моделювання двомасової пружної системи	31
2.2. Розрахунок і побудова навантажувальної діаграми й тахограми механізму.....	33
2.2.1. Розрахунок параметрів механізму	33
2.2.2. Визначення моментів статичного навантаження	35
2.2.3. Розрахунок навантажувальної діаграми й тахограми механізму.....	36
2.3. Вибір привідного електродвигуна.....	39
2.3.1. Розрахунок необхідної потужності.....	38
2.3.2. Перевірка двигуна на нагрів	40
2.4. Побудова механічних характеристик двигуна.....	42
2.4.1. Розрахунок основних параметрів двигуна	42
2.4.2. Статичні механічні характеристики двигуна	44
2.4.3. Динамічні характеристики двигуна	47
2.5. Вибір частотного перетворювача	49
2.5.1. Загальна характеристика напівпровідникових перетворювачів частоти для електропривода.....	49

2.5.2. Вибір перетворювача частоти.....	55
2.6. Висновки за розділом.....	59
3. Дослідницька частина.....	60
3.1. Математичне моделювання двигуна	60
3.2. Математичний опис узагальненої асинхронної машини	60
3.3. Характеристики якості перехідних процесів	66
3.4. Моделювання асинхронної машини з короткозамкнутим ротором у нерухомій системі координат	67
3.5. Математичне моделювання електропривода	72
3.5.1. Структурна схема АД з контурами регулювання змінних вектора потокозчеплення ротора $\dot{\Psi}_r$, i_{sx} і контуром керування u_{sx}	72
3.5.2 Моделювання контуру регулювання складового струму статора i_{sx}	75
3.5.3. Моделювання контуру керування модулем потокозчеплення ротора Ψ_R	79
3.3.4. Моделювання контуру регулювання складового струму статора i_{sy}	84
3.5.5. Моделювання контуру регулювання швидкості.....	83
3.5.6. Дослідження математичної моделі асинхронного електропривода	92
3.6. Скалярне керування електроприводом	98
3.7. Висновки за розділом.....	105
Висновки	107
Список використаних джерел	108
Додатки.....	111

ВСТУП

Електропривод прокатного стану є важливою складовою частиною металургійного виробництва, оскільки він забезпечує необхідну потужність і точність руху для прокатних машин, що обробляють метал. Прокатні стани використовуються для виробництва різноманітних металевих виробів, таких як листи, смуги, профілі, трубопрокат та інші. Прокатний стан 700, як частина цієї технологічної лінії, має високу потужність і складну конструкцію, що вимагає застосування спеціалізованого електроприводу для забезпечення безперебійної роботи обладнання.

Електропривод прокатного стану 700 виконує функцію керування рухом валків, що стискають метал до потрібної товщини та форми. Для цього використовуються різноманітні типи електричних машин: асинхронні, синхронні, а також спеціалізовані системи автоматичного керування для регулювання швидкості та моменту сили. Забезпечення точності, стабільності та ефективності роботи електроприводу є критичним для досягнення високої якості прокатних виробів та мінімізації енергетичних витрат.

Одним з важливих аспектів електроприводу прокатного стану є управління навантаженнями та динамічними режимами роботи, які можуть змінюватися в залежності від властивостей оброблюваного матеріалу, швидкості прокату та інших виробничих умов. Враховуючи такі фактори, електропривод повинен бути спроектований таким чином, щоб забезпечити стабільність роботи на всіх етапах виробничого процесу.

Таким чином, електропривод прокатного стану 700 є складною і високоточною системою, що включає не тільки електричні машини, а й сучасні технології автоматизації, контролю та моніторингу, які забезпечують ефективну та надійну роботу металургійного обладнання.

Дослідження електроприводу прокатного стану 700 є надзвичайно актуальним у сучасному металургійному виробництві, оскільки забезпечення

стабільної, ефективної та економічної роботи таких складних технологічних систем є важливим завданням для підвищення продуктивності та зниження витрат у галузі. Прокатні стани використовуються для виробництва різних металевих виробів, і від їхнього функціонування залежить якість кінцевої продукції, а також енергоефективність і довговічність виробничого процесу.

Підвищення ефективності виробництва: В умовах сучасної металургії значна увага приділяється зменшенню енергетичних витрат і максимальному використанню потенціалу обладнання. Прокатний стан 700 має високі вимоги до точності регулювання параметрів електроприводу, що впливає на стабільність роботи стану, якість продукції та загальну ефективність виробництва. Дослідження нових методів управління електроприводом може допомогти знизити енергоспоживання та поліпшити продуктивність.

Використання новітніх технологій: Сучасні досягнення в галузі автоматизації, цифрових технологій та інтелектуальних систем керування відкривають нові можливості для вдосконалення роботи електроприводів. Впровадження новітніх інверторних технологій, адаптивних систем контролю, а також аналізу і прогнозування параметрів роботи дозволяє значно підвищити точність і ефективність прокатного процесу. Дослідження в цій сфері допомагає інтегрувати ці технології в існуючі системи електроприводів прокатних станів.

Забезпечення безпеки та надійності обладнання: Електропривод прокатного стану є ключовим елементом, що забезпечує нормальне функціонування всього комплексу обладнання. Врахування різних навантажень, швидкостей і динамічних умов роботи прокатного стану 700 дозволяє розробляти надійні системи моніторингу та контролю, що забезпечують безпеку роботи та запобігають аварійним ситуаціям.

Удосконалення технологічних процесів: Прокатний стан 700 застосовується в різних галузях металургії, де важливо забезпечити точність і якість продукції. Дослідження параметрів роботи електроприводу дозволяє

оптимізувати технологічні процеси, покращити якість обробки металу, знизити рівень дефектів і підвищити конкурентоспроможність продукції.

Таким чином, актуальність дослідження електроприводу прокатного стану 700 обумовлена необхідністю підвищення ефективності виробничих процесів, зниження енергетичних витрат, покращення якості продукції та забезпечення надійності і безпеки роботи обладнання. Враховуючи швидкий розвиток технологій і зростаючі вимоги до виробничих процесів, таке дослідження є важливим кроком до оптимізації роботи металургійних підприємств у сучасних умовах.

Метою даного дослідження є аналіз та вдосконалення системи електроприводу прокатного стану 700, спрямоване на підвищення ефективності, енергоефективності та надійності його роботи. Дослідження має на меті розробку рекомендацій щодо оптимізації роботи електроприводу в умовах змінних навантажень та технологічних вимог, що дозволить підвищити точність і стабільність прокатного процесу, знизити енергетичні витрати, а також забезпечити безпечну експлуатацію обладнання.

Предметом дослідження є комплекс електромеханічних систем та компонентів, що забезпечують безперебійне, ефективне і безпечне функціонування прокатного стану 700 в умовах металургійного виробництва.

Об'єктом дослідження є технологія автоматичного регулювання швидкості та моменту для досягнення стабільної роботи прокатного стану.

1. Технологічна частина

1.1. Опис технологічного процесу прокатного стану 700

Прокатний стан 700 відноситься до потужних металургійних установок, призначених для обробки металевих заготовок. Процес прокатки металу в таких установках дозволяє виробляти продукцію з заданими механічними властивостями та розмірами.

Прокатний стан 700 призначений для виробництва широкого спектру металопродукції, зокрема:

Листи і стрічки з різними товщинами

Арматурний прокат

Бари і профілі різної форми

Плити та інші вироби для різних галузей промисловості (машинобудування, будівництво, енергетика тощо)

Завдяки високій продуктивності та технологічним можливостям, прокатний стан 700 дозволяє виробляти металопродукцію з високими характеристиками точності і механічної міцності, що відповідають вимогам сучасної промисловості.

Ділянка 1. «Склад для литих заготовель». Завдання складу полягає в прийманні, отриманих у сталеплавильному цеху, литих заготовель із різним хімічним складом, у нагромадженні й видачі їх на прокатний стан відповідно до виробничої програми.

Литі заготівлі транспортуються від сталеплавильного цеху по плавках, з масою в 150 т, покладені на широку сторону, по одному із двох паралельних рольгангів. Всі заготівлі, що надходять від сталеплавильного цеху, зупиняються й автоматично зважуються наприкінці рольганга. Маса заготовель автоматично реєструється й вводиться в систему реєстрації даних. У цю систему вводяться також і дані про клеймо заготівлі.

Відповідно до технологічної схеми руху матеріалу після зважування всі заготівлі однієї плавки надходять до шести завантажувально-розвантажувальних пристроїв або безпосередньо до печей нагрівання.

На ділянці печей нагрівання заготівлі поштучно зіштовхуються з рольганга на завантажувальні столи перед печами, а із цих столів надходять у печі. Заготівлі однієї плавки розподіляються порівно на три печі, що забезпечує готовність їх до прокатки в тій же послідовності, як і при завантаженні в печі. Заготівлі довжиною 7-12 м подаються в піч по одній, заготівлі довжиною 5- 6 м можуть завантажуватися по дві. Видача нагрітих заготівель з печей на відповідний рольганг, здійснюється поштучно за допомогою машин вивантаження. Печі гомогенізації можуть завантажуватися як холодними заготівлями зі складу, так і гарячими з печей нагрівання.

Ділянка 2. «Печі нагрівання й печі гомогенізації». Литі заготівлі транспортуються рольгангом до завантажувальних вікон трьох печей нагрівання. Напроти завантажувальних вікон лежачі на рольгангу заготівлі автоматично позиціуються (зниження швидкості роликів до 0,1 м/с). Передача зпозиційованих заготівель із рольганга на завантажувальні столи відбувається за допомогою штовхачів машин завантаження.

Печі нагрівання зі своїм обладнанням і системами керування забезпечують нагрівання заготівель до температури прокатки 1250 °С (на поверхні) з нерівномірністю нагрівання не більше 20 °С по довжині заготівлі.

Середня продуктивність кожної печі нагрівання становить 150 т/годину.

Заготівлі, нагріті до температури прокатки, видаються машинами вивантаження, керованими за темпом роботи реверсивного стану.

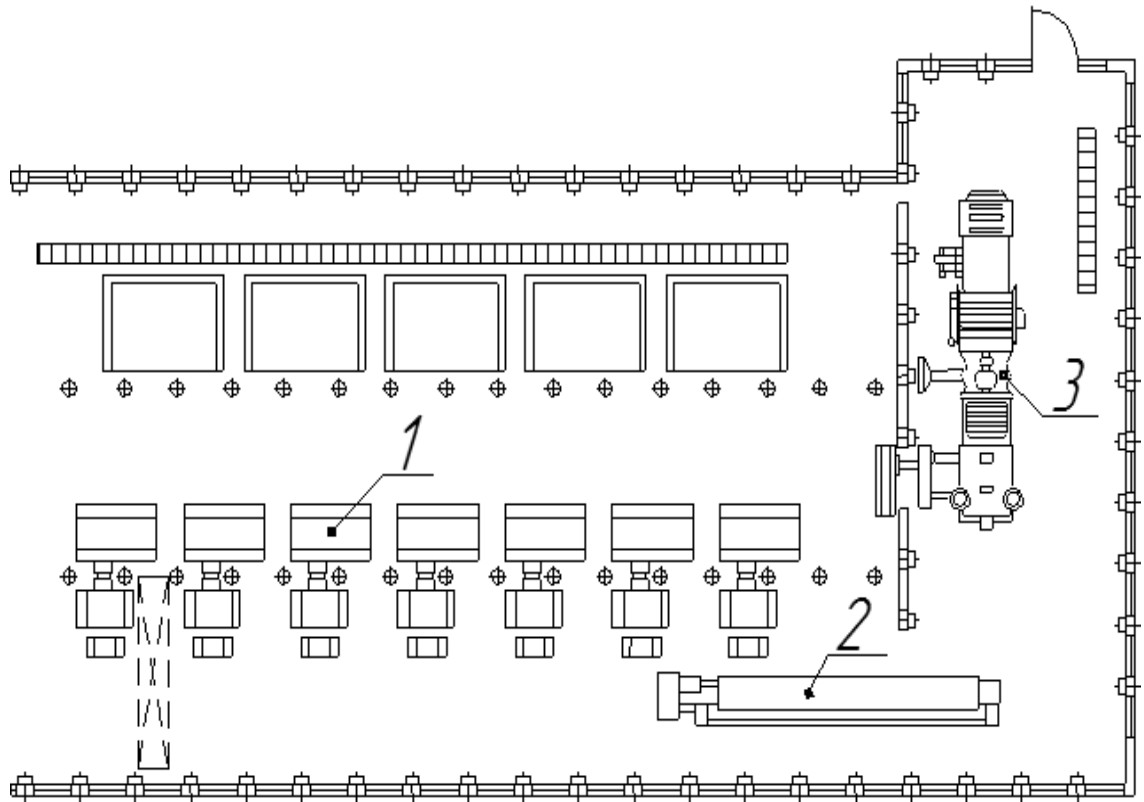


Рисунок 1.1 - Розміщення гомогенізаційної тунельної печі в потоці ливарного й прокатного цехів

На рис.1.1. представлений план розміщення основного технологічного обладнання де в свою чергу: 1- печі лиття, 2- піч для гомогенізації, 3- проліт прокатного стану.

Ділянка 3. «Дуо-реверсивна кліть». Нагріті й видані з печі блюми всіх марок сталей, крім підшипникових, відвідним рольгангом подаються до установки гідрозбиву для видалення з їхньої поверхні окалини струменем води високого тиску. При проходженні через гідрозбив із заготівлі віддається окалина з усіх боків одночасно. Очищений від окалини блом подається на робочий рольганг реверсивної кліті й відповідно до програми прокатки встановлюється лінійками маніпуляторів перед відповідним калібром валків, кантується на 90° і робочими рольгангами подається у валки.

Прокатка блюмів в прокати перетином 230×230 мм виконується за 5 , а перетином 190×190 мм - за 7 проходів.

Всі прокати піддаються обрізці кінців і при необхідності, в аварійних випадках - різанню на частини на стаціонарних ножицях (800-тонні гільйотинні ножиці) гарячого різання.

Після ножиць гарячого різання прокат транспортується до першої групи неперервно-заготівельного стану.

Ділянка 4. «Неперервний прокатний стан з лініями пил гарячого різання».

На ділянці НПС гарячі заготівлі надходять до першої групи прокатних клітей, що складається з двох вертикальних і двох горизонтальних клітей.

Після проходження через першу групу клітей прокат піддається подальшій обробці або на одній лінії пил, або на двох лініях пил. При вищеприписаному процесі, кожна друга заготівля, пройшовши через першу групу клітей, позиціюється на рольгангу й потім транспортується передавальним шлепером за другою групою клітей від першої лінії пил до другої.

Після проходження через другу групу клітей прокат за допомогою чотирьохкривошипних летючих ножиць за другою групою клітей розрізаються на два відрізки, один із яких залишається на другій лінії, а інший позиціюється на рольгангу й потім транспортується передавальним шлепером за другою групою клітей від другої лінії до першої.

Під час транспортування матеріалу по рольгангу від ділянки пил гарячого різання проводиться таврування торців заготівель за допомогою спеціальних клеймувальних машин.

Ділянка 5. «Печі відпалу й холодильники».

Ділянка холодильників складається зі спеціальних, що представляють собою чотири групи крокуючих балок, на яких заготівлі що пройшли через печі відпалу, охолоджуються до необхідної температури. Далі по рольгангу заготівлі передаються на ваги - рольганг за допомогою передавального шлепера.

Ділянка 6. «Проміжний склад». Заготівлі надходять на цю ділянку через візок поперечного переміщення.

Відповідно до завдання заготівлі передаються за допомогою візка на виході складу, на ділянку зачищення або обдирання. Укладка заготівель на складі здійснюється штабелерами, які переміщують заготівлі як по горизонталі так і по вертикалі, укладаючи їх на задані полиці.

Ділянка 7 і 8. «Зачищення й обдирання».

На цих ділянках виконуються кінцеві операції з обробки заготівель, і проводиться контроль на наявність як поверхневих, так і внутрішніх дефектів.

Після цього заготівлі формуються в пакети й передаються на склад готової продукції.

Ділянка 9. «Склад готової продукції». Надійшовші на СГП пакети укладають в штабелі кранами зі спеціальними захватами. Заготівлі в пакеті маркують комбінацією фарб, і на кожен пакет вішається індивідуальна бирка. Далі пакети вантажать у залізничні вагони або інші види транспорту й відправляють замовникові.

1.2. Конструкція й принцип дії механізму

Машина вивантаження складається із двох однакових секцій. Кожна секція приводиться в рух за допомогою двох однакових асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором. Причому кожний двигун працює від окремого перетворювача частоти.

Робота двох секцій синхронізується електромuftою.

Кожна секція має два розвантажувальні важелі, із привідними зубчастими рейками.

Секція приводиться в дію трансмісією, що складається із двигуна трифазного струму, колодкового гальма й редуктора.

Зварна підіймальна рама секції забезпечує підйом розвантажувальних важелів, переміщуючись за допомогою гідроциліндрів (гідропривід).

Зупинка механізму здійснюється гальмуванням за допомогою спеціального колодкового гальма (гальмо СІМЕНС тип SN720B250–EP23). Рекомендована точність відстані зупинки від машини вивантаження: 2 см.

При проходженні заготівлі по печі, гамма-елементом починається відлік імпульсів (1 імпульс = 1мм).

Програмувальний логічний контролер запам'ятовує число імпульсів, вироблених імпульсним датчиком при проходженні заготівлі від гамма-елемента до зупинки. Це число визначає положення заготівлі в печі. Після цього контролер дає команду на хід машини вивантаження з урахуванням дійсного положення заготівлі.

Основними елементами конструкції машини вивантаження є:

- Привідні редуктори.

Механізм вивантаження обладнаний циліндрично-конічним зубчастим редуктором на лабетах(лапах)- KEN 200.

- Вали типу ZZS 198.

Характеристики:

Максимальний передавальний момент – $M_{max} = 9500 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Швидкість обертання $n = 64 \text{ хв}^{-1}$.

- Зубчаста електромuftа.

Характеристики:

Максимальний передавальний момент – $M_{max} = 412 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Швидкість обертання $n = 720 \text{ хв}^{-1}$.

Робота електромuftи:

При подачі напруги електромагніт створює магнітне поле, що притягує рухливу кулачкову муфту. Зубчасті вінці зачіпаються й можуть передавати крутний момент. Для розчіплювання досить відключити живлення, після чого кулачкова муфта перейде в неробоче положення під дією пружин.

1.3. Технічні й технологічні дані

Основні технічні дані механізму наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Основні технічні дані механізму

№	Найменування характеристики	Одиниця виміру	Величина
1	Передаточне число редуктора i_p	-	11,5
2	Швидкість на виході редуктора $\omega_{\text{вих}}$	об/хв	62,5
3	ККД редуктора η	%	96
4	Маса заготівлі m_3	кг	10400
5	Довжина заготівлі L	м	10
6	Маса важеля розвантажувальної машини m_p	кг	4800
7	Діаметр шестірні $D_{\text{ш}}$	мм	180
8	Довжина шестірні $L_{\text{ш}}$	м	0,35
9	Довжина переміщення важелів s	м	10,5
10	Припустиме лінійне прискорення в перехідних процесах $a_{\text{доп}}$	м/с ²	0,6
11	Повний маховий момент приведений до вала двигуна без навантаження $GD^2_{\Sigma 1}$	кг·м ²	3,7
12	Повний маховий момент, приведений до вала двигуна під навантаженням $GD^2_{\Sigma 2}$	кг·м ²	5,2
13	Пауза при завантаженні t_{01}	с	25
14	Модуль зрушення (сталь) σ	МН× м ²	8×10^4
15	Щільність сталі ρ	кг/м ³	7870
16	Час переміщення на зниженій швидкості в сталому режимі $t_{\text{устпс}}$	с	5

Параметри валів кінематичної схеми, визначені по кресленнях заводів-виробників, наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2.

Параметри валів кінематичної схеми

Вид вала	Найменування параметра	Позначення	Одиниця виміру	Величина
Вал двигуна	довжина	$L_{дв}$	м	0,58
	діаметр	$d_{дв}$	м	0,035
	маса	$m_{дв}$	кг	4,392
Швидкохідний вал	довжина	L_1	м	0,42
	діаметр	d_1	м	0,055
	маса	m_1	кг	21
Проміжний вал редуктора	довжина	L_2	м	0,32
	діаметр	d_2	м	0,024
	маса	m_2	кг	7,5
Тихохідний вал	довжина	L_3	м	0,45
	діаметр	d_3	м	0,078
	маса	m_3	кг	145
Вал на шестірню	довжина	L_4	м	1,6
	діаметр	d_4	м	0,12
	маса	m_4	кг	300

- Командоапарати установлені на виході редукторів, вони передають обертний рух імпульсним датчиком.

Підіймальна рама являє собою зварений візок, обладнаний чотирма роликами.

- Розвантажувальні важелі, виготовлені зі звареного квадратного профілю, мають у нижній частині зубчасту рейку й ролик на шарикопідшипниках.

Цикл роботи машини вивантаження складається з наступних етапів: переміщення в піч без заготівлі; підйом; переміщення із заготівлею у зворотному напрямку до рольганга; укладання.

Механізм вивантаження працює циклічно з максимальною кількістю - 30 циклів у годину.

Механічні характеристики елементів редуктора наведені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3.

Назва елемента		Найменування параметра	Позначення	Одиниця виміру	Величина
Циліндрична ступінь редуктора	шестерня	діаметр	$d_{ш}$	м	0,047
		число зубів	$Z_{ш}$	-	
Конічна ступінь редуктора	шестерня	діаметр	$d_{ш}$	м	0,084
		число зубів	$Z_{ш}$	-	
	колесо	діаметр число зубів	d_k Z_k	м -	0,154

1.4. Вимоги до електропривода машини вивантаження

З метою запобігання аварійних ситуацій робота привода машини вивантаження повинна бути строго синхронізована з роботою інших приводів (відвідних рольгангів).

Головними завданнями привода є:

- підтримка швидкості обертання двигуна на заданому рівні, як у номінальному режимі, так і на зниженій швидкості;

- система керування приводом повинна забезпечувати задану точність зупинки;
- розгін до робочої швидкості й гальмування повинні відбуватися за час не більш ніж 1,0 с.

Для нормального пуску потрібно значний пусковий момент, тому що пуск здійснюється під навантаженням. Система керування приводом повинна забезпечувати мінімальне відхилення швидкості й швидко її стабілізацію на заданому рівні. Двигун повинен мати високу жорсткість робочої ділянки механічної характеристики і мати малу величину ковзання.

Оскільки робота привода складається із двох етапів (робота на номінальній і на зниженій швидкості), то необхідно забезпечити роботу привода в певному діапазоні швидкостей.

Двигун повинен стабільно працювати як на підвищених, так і на знижених швидкостях у повторно-короткочасному режимі.

Одним з основних вимог до привода є економічне споживання силовою частиною електричної енергії, при збереженні високих динамічних характеристик.

Система керування повинна також забезпечувати всі необхідні види захистів і блокувань.

Проведемо порівняльну характеристику найпоширеніших систем із синхронними, асинхронним приводами й приводом постійного струму для того, щоб визначити, який з них у найбільш повному ступені задовольняє вищевказані вимоги.

Сучасний етап характерний широким використанням дешевих частотних перетворювачів для асинхронних і синхронних машин змінного струму. Ці машини прості в обслуговуванні й досить надійні в експлуатації.

Синхронні двигуни хоч і перевершують по своїх техніко-економічних показниках двигуни інших типів, але їх недоцільно застосовувати для приводів із широким регулюванням швидкості.

Частотне керування асинхронним двигуном є досить економічним, тому що забезпечує регулювання швидкості без значних втрат потужності в роторному ланцюзі, що погіршують ККД електропривода й приводять до необхідності завищення потужності двигуна.

Частотне регулювання швидкості може здійснюватися плавно, у широкому діапазоні, в обидва боки від природної характеристики, тобто асинхронний двигун може мати швидкість як більше, так і менше номінальної. При цьому регульовальні характеристики мають високу жорсткість, а двигун зберігає більшу перевантажувальну здатність.

У двигуні постійного струму регулювання швидкості в обидва боки від природної характеристики можливо зміною магнітного потоку, наприклад за допомогою керованого випрямляча в ланцюзі збудження. Цей спосіб знаходить широке застосування внаслідок простоти його реалізації й економічності, тому що регулювання здійснюється у відносно малопотужному ланцюзі збудження двигуна й не супроводжується значними втратами потужності. Але двигуни постійного струму мають істотні недоліки - відносно висока вартість і низька надійність. Це пов'язане з наявністю щітково-колекторного вузла, що до того ж є джерелом радіоперешкод і пожежонебезпеки й істотно знижує ККД двигуна.

Отже, найкраще запропонованим вимогам відповідає асинхронний двигун з перетворювачем частоти.

1.5. Постановка завдань кваліфікаційної роботи

У ході виконання кваліфікаційної роботи магістра необхідно розв'язати такі завдання:

- Виконати розрахунки механічної частини ЕП;
- Вибрати привідний електродвигун;
- Вибрати частотний перетворювач;
- Провести математичне моделювання двигуна та електропривода;
- Виконати скалярне управління електроприводом.

2. Розрахунково-конструкторська частина

2.1. Розрахунок механічної частини електропривода

2.1.1. Кінематична й розрахункова схеми механічної частини електропривода

На рис. 2.1. представлена кінематична схема привода машини вивантаження. Привід складається з електродвигуна, муфти, гальма, конічно-циліндричного редуктора, зубчастої муфти, вала-шестірні й розвантажувальних важелів.

Елементи кінематичної схеми:

- | | |
|-----------------------------|-------------------------|
| 1- швидкохідний вал; | 8- редуктор; |
| 2- проміжний вал; | 9- електричний двигун; |
| 3- тихохідний вал; | 10- заготівля; |
| 4- вал - шестерня; | 11- шестерня; |
| 5- вал двигуна; | 12- гальмо; |
| 6- розвантажувальні важелі; | 13- з'єднувальна муфта. |
| 7- зубчаста муфта; | |

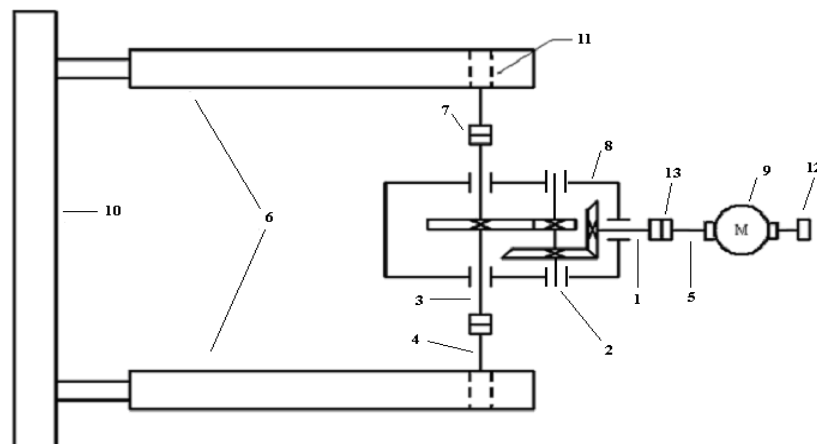


Рисунок 2.1 - Кінематична схема секції механізму

На основі кінематичної схеми складена розрахункова схема, що має п'ятимасову структуру. Розрахункова схема представлена на рис. 2.2.

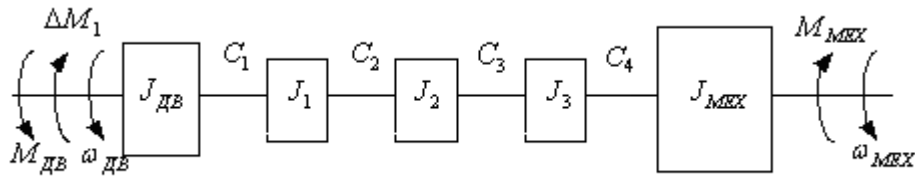


Рисунок 2.2 - Розрахункова схема механічної частини електропривода

2.1.2. Розрахунок обертових і поступальних моментів інерції мас що рухаються

Момент інерції швидкохідного вала:

$$J_1 = \frac{m_1 \cdot d_1^2}{8}; \quad (2.1)$$

$$J_1 = \frac{21 \cdot 0,055}{8} = 7,94 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

Момент інерції проміжного вала:

$$J_2 = \frac{m_2 \cdot d_2^2}{8}; \quad (2.2)$$

$$J_2 = \frac{7,5 \cdot 0,024}{8} = 5,4 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

Момент інерції тихохідного вала:

$$J_3 = \frac{m_3 \cdot d_3^2}{8}; \quad (2.3)$$

$$J_3 = \frac{145 \cdot 0,078^2}{8} = 0,11 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

Момент інерції вала-шестірні:

$$J_4 = \frac{m_4 \cdot d_4^2}{8}; \quad (2.4)$$

$$J_4 = \frac{300 \cdot 0,12^2}{8} = 0,54 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

Конічна ступінь.

Маса шестерні:

$$m_{u1} = \rho \cdot \frac{\pi \cdot d_{u1}^2}{4} \cdot l; \quad (2.5)$$

$$m_{u1} = 7,87 \cdot 10^3 \cdot \frac{\pi \cdot 0,084^2}{4} \cdot 0,015 = 0,654 \text{ кг};$$

Момент інерції шестерні:

$$J_{u1} = \frac{m_{u1} \cdot d_{u1}^2}{8}; \quad (2.6)$$

$$J_{u1} = \frac{0,654 \cdot 0,084^2}{8} = 5,77 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

Маса колеса:

$$m_{\kappa 1} = \rho \cdot \frac{\pi \cdot d_{\kappa 1}^2}{4} \cdot l; \quad (2.7)$$

$$m_{\kappa 1} = 7,87 \cdot 10^3 \cdot \frac{\pi \cdot 0,154^2}{4} \cdot 0,015 = 2,2; \text{ кг};$$

Момент інерції колеса:

$$J_{\kappa 1} = \frac{m_{\kappa 1} \cdot d_{\kappa 1}^2}{8}; \quad (2.8)$$

$$J_{\kappa 1} = \frac{2,2 \cdot 0,154^2}{8} = 6,52 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

Циліндричний ступінь:

Маса шестерні:

$$m_{u2} = \rho \cdot \frac{\pi \cdot d_{u2}^2}{4} \cdot l; \quad (2.9)$$

$$m_{u2} = 7,87 \cdot 10^3 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0477^2}{4} \cdot 0,015 = 0,211 \text{ кг};$$

Момент інерції шестерні:

$$J_{u2} = \frac{m_{u2} \cdot d_{u2}^2}{8}; \quad (2.10)$$

$$J_{u2} = \frac{0,211 \cdot 0,0477^2}{8} = 6,0 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

Маса колеса:

$$m_{\kappa 2} = \rho \cdot \frac{\pi \cdot d_{\kappa 2}^2}{4} \cdot l; \quad (2.11)$$

$$m_{\kappa 2} = 7,87 \cdot 10^3 \cdot \frac{\pi \cdot 0,3^2}{4} \cdot 0,015 = 8,344 \text{ кг};$$

Момент інерції колеса:

$$J_{\kappa 2} = \frac{m_{\kappa 2} \cdot d_{\kappa 2}^2}{8}; \quad (2.12)$$

$$J_{\kappa 2} = \frac{8,344 \cdot 0,3^2}{8} = 0,094 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

Момент інерції ведучої шестерні механізму:

Маса шестерні:

$$m_u = \rho \cdot \frac{\pi \cdot d_u^2}{4} \cdot l; \quad (2.13)$$

$$m_u = 7,87 \cdot 10^3 \cdot \frac{\pi \cdot 0,18^2}{4} \cdot 0,35 = 70,093 \text{ кг};$$

Момент інерції шестерні:

$$J_u = \frac{m_u \cdot d_u^2}{8}; \quad (2.14)$$

$$J_{\text{ш}} = \frac{70,093 \cdot 0,18^2}{8} = 0,284 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

Передаточне число кінцевого ступеня:

$$i_1 = \frac{z_{\text{к}}}{z_{\text{ш}}}; \quad (2.15)$$

$$i_1 = \frac{29}{14} = 2,071;$$

Передаточне число кінцевого ступеня:

$$i_2 = \frac{z_{\text{к}}}{z_{\text{ш}}}; \quad (2.16)$$

$$i_2 = \frac{50}{9} = 5,556;$$

Момент інерції мас, що рухаються поступально (розвантажувальних важелів) без навантаження:

$$J_{\text{ш1}} = 2 \cdot m_{\text{пп}} \cdot \left(\frac{d_{\text{ш}}}{2}\right)^2; \quad (2.17)$$

$$J_{\text{ш1}} = 2 \cdot 4800 \cdot \left(\frac{0,18}{2}\right)^2 = 77,76 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

Момент інерції мас, що рухаються поступально (розвантажувальних важелів і заготівлі) під навантаженням:

$$J_{\text{ш2}} = \left(\frac{m_3}{2} + 2 \cdot m_{\text{пп}}\right) \cdot \left(\frac{d_{\text{ш}}}{2}\right)^2; \quad (2.18)$$

$$J_{\text{ш2}} = \left(\frac{10400}{2} + 2 \cdot 4800\right) \cdot \left(\frac{0,18}{2}\right)^2 = 119,7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

Радіус приведення:

$$p = \frac{d_{\text{ш}}}{2 \cdot i_p}; \quad (2.19)$$

$$p = \frac{0,18}{2 \cdot 11,5} = 7,821 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

Момент інерції мас, що рухаються поступально (розвантажувальних важелів), приведений до вала двигуна без навантаження й під навантаженням:

$$J_{III1} = 2 \cdot m_{pp} \cdot p^2; \quad (2.20)$$

$$J_{III1} = 2 \cdot 4800 \cdot (7,821 \cdot 10^{-3})^2 = 0,587 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{III2} = \left(\frac{m_3}{2} + 2 \cdot m_{pp}\right) \cdot p^2; \quad (2.21)$$

$$J_{III2} = \left(\frac{10400}{2} + 2 \cdot 4800\right) \cdot (7,821 \cdot 10^{-3})^2 = 0,905 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

Уточнені моменти інерції.

Швидкохідного вала:

$$J_1' = J_1 + J_{u1}; \quad (2.22)$$

$$J_1' = 7,94 \cdot 10^{-3} + 5,77 \cdot 10^{-4} = 8,518 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

проміжного вала:

$$J_2' = J_2 + J_{\kappa1} + J_{u2}; \quad (2.23)$$

$$J_2' = 5,4 \cdot 10^{-4} + 6,52 \cdot 10^{-3} + 6,0 \cdot 10^{-5} = 7,119 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

тихохідного вала:

$$J_3' = J_3 + J_{\kappa2}; \quad (2.24)$$

$$J_3' = 0,11 + 0,094 = 0,204 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

вала-шестерні:

$$J_4' = J_4 + 2 \cdot J_{u}; \quad (2.25)$$

$$J_4' = 0,54 + 2 \cdot 0,284 = 1,108 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент інерції проміжного вала, приведений до вала двигуна:

$$J_{2II}' = \frac{J_2'}{i_1^2}; \quad (2.26)$$

$$J'_{2\Pi} = \frac{7,119 \cdot 10^{-3}}{2,0711^2} = 1,659 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент інерції тихохідного вала, приведений до вала двигуна:

$$J'_{3\Pi} = \frac{J'_3}{i_p^2}; \quad (2.27)$$

$$J'_{3\Pi} = \frac{0,204 \cdot 10^{-3}}{11,5^2} = 1,542 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

Момент інерції редуктора, приведений до вала двигуна:

$$J_p = J'_1 + J'_{2\Pi} + J'_{3\Pi}; \quad (2.28)$$

$$J_p = 8,518 \cdot 10^{-3} + 1,542 \cdot 10^{-3} + 1,659 \cdot 10^{-3} = 0,012; \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

Момент інерції вала-шестірні, наведений до вала двигуна:

$$J'_{4\Pi} = \frac{J'_4}{i_p^2}; \quad (2.29)$$

$$J'_{4\Pi} = \frac{1,108}{11,5^2} = 8,365 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

Сумарний момент інерції, приведений до вала двигуна без навантаження:

$$J_{\Sigma 1} = J_{\text{ос}} + J_p + J'_{4\Pi} + J_{\text{III1}}; \quad (2.30)$$

$$J_{\Sigma 1} = 0,25 + 0,012 + 8,365 \cdot 10^{-3} + 0,587 = 0,861 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

Сумарний момент інерції, приведений до вала двигуна під навантаженням:

$$J_{\Sigma 2} = J_{\text{ос}} + J_p + J'_{4\Pi} + J_{\text{III2}}; \quad (2.31)$$

$$J_{\Sigma 2} = 0,25 + 0,012 + 8,365 \cdot 10^{-3} + 0,905 = 1,18 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

2.1.3. Розрахунок коефіцієнтів жорсткості зв'язків

Коефіцієнт жорсткості першого зв'язку:

$$C_1 = \frac{\pi \cdot G_T}{32 \cdot l_1} \cdot d_1^4; \quad (2.32)$$

$$C_1 = \frac{3,14 \cdot 8 \cdot 10^{10}}{32 \cdot 0,42} \cdot 0,055^4 = 17110295 \text{ Н} \cdot \text{м}^2;$$

Коефіцієнт жорсткості другого зв'язку:

$$C_2 = \frac{\pi \cdot G_T}{32 \cdot l_2} \cdot d_2^4; \quad (2.33)$$

$$C_2 = \frac{3,14 \cdot 8 \cdot 10^{10}}{32 \cdot 0,32} \cdot 0,024^4 = 81389 \text{ Н} \cdot \text{м}^2;$$

Коефіцієнт жорсткості третього зв'язку:

$$C_3 = \frac{\pi \cdot G_T}{32 \cdot l_3} \cdot d_3^4; \quad (2.34)$$

$$C_3 = \frac{3,14 \cdot 8 \cdot 10^{10}}{32 \cdot 0,45} \cdot 0,078^4 = 6457071 \text{ Н} \cdot \text{м}^2;$$

Коефіцієнт жорсткості четвертого зв'язку:

$$C_4 = \frac{\pi \cdot G_T}{32 \cdot l_4} \cdot d_4^4; \quad (2.35)$$

$$C_4 = \frac{3,14 \cdot 8 \cdot 10^{10}}{32 \cdot 1,6} \cdot 0,12^4 = 1017360 \text{ Н} \cdot \text{м}^2;$$

2.1.4. Приведення жорсткості і моментів інерції до тримасової системи

Приведення до чотиримасової системи:

$$J_{23} = J_3' \cdot \frac{C_3}{C_3 + C_4}; \quad (2.36)$$

$$J_{23} = 0,204 \cdot \frac{6457071}{6457071 + 1017360} = 0,079 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{23E} = J_2' + J_{23}; \quad (2.37)$$

$$J_{23E} = 7,119 \cdot 10^{-3} + 0,079 = 0,086 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{34} = J_3' \cdot \frac{C_4}{C_3 + C_4}; \quad (2.38)$$

$$J_{34} = 0,204 \cdot \frac{1017360}{6457071 + 1017360} = 0,125 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{34E} = J_3' + J_{34}; \quad (2.39)$$

$$J_{34E} = 0,204 + 0,125 = 0,329 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$C_{34E} = \frac{C_3 \cdot C_4}{C_3 + C_4}; \quad (2.40)$$

$$C_{34E} = \frac{6457071 \cdot 1017360}{6457071 + 1017360} = 395003 \text{ Н} \cdot \text{м}^2;$$

Приведення до тримасової системи:

$$J_{123} = J_{23E} \cdot \frac{C_2}{C_2 + C_{34E}}; \quad (2.41)$$

$$J_{123} = 0,086 \cdot \frac{81389}{81389 + 395003} = 6,775 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{123E} = J_1 + J_{123}; \quad (2.42)$$

$$J_{123E} = 0,44 + 6,775 \cdot 10^{-2} = 0,51 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{23-34} = J_{23E} \cdot \frac{C_{34E}}{C_2 + C_{34E}}; \quad (2.43)$$

$$J_{23-34} = 0,086 \cdot \frac{395003}{81389 + 395003} = 2,561 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{23-34E} = J_{23E} + J_{23-34}; \quad (2.44)$$

$$J_{23-34E} = 0,086 + 2,561 = 2,76 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$C_{234E} = \frac{C_2 \cdot C_{34E}}{C_2 + C_{34E}}; \quad (2.45)$$

$$C_{234E} = \frac{81389 \cdot 395003}{81389 + 395003} = 150235 \text{ Н} \cdot \text{м}^2.$$

Приймаємо:

$$C_{12} = C_1 = 17102,5 \text{ Н} \cdot \text{м}^2;$$

$$C_{23} = C_{234E} = 15023,5 \text{ Н} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{10} = J_{DB} = 0,25 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$J_{20} = J_{123E} = 0,51 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$J_{30} = J_{23-34E} = 2,761 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

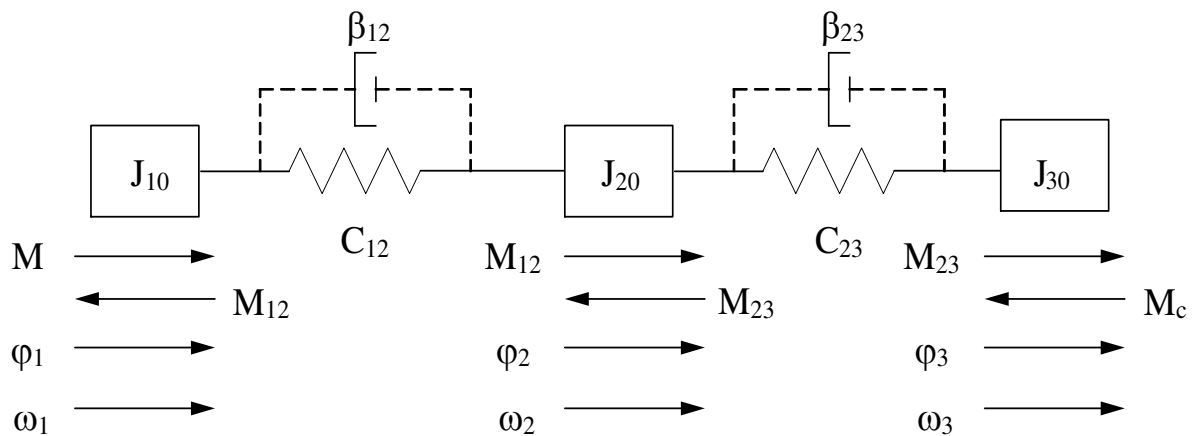


Рисунок 2.3 - Розрахункова схема тримасової послідовності пружної системи

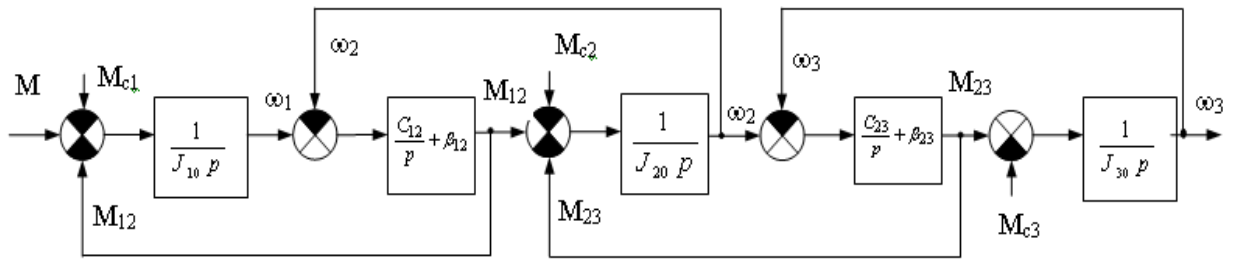


Рисунок 2.4 - Структурна схема тримасової пружної системи

Вирішивши біквдратне рівняння, одержуємо корінь характеристичного рівняння системи:

$$p_1 = 0;$$

$$p_{2,3} = \pm j \sqrt{\frac{a}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2b}{a^2}} \right)} = \pm j \sqrt{\frac{20200}{2} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 1492831}{20200^2}} \right)} = \pm j 492,39;$$

де:

$$a = \frac{c_{12} J_3 (J_{10} + J_{20}) + c_{23} J_{10} (J_{20} + J_{30})}{J_{10} J_{20} J_{30}} =$$

$$= \frac{17102,5 \cdot 2,671 \cdot (0,25 + 0,51) + 15023,5 \cdot 0,25 \cdot (0,51 + 2,671)}{0,25 \cdot 0,51 \cdot 2,671} = 2,02 \cdot 10^4;$$

$$b = \frac{c_{12} c_{23} (J_{10} + J_{20} + J_{30})}{J_{10} J_{20} J_{30}} = \frac{17102,5 \cdot 15023,5 \cdot (0,25 + 0,51 + 2,671)}{0,25 \cdot 9,193 \cdot 10^{-3} \cdot 0,171} = 1,4928312 \cdot 10^6$$

$$p_{4,5} = \pm j \sqrt{\frac{a}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{2b}{a^2}} \right)} = \pm j \sqrt{\frac{20200}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 1492831}{20200^2}} \right)} = \pm j 1025.$$

Корені характеристичного рівняння свідчать про те, що система може бути представлена у вигляді послідовно з'єднаної інтегруючої ланки й двох консервативних коливальних ланок з резонансними частотами коливальних Ω_1 і Ω_2 . Отже:

$$p_1 = 0; \quad p_{2,3} = \pm j \Omega_1; \quad p_{4,5} = \pm j \Omega_2.$$

Для розрахунку коефіцієнтів в'язкості тертя задамося значенням логарифмічного декременту згасання $\lambda_{12} = \lambda_{23} = 0,2$.

Коефіцієнт в'язкості тертя між першою й другою масами:

$$\beta_{12} = \frac{C_{12} \cdot \lambda_{12}}{\pi \cdot \Omega_1}; \quad (2.46)$$

$$\beta_{12} = \frac{17102,5 \cdot 0,2}{3,14 \cdot 492,39} = 36,62;$$

Коефіцієнт в'язкості тертя між другою й третьою масами:

$$\beta_{23} = \frac{C_{23} \cdot \lambda_{23}}{\pi \cdot \Omega_2}; \quad (2.47)$$

$$\beta_{23} = \frac{15023,5 \cdot 0,2}{3,14 \cdot 1025} = 11,2;$$

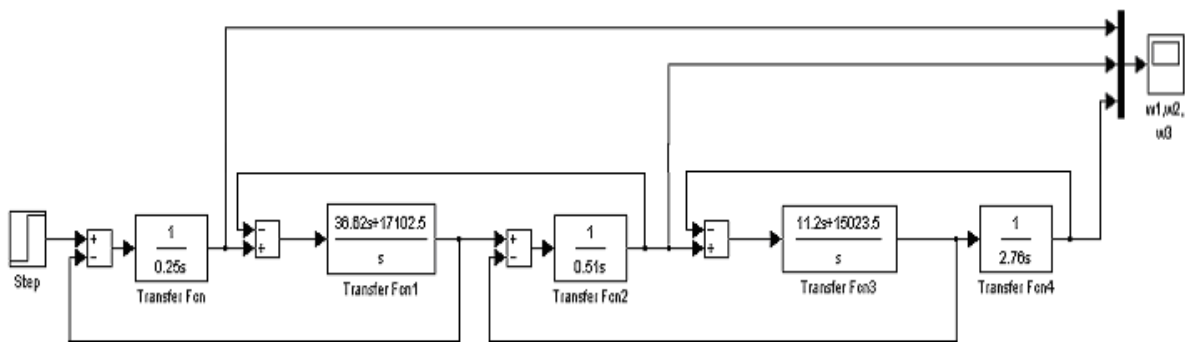


Рисунок 2.5 - Структурна схема тримасової пружної системи

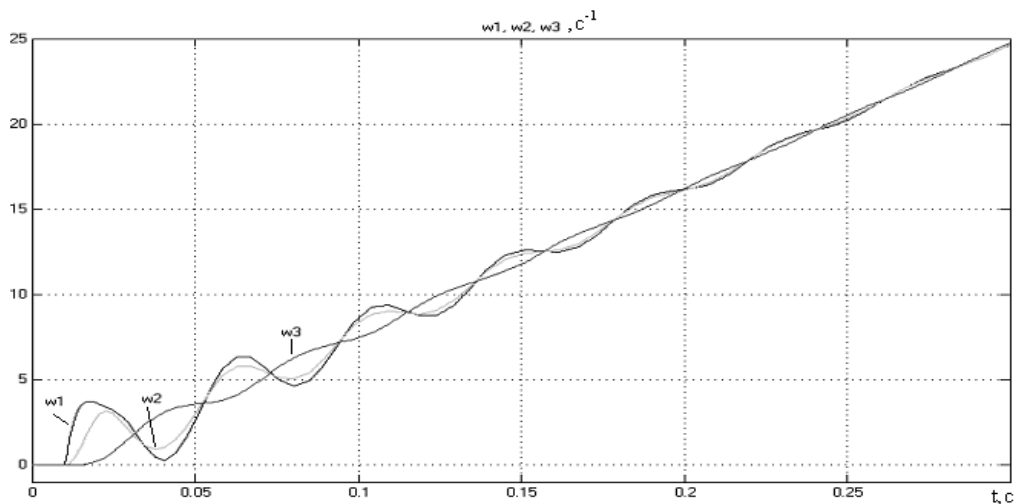


Рисунок 2.6 - Пуск електропривода із тримасовою пружною механічною частиною з урахуванням природного демпфування

На рис.2.5. представлена структурна схема тримасової пружної системи. З отриманих графіків (рис.2.6) видно, що коливання першої й другої мас

перебувають у протифазі із третьою масою, отже, розрахунок проведено правильно.

2.1.5. Моделювання двомасової пружної системи

Еквівалентна жорсткість двомасової пружної системи:

$$C_{12E} = \frac{C_{12} \cdot C_{23}}{C_{12} + C_{23}}; \quad (2.48)$$

$$C_{12E} = \frac{171025 \cdot 1502305}{171025 + 1502305} = 232343 \text{ Н} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{12} = J_{20} \cdot \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{23}}; \quad (2.49)$$

$$J_{12} = 9,193 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1710295}{1710295 + 79746} = 8,784 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{12E} = J_{DB} + J_{12}; \quad (2.50)$$

$$J_{12E} = 0,25 + 8,784 \cdot 10^{-2} = 0,41 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{23} = J_{20} \cdot \frac{C_{23}}{C_{12} + C_{23}}; \quad (2.51)$$

$$J_{23} = 9,193 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1502305}{171025 + 1502305} = 4,1 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{23E} = J_{20} + J_{23}; \quad (2.52)$$

$$J_{23E} = 9,193 \cdot 10^{-3} + 4,1 \cdot 10^{-2} = 0,425 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

Приймаємо:

$$C'_{12} = C_{12E} = 232343 \text{ Н} \cdot \text{м}^2;$$

$$J'_{10} = J_{12E} = 0,41 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J'_{20} = J_{123E} = 0,425 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Співвідношення мас:

$$\gamma = \frac{J'_{10} + J'_{20}}{J'_{10}}; \quad (2.53)$$

$$\gamma = \frac{0,41 + 0,425}{0,41} = 2,037;$$

Резонансна частота системи:

$$\Omega_{12} = \sqrt{\frac{C'_{12} \cdot (J'_{10} + J'_{20})}{J'_{10} \cdot J'_{20}}}; \quad (2.54)$$

$$\Omega_{12} = \sqrt{\frac{23234,3 \cdot (0,41 + 0,425)}{0,41 \cdot 0,425}} = 907,14 \text{ 1/c};$$

Резонансна частота другої маси при жорсткому закладенні першої:

$$\Omega_{02} = \sqrt{\frac{C'_{12}}{J'_{20}}} = \frac{\Omega_{12}}{\gamma}; \quad (2.55)$$

$$\Omega_{02} = \frac{907,14}{2,037} = 503,25 \text{ 1/c};$$

Коефіцієнт в'язкості тертя, приведений до двигуна:

$$\beta'_{12} = \frac{\lambda_{12} \cdot C'_{12}}{\pi \cdot \Omega_{12}}; \quad (2.56)$$

$$\beta'_{12} = \frac{0,2 \cdot 23234,3}{3,14 \cdot 907,14} = 31,535.$$

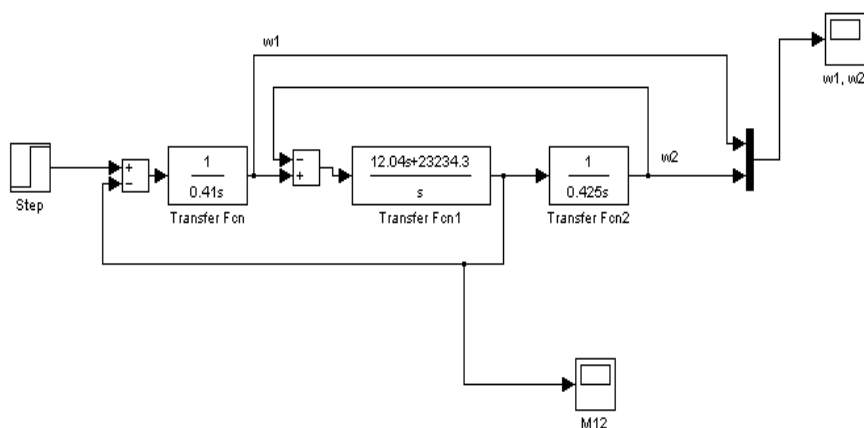


Рисунок 2.7 - Структурна схема двомасової пружної системи

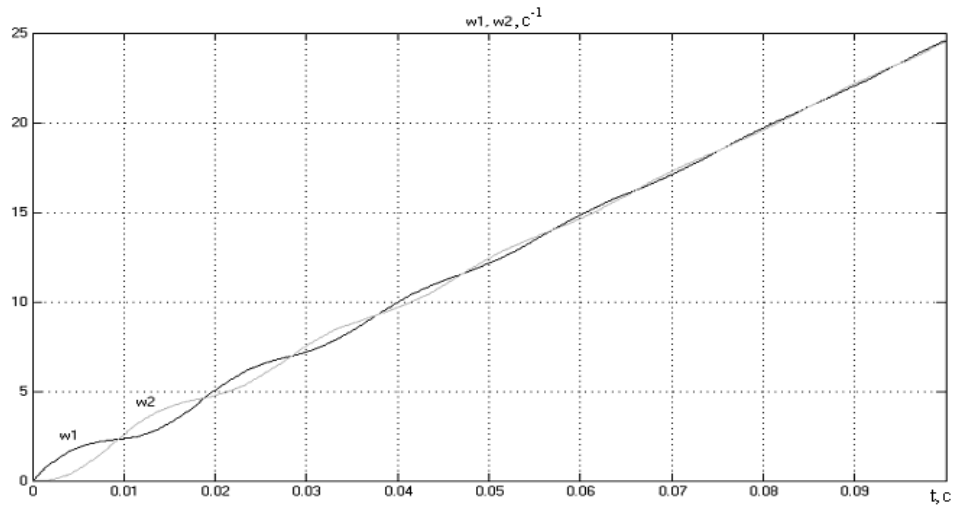


Рисунок 2.8 - Пуск електропривода із двомасовою пружною механічною частиною із урахуванням природного демпфування

На рис.2.7 представлена структурна схема двомасової пружної системи. Характер отриманих залежностей (рис.2.8) свідчить про те, що при $M = \text{const}$ через вплив дещипативних сил типу в'язкого внутрішнього тертя, коливання швидкості поступово загасають ($\lambda_{12} = 0,2$), однак миттєві швидкості ω_1, ω_2 при цьому не збігаються, тому що містять коливальні складові, причому коливання ω_1, ω_2 відбуваються в протифазі.

2.2. Розрахунок і побудова навантажувальної діаграми й тахограми механізму

2.2.1. Розрахунок параметрів механізму

Кутова швидкість вала механізму:

$$\omega_c = \frac{\pi \cdot n_c}{30}; \quad (2.57)$$

$$\omega_c = \frac{\pi \cdot 62,5}{30} = 6,545 \text{ с}^{-1};$$

Лінійна швидкість:

$$v = \omega_c \cdot \frac{D}{2}; \quad (2.58)$$

$$v = 6,545 \cdot \frac{180 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,59 \text{ м/с};$$

Швидкість на валу двигуна:

$$n = n_c \cdot i_p; \quad (2.59)$$

$$n = 62,5 \cdot 11,508 = 719,25 \text{ хв}^{-1};$$

Кутова швидкість двигуна:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}; \quad (2.60)$$

$$\omega = \frac{\pi \cdot 719,25}{30} = 75,32 \text{ с}^{-1};$$

Швидкість ідеального холостого ходу асинхронного двигуна при 50 Гц:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1^2}{p_{II}}; \quad (2.61)$$

$$\omega_{0PC} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50^2}{4} = 78,54 \text{ с}^{-1};$$

Ковзання двигуна при статичній швидкості:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}; \quad (2.62)$$

$$s = \frac{78,54 - 75,32}{78,54} = 0,041; \text{ с}^{-1};$$

Для переходу на знижену швидкість за допомогою частотного перетворювача зменшується частота мережі живлення з 50 Гц до 8 Гц. Відповідно разом із частотою зменшується й швидкість ідеального холостого ходу асинхронного двигуна відповідно до формули:

$$\omega_{0PC} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_2^2}{p_{II}}; \quad (2.63)$$

$$\omega_{0PC} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 8^2}{4} = 12,57; \text{ с}^{-1};$$

Жорсткість механічної характеристики при перетворенні частоти не змінюється, а виходить, не змінює свою величину й номінальне ковзання

двигуна. Виходячи із цього положення, визначимо знижену швидкість двигуна:

$$\omega_{ПС} = \omega_{0ПС} \cdot (1 - s); \quad (2.64)$$

$$\omega_{ПС} = 12,57 \cdot (1 - 0,041) = 12,05 \text{ с}^{-1};$$

Кутова швидкість вала механізму на зниженій швидкості:

$$\omega_{СПС} = \frac{\omega_{ПС}}{i_p}; \quad (2.65)$$

$$\omega_{СПС} = \frac{12,05}{11,508} = 1,0475 \text{ с}^{-1};$$

Лінійна знижена швидкість:

$$v_{СПС} = \omega_{СПС} \cdot \frac{D_u}{2}; \quad (2.66)$$

$$v_{СПС} = 1,0475 \cdot \frac{0,18}{2} = 0,094 \text{ м/с};$$

2.2.2. Визначення моментів статичного навантаження

Статична сила опору руху без заготівлі:

$$F_{c1} = 2 \cdot m_1 \cdot g \cdot \mu_k; \quad (2.67)$$

$$F_{c1} = 2 \cdot 4800 \cdot 9,81 \cdot 0,13 = 12240 \text{ Н};$$

Статична сила опору руху із заготівлею:

$$F_{c2} = (2 \cdot m_1 + \frac{m_2}{2}) \cdot g \cdot \mu_k; \quad (2.68)$$

$$F_{c2} = (2 \cdot 4800 + \frac{10400}{2}) \cdot 9,81 \cdot 0,165 = 23960 \text{ Н};$$

Де $\mu_{до}$ – коефіцієнт тертя в зубчастому зачепленні рейки й шестірні.

Моменти опору руху без заготівлі й із заготівлею:

$$M_{c1} = F_{c1} \cdot \frac{D_u}{2} \cdot k; \quad (2.69)$$

$$M_{c1} = 12240 \cdot \frac{0,18}{2} \cdot 1,05 = 1157 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{c2} = F_{c2} \cdot \frac{D_{ш}}{2} \cdot k; \quad (2.70)$$

$$M_{c2} = 23960 \cdot \frac{0,18}{2} \cdot 1,05 = 2264 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

Статичні моменти, приведені до вала двигуна без заготівлі й із заготівлею:

$$M_{c1n} = \frac{M_{c1}}{i_p \cdot \eta_p \cdot \eta_m^3}; \quad (2.71)$$

$$M_{c1n} = \frac{1157}{11,5 \cdot 0,96 \cdot 0,98^3} = 104,8 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{c2n} = \frac{M_{c2}}{i_p \cdot \eta_p \cdot \eta_m^3}; \quad (2.72)$$

$$M_{c2n} = \frac{2264}{11,5 \cdot 0,96 \cdot 0,98^3} = 205 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

де: η_m – ККД з'єднуючих муфт.

2.2.3. Розрахунок навантажувальної діаграми й тахограми механізму

Необхідний час циклу:

$$t_{ц} = \frac{3600}{30} = 120 \text{ с}; \quad (2.73)$$

Час пуску:

$$t_n = \frac{v}{a_{дон}}; \quad (2.74)$$

$$t_n = \frac{0,59}{0,6} = 0,98 \text{ с};$$

Шлях, пройдений за час пуску:

$$s_{II} = \frac{a_{дон} \cdot t^2}{2}; \quad (2.75)$$

$$s_{II} = \frac{0,5 \cdot 0,98^2}{2} = 0,24; \text{ м};$$

Час гальмування до зниженої швидкості:

$$t_{ПС1} = \frac{v - v_{СПС}}{a_{\text{дон}}}; \quad (2.76)$$

$$t_{ПС1} = \frac{0,59 - 0,094}{0,6} = 0,83 \text{ с};$$

Час гальмування зі зниженої швидкості:

$$t_{ПС2} = \frac{v_{СПС}}{a_{\text{дон}}}; \quad (2.77)$$

$$t_{ПС2} = \frac{0,094}{0,6} = 0,16 \text{ с};$$

Шлях, пройдений на зниженій швидкості в сталому режимі:

$$s_{УСПС} = v_{СПС} \cdot t_{УСПС}; \quad (2.78)$$

$$s_{УСПС} = 0,094 \cdot 5 = 0,47 \text{ м};$$

Шлях, пройдений за час гальмування:

$$s_{ПС} = \frac{a_{\text{дон}}}{2} \cdot (t_{ПС1}^2 + t_{ПС2}^2); \quad (2.79)$$

$$s_{ПС} = \frac{0,6}{2} \cdot (0,83^2 + 0,16^2) = 0,25 \text{ м};$$

Час роботи на зниженій швидкості:

$$t_{РПС} = t_{УСПС} + t_{ПС1} + t_{ПС2}; \quad (2.80)$$

$$t_{РПС} = 5 + 0,83 + 0,16 = 5,99 \text{ с};$$

Шлях, пройдений зі сталою швидкістю:

$$s_{УСТ} = s - s_{II} - s_{УСПС} - s_{ПС} - s_{УСПС}; \quad (2.81)$$

$$s_{УСТ} = 10,5 - 0,24 - 0,47 - 0,25 = 9,54 \text{ м};$$

Час руху зі сталою швидкістю:

$$t_{УСТ} = \frac{s_{УСТ}}{v}; \quad (2.82)$$

$$t_{\text{VCT}} = \frac{9,54}{0,59} = 16,17 \text{ с};$$

Час роботи при русі назад і вперед:

$$t_{P1} = t_{P2} = t_{\text{VCT}} + t_{\text{II}} + t_{\text{PNC}}; \quad (2.83)$$

$$t_{P1} = t_{P2} = 16,17 + 0,98 + 5,99 = 23,14 \text{ с};$$

Час паузи при розвантаженні:

$$t_{02} = t_{\text{Ц}} - 2 \cdot t_{P1} - t_{01}; \quad (2.84)$$

$$t_{02} = 120 - 2 \cdot 23,14 - 25 = 47,93 \text{ с};$$

Наведене значення допустимого прискорення:

$$\varepsilon_{\text{дон}} = \frac{a_{\text{дон}}}{p}; \quad (2.85)$$

$$\varepsilon_{\text{дон}} = \frac{0,6}{7,821 \cdot 10^{-3}} = 63,93 \text{ с}^{-1};$$

Сумарні моменти інерції під навантаженням і без навантаження, приведені до вала двигуна:

$$J_{\Sigma 1} = \frac{GD_{\Sigma 1}^2}{4} = \frac{3,4}{4} = 0,925 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad (2.86)$$

$$J_{\Sigma 2} = \frac{GD_{\Sigma 2}^2}{4} = \frac{5,2}{4} = 1,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

Пусковий момент без навантаження:

$$M_{\text{II1}} = J_{\Sigma 1} \cdot \varepsilon_{\text{дон}} + M_{c1}; \quad (2.87)$$

$$M_{\text{II1}} = 0,925 \cdot 63,93 + 108 = 167,1 \text{ Н м};$$

Гальмівний момент без навантаження:

$$M_{\text{T1}} = J_{\Sigma 1} \cdot \varepsilon_{\text{дон}} - M_{c1}; \quad (2.88)$$

$$M_{\text{T1}} = 0,925 \cdot 63,93 - 108 = -48,9 \text{ Н м};$$

Пусковий момент під навантаженням:

$$M_{\text{II2}} = -J_{\Sigma 2} \cdot \varepsilon_{\text{дон}} - M_{c2}; \quad (2.89)$$

$$M_{\text{II2}} = -1,3 \cdot 63,93 - 208 = -289 \text{ Н м};$$

Гальмівний момент під навантаженням:

$$M_{T2} = -J_{\Sigma 2} \cdot \varepsilon_{\text{дон}} + M_{c2}; \quad (2.90)$$

$$M_{T2} = -1,3 \cdot 63,93 + 208 = 124,9 \text{ Н м};$$

Тривалість включення електропривода:

$$ПВ = \frac{t_{p1} + t_{p2}}{t_u} \cdot 100 \%; \quad (2.91)$$

$$ПВ = \frac{23,14 + 23,14}{120} \cdot 100 \% = 38,7 \%;$$

У результаті приймаємо стандартне найближче значення ТВ:

$$\hat{O}A = 40 (\%);$$

Навантажувальна діаграма й тахограма механізму, побудована за результатами розрахунку, наведеному вище, представлена на рис. 2.9.

2.3. Вибір привідного електродвигуна

Правильний вибір потужності двигунів має велике значення, багато в чому визначаючи первісні витрати й вартість експлуатаційних витрат в електроприводах. Застосування двигуна недостатньої потужності може призвести до порушення нормальної роботи механізму, до зниження його продуктивності, виникнення аварійних ситуацій і передчасному виходу двигуна з ладу. У свою чергу використання двигунів завищеної потужності погіршує економічні показники установки, веде до її подорожчання й більших втрат енергії. У цьому випадку не тільки підвищується первісна вартість електропривода, але збільшуються й втрати енергії за рахунок зниження ККД двигуна, а в установках змінного струму, крім того, погіршується коефіцієнт потужності, величина якого безпосередньо впливає на непродуктивне завантаження розподільних мереж і генераторів електричних підстанцій, що виробляють енергію.

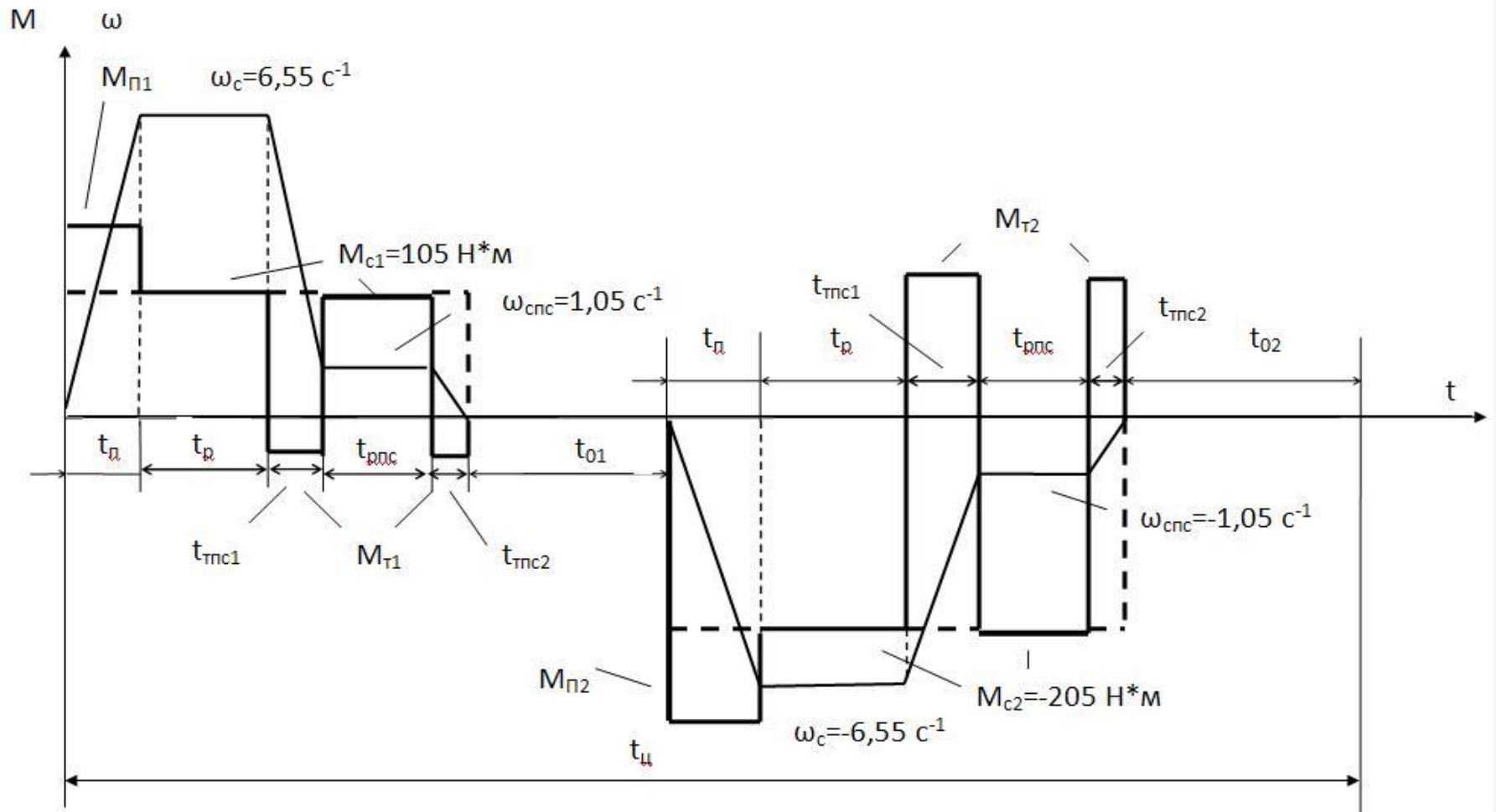


Рисунок 1.9 Навантажувальна діаграма

2.3.1. Розрахунок необхідної потужності

Зробимо розрахунок необхідної потужності двигуна по навантажувальній діаграмі виконавчого механізму з урахуванням впливу динаміки деяким коефіцієнтом запасу.

Момент статичний середньоквадратичний:

$$M_{cck} = \sqrt{\frac{M_{c1}^2 \cdot t_{p1} + M_{c2}^2 \cdot t_{p2}}{t_u}}; \quad (2.92)$$

$$M_{cck} = \sqrt{\frac{105^2 \cdot 23,14 + 205^2 \cdot 23,14}{46,28 + 47,93 + 25}} = 142,1 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

Коефіцієнт запасу, що враховує вплив динаміки й погіршення вентиляції двигуна в періоди пауз, приймаємо рівним: $\kappa_3 = 1,3$.

Використовуючи отримані дані, визначимо необхідну потужність двигуна по формулі:

$$P_{треб} = \kappa_3 \cdot M_{cck} \cdot \omega; \quad (2.93)$$

$$P_{треб} = 1,3 \cdot 142,1 \cdot 75,32 = 13,9 \text{ кВт};$$

2.3.2. Безпосередній вибір електродвигуна

Для обраного двигуна номінальним є повторно-короткочасний режим роботи S3 із тривалістю включення 40 %.

Підвищене навантаження двигуна на малих швидкостях або робота на швидкостях, що значно перевищують номінальну синхронну, що можливо тільки при його підключенні через частотний перетворювач, неминуче веде до збільшення його температури. Тому двигун повинен оснащуватися датчиками температури й вентилятором для примусового охолодження.

Двигун для даного режиму вибираємо, виходячи з умови [4]:

$$P_n \geq P_{треб} \quad (2.94)$$

де: P_n - номінальна потужність обраного двигуна, кВт.

Вибираємо двигун 1LA5207-8AB60 фірми Siemens як найбільш підходящий із рекомендованих, для даної мети. Це стандартний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором з додатковим вбудованим вентилятором охолодження. На його корпусі є клеми для двигуна вентилятора й імпульсного датчика швидкості / положення.

Двигуни фірми Siemens мають істотні переваги в порівнянні із двигунами вітчизняних виробників.

Конструкція, ізоляція обмотки, погана якість зібрання ротора й статора "вітчизняних" двигунів не дозволяє безпечно використовувати їх для частотного регулювання, особливо при 3000 об/хв.

Реальний (не довідковий) ККД двигунів SIEMENS на 3 - 5 % вище ККД "вітчизняних" двигунів.

За отриманим даними вибираємо приводний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором з наступними паспортними даними (табл. 2.4):

2.3.3. Перевірка двигуна на нагрів

Для розглянутого режиму роботи здійснимо перевірку двигуна на нагрів методом еквівалентного моменту, при розрахунку якого враховані не тільки моменти опору руху привода, але й пускові й гальмові моменти двигуна. У нашому випадку пуск механізму здійснюється під навантаженням (через значну масу розвантажувальних важелів), тому таке врахування є необхідним.

Метод еквівалентного моменту припускає, що при правильно обраному двигуні величина еквівалентного моменту не повинна перевищувати значення номінального моменту двигуна.

Обраний двигун має закрите виконання з вбудованим вентилятором охолодження, при цьому можна прийняти коефіцієнт погіршення тепловіддачі $\beta_{y.m.0} = 0,2$.

Визначимо середній коефіцієнт погіршення тепловіддачі в номінальному циклі при $T_{B_{ном}} = 40 \%$:

Таблиця 2.4

Параметри приводного електродвигуна

Параметр	Величина
Двигун	1LA5207-8AB60
Номинальна напруга U , В	400
Номинальна потужність P_H , кВт	15
Номинальна швидкість n_H , об/хв	725
Синхронна швидкість n_0 , об/хв	750
Число пар полюсів p	4
ККД η , %	87,5
Коефіцієнт потужності $\cos\varphi$	0,78
Номинальний струм I_H , А	32
Номинальний момент M_H , Н·м	198
Кратність пускового моменту m_{Π}	2,1
Кратність максимального моменту m_{MAX}	2,2
Кратність пускового струму I_{Π}^*	5,0
Момент інерції $J_{ДВ}$, кг·м ²	0,37
Маса m , кг	176

$$\beta_{y.m.c.p.ном} = \frac{t_{p.ном} + \beta_{y.m.0} \cdot t_{0.ном}}{t_{ц.ном}}; \quad (2.95)$$

$$\beta_{y.m.c.p.ном} = \frac{48 + 0,2 \cdot 72}{120} = 0,52;$$

Визначимо найменше значення середнього коефіцієнта погіршення тепловіддачі для трикутної діаграми швидкості:

$$\beta_{y.m.c.p.min} = \frac{1 + \beta_{y.m.0}}{2} \cdot \frac{ПВ_{НОМ}}{100} + \beta_{y.m.0} \cdot \frac{100 - ПВ_{НОМ}}{100}; \quad (2.96)$$

$$\beta_{y.m.cp.min} = \frac{1+0,2}{2} \cdot \frac{40}{100} + 0,2 \cdot \frac{100-40}{100} = 0,36;$$

Для режиму роботи із допустимою по нагріванню частотою включень

можна прийняти:

$$\beta_{y.m.cp.min} < \beta_{y.m.cp.} < \beta_{y.m.cp.ном}; \quad (2.97)$$

Приймаємо:

$$\beta_{y.m.cp.} = \frac{\beta_{y.m.cp.min} + \beta_{y.m.cp.ном}}{2}; \quad (2.98)$$

$$\beta_{y.m.cp.} = \frac{0,36 + 0,52}{2} = 0,44;$$

Перевіримо наагрів обраний двигун методом еквівалентного моменту з урахуванням середнього коефіцієнту погіршення тепловіддачі. При цьому повинна виконуватись умова:

$$M_{\vartheta} \leq M_{ном}; \quad (2.99)$$

Момент еквівалентний:

$$M_{\vartheta} = \sqrt{\frac{M_{II1}^2 \cdot t_{II1} + M_{VCT1}^2 \cdot t_{VCT1} + M_{VCT.IIC1}^2 \cdot t_{VCT.IIC} + M_{T1}^2 \cdot (t_{TIC1} + t_{TIC2})}{\beta_{y.m.cp.} \cdot t_{\vartheta}}}$$

$$\sqrt{\frac{M_{II2}^2 \cdot t_{II2} + M_{VCT2}^2 \cdot t_{VCT2} + M_{VCT.IIC2}^2 \cdot t_{VCT.IIC} + M_{T2}^2 \cdot (t_{TIC1} + t_{TIC2})}{\beta_{y.m.cp.} \cdot t_{\vartheta}}}$$

$$M_{\vartheta} = \sqrt{\frac{167,1^2 \cdot 0,98 + 105^2 \cdot 16,17 + 105^2 \cdot 5 + 48,9^2 \cdot (0,83 + 0,16)}{0,44 \cdot 120}}$$

$$\sqrt{\frac{289^2 \cdot 0,98 + 205^2 \cdot 16,17 + 205^2 \cdot 5 + 124,9^2 \cdot (0,83 + 0,16)}{0,44 \cdot 120}} = 193,505 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

Дана умова виконується тому що:

$$193,505 \leq 198;$$

Виходить, обраний привідний двигун підходить по нагріву.

2.4. Побудова механічних характеристик двигуна

2.4.1. Розрахунок основних параметрів двигуна

Для побудови механічних характеристик моделі розрахуємо необхідні параметри двигуна:

Синхронна частота обертання статора:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} ; \quad (2.101)$$

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{4} = 78,5 \text{ рад/с};$$

Номінальна частота обертання ротора:

$$\omega_H = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_H}{60} ; \quad (2.102)$$

$$\omega_H = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 725}{60} = 75,92 \text{ рад/с};$$

Номінальне ковзання двигуна:

$$S_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0} ; \quad (2.103)$$

$$S_H = \frac{78,5 - 75,92}{78,5} = 0,033;$$

Критичне ковзання двигуна:

$$s_K = S_H \cdot (M_{MAX} + \sqrt{M_{MAX}^2 - 1}) ; \quad (2.104)$$

$$s_K = 0,033 \cdot (2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) = 0,1387 ;$$

Механічні втрати визначимо за формулою:

$$P_{мех} = 1,73 \cdot U_n \cdot I_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi - P_n ; \quad (2.105)$$

$$P_{мех} = 1,73 \cdot 400 \cdot 32 \cdot 0,875 \cdot 0,78 - 15000 = 113,28 \text{ Вт};$$

Приведений активний опір ротора:

$$R_r^2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{(P_H + P_{мех})}{I_H^2 \cdot \frac{1 - S_H}{S_H}} ; \quad (2.106)$$

$$R_r = \frac{1}{3} \cdot \frac{(15000 + 113,28)}{32^2 \cdot \frac{1 - 0,033}{0,033}} = 0,1696 \text{ Ом};$$

Нехтуючи втратами у феромагнітному сердечнику й додатковими втратами в машині, можна вважати що потужність, виділена в активному опорі статорної обмотки, визначається виразом:

$$P_{\text{эпл}} = 3 \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3}} \cdot I_H \cdot \cos \varphi \cdot (1 - \eta) - 3 \cdot I_H^2 \cdot R_r' \cdot C^2 - P_{\text{мех}} = 3 \cdot I_H^2 \cdot R_S; \quad (2.107)$$

Звідси знаходимо величину активного опору статора:

$$R_S = \frac{\frac{U_H}{\sqrt{3}} \cdot \cos \varphi \cdot (1 - \eta)}{I_H} - R_r' \cdot C^2 - \frac{P_{\text{мех}}}{I_H^2 \cdot R_r'}; \quad (2.108)$$

$$R_S = \frac{\frac{400}{\sqrt{3}} \cdot 0,78 \cdot (1 - 0,875)}{32} - 0,172 \cdot 0,0312^2 - \frac{113,28}{32^2 \cdot 0,1696} = 0,4864 \text{ Ом};$$

Індуктивний опір короткого замикання знаходимо за формулою:

$$M_K = \frac{3 \cdot \left(\frac{U_H}{\sqrt{3}}\right)^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (R_S + \sqrt{R_S^2 + X_K^2});} \quad (2.109)$$

$$435,6 = \frac{3 \cdot \left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^2}{2 \cdot 78,5 \cdot (0,4864 + \sqrt{0,4864^2 + X_K^2});}$$

Звідси знаходимо, що $X_K = 1,787 \text{ Ом}$.

З достатньою точністю вважається, що індуктивний опір статора й наведений індуктивний опір ротора приблизно рівні, тоді:

$$X_S \approx X_R' \approx \frac{X_K}{2}; \quad (2.110)$$

$$X_S \approx X_R' \approx \frac{1,787}{2} \approx 0,8935 \text{ Ом};$$

Індуктивність розсіювання статора й ротора:

$$L_{SP} = L_{RP} = \frac{\frac{U_H}{\sqrt{3}}}{4 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (1 + C^2) \cdot I_{II}^* \cdot I_H}; \quad (2.111)$$

$$L_{SP} = L_{RP} = \frac{400}{\sqrt{3}} \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot (1 + 1,0312^2) \cdot 5,0 \cdot 32} = 0,00111 \text{ Гн};$$

Індуктивність ротора й статора:

$$L_S = L_R = \frac{\frac{U_H}{\sqrt{3}}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_H \cdot \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} - \frac{2}{3} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot M_K \cdot S_H}{p \cdot U_H \cdot S_K}}; \quad (2.112)$$

$$L_S = L_R = \frac{400}{\sqrt{3}} \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 32 \cdot \sqrt{1 - (0,78)^2} - \frac{2}{3} \cdot \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 435,6 \cdot 0,033}{4 \cdot 380 \cdot 0,1387}} = 0,0368 \text{ Гн};$$

Індуктивність контуру намагнічування:

$$L_m = L_S - L_{SP}; \quad (2.113)$$

$$L_m = 0,0368 - 0,00111 = 0,0357 \text{ Гн};$$

Коефіцієнт приведення вибираємо в межах 1,01–1,05 і домагаємося рівності розрахункового й прийнятого коефіцієнтів приведення $z=z_1$, що і застосуємо у вищенаведених розрахунках:

$$C_1 = 1 + \frac{L_{SP}}{L_m}; \quad (2.114)$$

$$C_1 = 1 + \frac{0,00111}{0,0357} = 1,0312.$$

2.4.2. Статичні механічні характеристики двигуна

Природна механічна характеристика двигуна отримана зі спрощеної схеми заміщення АД зображеної на рис.2.10., де прийняті наступні позначення:

Uф - первинна фазна напруга, В;

Is - фазний струм статора, А;

I'_r – приведений струм ротора, А;

X_s і X'_r – індуктивні опори статора й ротора (приведені), Ом;

R_m і X_m - активний і індуктивний опори контуру намагнічування, Ом;

s - ковзання двигуна;

R_s і R'_r – активні опори статора й ротора (приведені), Ом.

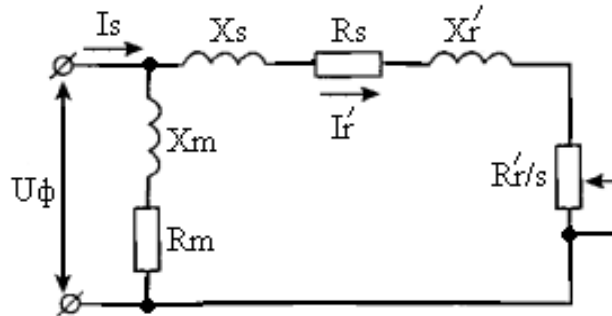


Рисунок 2.10 Спрощена схема заміщення АД

Відповідно до цієї схеми можна одержати вираз для так званої уточненої формули Клосса, що характеризує залежність моменту від швидкості АД:

$$M = \frac{2M_K(1 + \alpha s_K)}{1 - \frac{\omega}{\omega_0} + \frac{s_K}{s_K} + \frac{2\alpha s_K}{1 - \frac{\omega}{\omega_0}}}; \quad (2.115)$$

де: $\alpha = \frac{R_s}{R'_r}$ – безрозмірний коефіцієнт

$$\alpha = \frac{0,4864}{0,1696} = 0,3478; \quad (2.116)$$

Після підстановки чисельних значень параметрів одержимо рівняння природної механічної характеристики двигуна:

$$M = \frac{2 \cdot 435,6 \cdot (1 + 0,3478 \cdot 0,139)}{1 - \frac{\omega}{78,54} + \frac{0,139}{0,139} + \frac{2 \cdot 0,3478 \cdot 0,139}{1 - \frac{\omega}{78,54}}}; \quad (2.117)$$

Далі за допомогою математичної програми MathCAD будемо механічну характеристику з допомогою вищевказаної формули, заздалегідь визначивши всі величини що входять в неї й задавши крок моделювання для параметра швидкості ω з вказівкою меж від 0 до 80. На рис. 2.11 зображена отримана в такий спосіб характеристика двигуна.

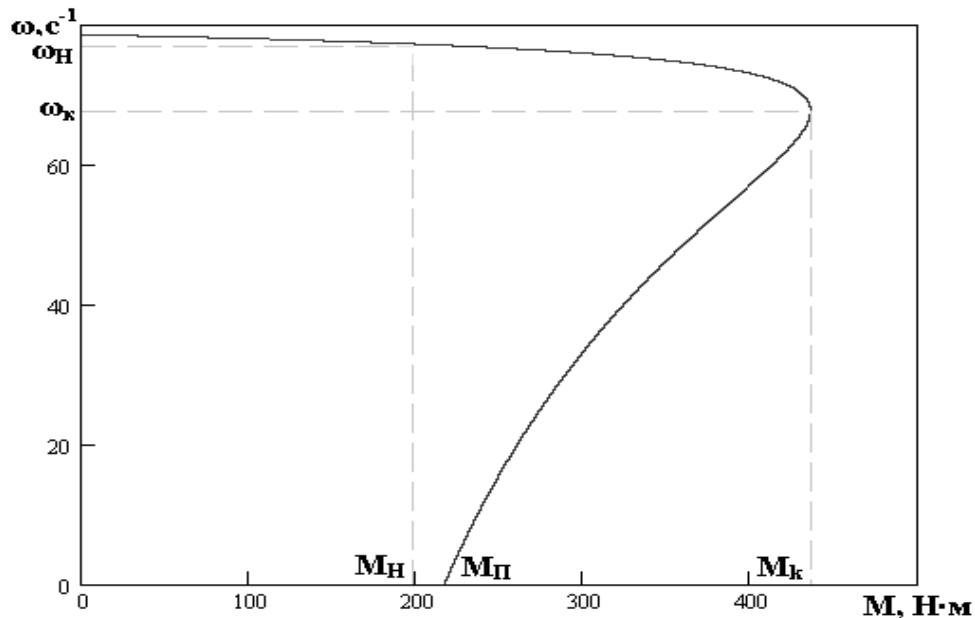


Рисунок 2.11 - Природна механічна характеристика двигуна

Характеристика наочно показує, що її робоча ділянка має досить високу жорсткість, а пусковий момент величину, достатню для пуску двигуна. Тому обраний двигун цілком задовольняє всі вимоги, пред'явлені йому.

У циклі роботи механізму є ділянка, на якій двигун працює зі зниженою швидкістю, зменшеною за допомогою ПЧ за рахунок зміни частоти живильної мережі з 50 до 8 Гц. На Рис 2.12. представлена механічна характеристика двигуна зі зниженою швидкістю.

Рівняння механічної характеристики двигуна зі зниженою швидкістю:

$$M = \frac{2M_K(1 + \alpha s_K)}{1 - \frac{\omega}{\omega_{0ПС}} + \frac{s_K}{1 - \frac{\omega}{\omega_{0ПС}}} + 2\alpha s_K} ; \quad (2.118)$$

Після підстановки чисельних значень параметрів одержимо рівняння механічної характеристики двигуна зі зниженою швидкістю:

$$M = \frac{2 \cdot 435,6 \cdot (1 + 0,3478 \cdot 0,139)}{1 - \frac{\omega}{12,57} + \frac{0,139}{1 - \frac{\omega}{12,57}} + 2 \cdot 0,3478 \cdot 0,139} ; \quad (2.119)$$

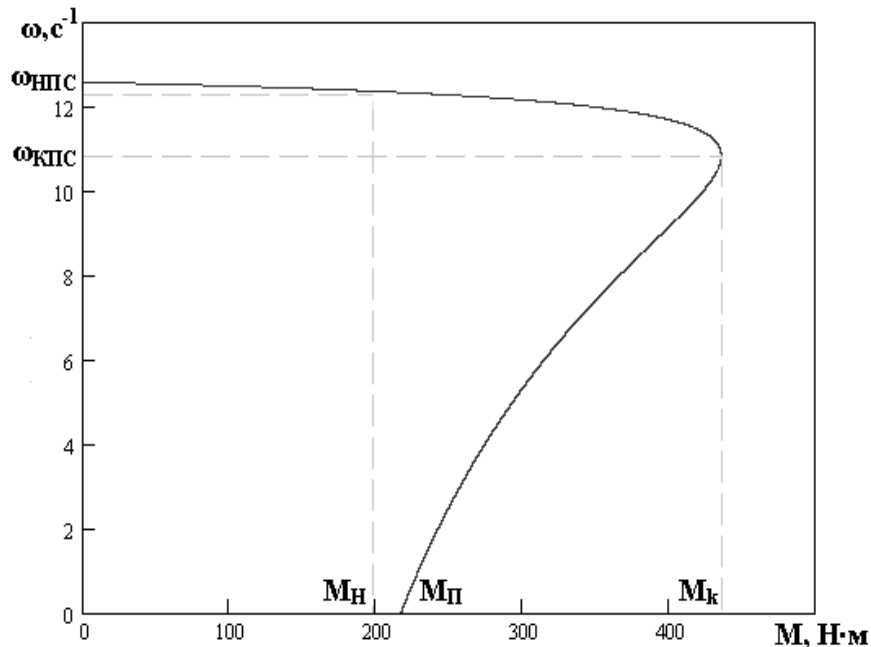


Рисунок 2.12 - Механічна характеристика двигуна зі зниженою швидкістю

Отримана характеристика показує, що її робоча ділянка має високу жорсткість.

2.4.3. Динамічні характеристики двигуна

Характеристики моменту на валу й поточозчеплення ротора в перехідних процесах можна описати наступними залежностями:

$$M(t) = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{T_r \cdot L_m^2}{L_r} \cdot \frac{\omega_r}{1 + (\omega_r \cdot T_r)^2} \cdot i_{sn}^2 \cdot \left[1 - \left[\cos(\omega_r \cdot t) + \frac{\sin(\omega_r \cdot t)}{\omega_r \cdot T_r} \right] \cdot e^{-\frac{t}{T_r}} \right]; \quad (2.120)$$

$$\psi_r(t) = \frac{\omega_r \cdot L_m \cdot T_r}{1 + (\omega_r \cdot T_r)^2} \cdot i_{sn} \cdot \left[1 - \left[\cos(\omega_r \cdot t) + \frac{\sin(\omega_r \cdot t)}{\omega_r \cdot T_r} \right] \cdot e^{-\frac{t}{T_r}} \right]; \quad (2.121)$$

Після підстановки чисельних значень параметрів, одержимо рівняння динамічних характеристик двигуна:

$$M(t) = \frac{3}{2} \cdot 4 \cdot \frac{0,217 \cdot 0,0357^2}{0,0368} \cdot \frac{75,92}{1 + (75,92 \cdot 0,217)^2} \cdot 32^2 \cdot \left[1 - \left[\cos(75,92 \cdot t) + \frac{\sin(75,92 \cdot t)}{75,92 \cdot 0,217} \right] \cdot e^{-\frac{t}{0,217}} \right];$$

$$\psi_r(t) = \frac{75,92 \cdot 0,217 \cdot 0,0357}{1 + (75,92 \cdot 0,217)^2} \cdot 32 \cdot \left[1 - \left[\cos(75,92 \cdot t) + \frac{\sin(75,92 \cdot t)}{75,92 \cdot 0,217} \right] \cdot e^{-\frac{t}{0,217}} \right];$$

Графіки динамічних характеристик представлені на рис. 2.13, 2.14.

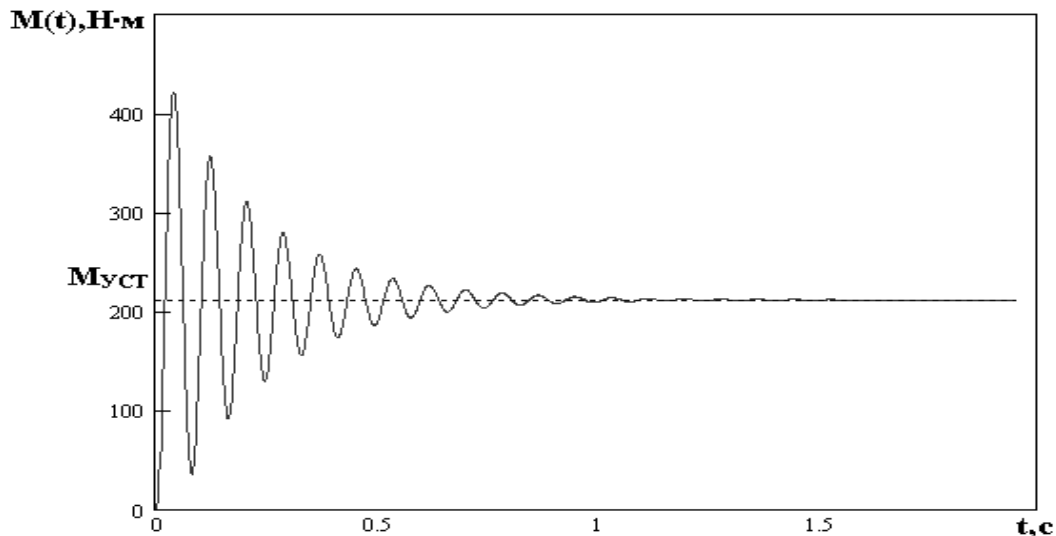


Рисунок 2.13 - Перехідна характеристика моменту при пуску під навантаженням

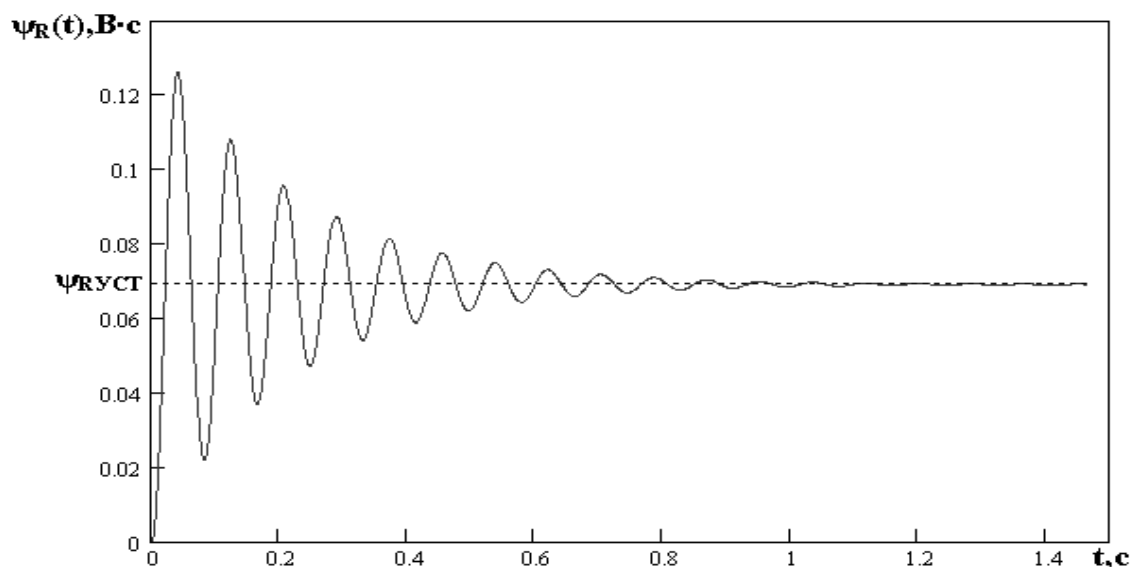


Рисунок 2.14 - Перехідна характеристика потокозчеплення ротора при пуску під навантаженням

З отриманих характеристик видно, що вони задовольняють основні вимоги до електропривода.

2.5. Вибір частотного перетворювача

2.5.1. Загальна характеристика напівпровідникових перетворювачів частоти для електропривода

Загальна характеристика напівпровідникових перетворювачів частоти для електропривода.

Напівпровідникові перетворювачі частоти для електропривода підрозділяються на два основних класи, що розрізняються за способом зв'язку двигуна з мережею живлення:

- 1) безпосередні перетворювачі частоти (БПЧ);
- 2) дволанкові перетворювачі частоти (ДПЧ) із проміжною ланкою постійного або змінного струму.

У класі БПЧ найбільше практичне застосування одержали перетворювачі із природною комутацією. У них використовуються силові

напівпровідникові прилади з неповним керуванням (тиристори), комутація яких виконується за рахунок напруги мережі. Безпосередній перетворювач частоти для керування багатофазними двигунами являє собою комплекс швидкодіючих реверсивних керованих інверторних перетворювачів, кожний з яких живить одну фазу двигуна. Формування необхідної частоти й амплітуди змінної напруги на затискачах двигуна забезпечується безперервною циклічною зміною кутів керування комплектом перетворювачів. Для побудови БПЧ застосовуються різні варіанти схем реверсивних керованих випрямлячів: нульові й мостові, мало- і багатоімпульсні, зустрічно-паралельні й перехресні, зі спільним і роздільним керуванням і т.д.

Основні недоліки БПЧ із природною комутацією:

- обмеження максимальних значень вихідної частоти на рівні порядку $1/3 \dots 2/3$ від частоти мережі живлення;
- наявність субгармонік і постійних складових вихідної напруги й струму при несприятливих співвідношеннях частот на вході й виході перетворювача;
- низький коефіцієнт потужності, несинусоїдальність і модуляція вхідних струмів перетворювача частоти як споживача в системі електропостачання;
- складність (багатоелементність) силових ланцюгів і ланцюгів керування, що є виправданим лише при виконанні перетворювача на порівняно більші потужності.

Вже тільки аналізуючи перший з вищевказаних недоліків можна зробити висновок, що БПЧ не підходить для даних цілей керування, тому що не забезпечує можливості двозонного регулювання швидкості двигуна.

Силова схема ДПЧ із проміжною ланкою змінного струму складається із двох основних ланок:

- перетворювача напруги джерела живлення в змінну напругу підвищеної частоти;

- безпосереднього перетворювача змінної напруги підвищеної частоти в змінну напругу необхідної частоти й амплітуди.

Перетворювачі даного типу по суті являють собою БПЧ із природною комутацією, оснащений індивідуальним джерелом напруги живлення підвищеної частоти. Проміжна ланка змінного струму виконується у вигляді оберненого БПЧ із примусовою ємнісною комутацією, що працює в режимі паралельного інвертора струму. Введення такої проміжної ланки дозволяє усунути один з основних недоліків мережевих БПЧ із природною комутацією - збільшити верхню межу регулювання вихідної частоти за рахунок збільшення частоти джерела живлення. Природно, що при цьому погіршуються масогабаритні й енергетичні показники перетворювача в цілому. Внаслідок цих недоліків, а так само відносної складності силової схеми й системи керування ПЧ із проміжною ланкою змінного струму не знайшли широкого застосування в електроприводі.

Основними ланками ДПЧ із проміжною ланкою постійного струму є:

- випрямляч із фільтром;
- інвертор.

Напруга живильної мережі спочатку корегується випрямлячем, а потім інвертується, тобто перетворюється в змінну напругу (або струм) необхідної частоти за допомогою інвертора. У системах частотного керування електродвигунами змінного струму застосовуються автономні інвертори (АІ) - комутатори, для функціонування яких необхідні повністю керовані перемикаючі елементи (ключі). Найбільш підходящими для АІ є повністю керовані напівпровідникові прилади (силові транзистори, запираючі тиристри).

Структура вхідних ланцюгів і режим перемикачів комутатора можуть бути організовані таким чином, що властивості АІ як електричного генератора виявляються подібними до властивостей генератора напруги, або генератора струму. Інвертори першого типу одержали назву автономні інвертори напруги (АІН); другого типу - автономні інвертори струму (АІС).

Інвертори напруги забезпечують величину й форму вихідної напруги, незалежні (або майже незалежні) від параметрів навантаження. Величина й форма струму визначається параметрами навантаження. На відміну від них інвертори струму формують у ланцюзі навантаження струм, величина й форма якого не залежать від параметрів навантаження. Залежними від параметрів навантаження виявляються величина й форма вихідної напруги АІС. Тому інвертори напруги безпосередньо сумісні тільки з навантаженням активно-індуктивного характеру, а інвертори струму - з навантаженням активно-ємнісного характеру. У іншому випадку між інвертором і навантаженням включаються буферні елементи індуктивного характеру в першому випадку і ємнісного в другому.

Головними перевагами ДПЧ із проміжною ланкою постійного струму є:

- можливість одержання на виході перетворювача широкого діапазону частот, не залежного від частоти мережі живлення й повністю задовольняючого потреби електроприводів різного призначення;
- можливість нарощування складної силової частини й системи керування відповідно до рівня підвищення вимог до привода, не допускаючи надмірної збитковості системи;
- можливість реалізації в порівняно малоелементній структурі перетворювача різноманітних алгоритмів керування, що задовольняють вимоги, пред'явлені приводам різного призначення;
- легкість трансформації перетворювача для роботи в установках з живленням електроустаткування від автономних джерел або локальної мережі постійного струму.

Основні недоліки ДПЧ із проміжною ланкою постійного струму:

- дворазове перетворення енергії, що збільшує її втрати й погіршує масогабаритні показники перетворювача;
- наявність у ланці постійного струму силового фільтра як невід'ємного елемента ДПЧ, що містить конденсаторну батарею значної

ємності (у схемах ДПЧ із АІН) або реактор зі значною індуктивністю (у системах ДПЧ із АІС). Елементи силового фільтра збільшують масу й габарити перетворювача, причому електролітичні конденсатори фільтра не завжди задовольняють вимоги високої надійності.

Найбільш масове практичне застосування в системах регульованих електроприводів змінного струму одержали ДПЧ із проміжною ланкою постійного струму, а з них - перетворювачі з АІН, що працюють у режимі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

При ШІМ вихідний сигнал перетворювача являє собою послідовність імпульсів напруги постійної амплітуди й тривалості котра змінюється, що на індуктивному навантаженні, яка є обмотка статора, формує струми, форма яких близька до синусоїдального.

У цей час питання енергозбереження, якості електроспоживання й електромагнітної сумісності перетворювачів вирішуються шляхом використання в ланці постійного струму випрямлячів із примусовою комутацією, що одержали назву активних випрямлячів.

У силовому ланцюзі послідовно включений активний випрямляч напруги (АВН), фільтр Φ й автономний інвертор напруги (АІН). Силові напівпровідникові перемикаючі елементи випрямляча й інвертора мають повну керованість і двосторонню провідність струму. Випрямляч АВН, виконаний по трифазній мостовій схемі, перетворює напругу мережі живлення змінного струму в стабілізовану напругу постійного струму U_d на конденсаторі фільтра. Трифазний мостовий АІН працює в режимі ШІМ і перетворює цю постійну напругу в змінну напругу на виході з необхідними значеннями частоти й амплітуди основної гармоніки. Це забезпечує сприятливу форму струму двигуна й рівномірність його обертання в широкому діапазоні швидкостей.

АВН виконується за схемою, повністю ідентичною схемі інвертора й по суті являє собою АІН, що також працює в режимі ШІМ. Так само як і автономний інвертор, АВН інвертує постійну напругу U_d в імпульсну

напругу на своїх затискачах змінного струму $A1, B1, C1$. Ці затискачі зв'язані з мережею живлення через буферні реактори БР. На відміну від регульованої робочої (корисної) частоти напруги на затискачах змінного струму A, B, C робоча частота на затискачах змінного струму АВН постійна й дорівнює частоті мережі живлення. Різниця миттєвих значень синусоїдальної напруги мережі живлення й імпульсної напруги на затискачах змінного струму АВН сприймається буферними реакторами БР, що є невід'ємними елементами системи. Завдяки використанню режиму ШІМ імпульсна напруга, формована АВН на стороні змінного струму, має сприятливий гармонійний склад, у якому основна (корисна) гармоніка й вищі гармоніки істотно відрізняються по частоті. Це створює сприятливі умови для фільтрації вищих гармонік струму, споживаного з мережі живлення, буферними реакторами.

Фазний кут споживаного струму залежить від співвідношення амплітуд і фазних кутів напруг, прикладених до реакторів з боку мережі й з боку АВН, а також від параметрів (індуктивності й активного опору) реактора. Варіюючи за допомогою системи керування АВН параметрами основної гармоніки його змінної напруги на затискачах $A1, B1, C1$, можна забезпечити споживання з мережі необхідного струму із заданим фазним кутом. Іншими словами, можна забезпечити роботу ПЧ із заданим значенням коефіцієнта потужності, наприклад рівним одиниці, або «випереджальним», чи «відстаючим» коефіцієнтом потужності. Тому ПЧ із АВН у принципі може бути використаний або як нейтральний елемент, або як джерело, чи як споживач реактивної потужності.

Як комутатор струму АВН перетворює споживаний з мережі змінний, близький до синусоїдального, струм у пульсуючий вихідний струм, що містить змінну й постійну складові. Змінна складова замикається через буферний конденсатор, що обмежує пульсації напруги U_d у ланці постійного струму від змінної складової вихідного струму АВН. Помітимо, що даний конденсатор виконує ту ж функцію й стосовно змінної складової струму, споживаного автономним інвертором дволанкового перетворювача. Постійна

складова вихідного струму АВН підживлює буферний конденсатор, компенсуючи витрату постійного струму, що віддається у вхідний ланцюг АІН.

Як перетворювач енергії постійного струму в енергію змінного струму автономний інвертор має надзвичайно цінну властивість - можливість двостороннього енергетичного обміну між мережами постійного і змінного струму. Ця властивість зберігається й в інверсній схемі включення автономного інвертора як активний випрямляч. У підсумку ДПЧ із АВН забезпечує двосторонній енергетичний обмін між мережею живлення й двигуном, у тому числі режим рекуперації енергії в мережу живлення. Завдяки цьому можлива побудова енергозберігаючих систем електропривода в різних сферах застосування з високою якістю споживання електроенергії [5].

2.5.2. Вибір перетворювача частоти

Існує великий ряд моделей перетворювачів частоти, що відрізняються технічними характеристиками й можливостями інтеграції в існуючу або проєктовану структуру технологічної автоматики. Тому, коли мова йде про придбання й установку перетворювача частоти на конкретне встаткування, необхідно зібрати вихідні дані й визначитися з вибором моделі перетворювача частоти.

При виборі перетворювача частоти повинні враховуватися:

- вид привода;
- напруга мережі;
- розрахунковий струм I_p перетворювача.

Розглянутий вид привода повинен забезпечувати сталість швидкості обертання двигуна відповідно до завдання. При цьому швидкість у різних випадках може варіюватися в широких межах.

Визначимо розрахунковий струм перетворювача [6]:

$$I_p = (0,565 + 0,15 \cdot \lambda) \cdot I_{нагр} ; \quad (2.122)$$

$$I_p = (0,565 + 0,15 \cdot 2,2) \cdot 32 = 28,64 \text{ (А)};$$

де: λ - кратність максимального моменту двигуна (перевантажувальна здатність) (див. табл. 1.4);

$I_{нагр}$ - номінальний струм двигуна під навантаженням, А.

До асинхронного двигуна необхідно підібрати перетворювач частоти з номінальним робочим струмом

$$I_H > I_p ; \quad (2.123)$$

і номінальною робочою напругою:

$$U_H > U_1 ; \quad (2.124)$$

де U_1 - напруга мережі, В ($U_1 = 400$ В);

Таким чином, номінальні параметри перетворювача повинні задовольняти наступним умовам:

$$I_H > 28,64 ;$$

$$U_H \geq 400 ;$$

Як перетворювач частоти вибираємо Simovert Masterdrive VC (серія Vector Control) фірми SIEMENS, що включає в себе два силових модулі: AFE (active front end) і VC (vector control). Перший з них - активний випрямляч, другий - автономний інвертор напруги. Обидва модулі побудовані на IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor - біполярний транзистор з ізольованим затвором) зі зворотними діодами (рис.2.17), і працюють у режимі ШІМ.

Силові AFE і VC по своїй конструкції, параметрам і схемотехніці мало чим відрізняються один від одного (для перетворювача AFE як силовий модуль застосований стандартний привідний інверторний модуль).

Серія Vector Control відрізняється розширеними функціональними можливостями й потужною цифровою системою керування. Кожний з перетворювачів керується своїм мікроконтролером: плата AFE управляє

випрямлячем, плата CU(VC) - інвертором.

CU(VC) реалізує режим векторного керування. При цьому можна забезпечити кожен з наступних законів керування:

- U/f -характеристика;
- регулювання частоти;
- регулювання моменту з імпульсним датчиком;
- регулювання швидкості з / без імпульсного датчика.

Дана система керування підтримує функцію «захисне відключення» вбудованим реле, не вимагає контактора з боку двигуна, завдяки чому заощаджуються робочий простір і кабелі. Вона може вирішувати складні технологічні завдання керування й регулювання, знижуючи вимоги до зовнішньої системи автоматизації (наприклад, до SIMATIC).

Завдяки застосуванню векторного керування асинхронним двигуном і великій обчислюваній потужності процесора Simovert, VC дозволяє з високою точністю підтримувати задану швидкість обертання двигуна як у сталих, так і в перехідних режимах.

Система керування має функції автоматичного визначення параметрів двигунів, автоматичного настроювання контурів регулювання, а також містить базу даних параметрів електродвигунів загального застосування.

Єдина концепція керування, комфортна панель значно полегшують первісне налагодження й експлуатацію перетворювача. Програма Simovis, що працює під Windows, дозволяє переглядати списки параметрів і структуру системи керування, керувати перетворювачем, проводити діагностику й настройку.

До складу перетворювача входять комплектні блоки, такі як фільтр радіо перешкод, мережні дроселі, блоки гальмування, вихідні дроселі, вихідні фільтри, кабелі двигунів і датчиків, у тому числі екрановані.

До обраного двигуна підберемо перетворювач частоти Simovert Masterdrives VC з наступними даними (табл. 2.5).

Таблиця 2.5

Характеристики перетворювача частоти Simovert Masterdrives

Параметр	Величина
Перетворювач частоти	6SE7023-4EC61- 1AA1
Номінальна потужність P_H , кВт	15
Номінальна напруга U_H , А	400
Номінальний вихідний струм I_{HB} , А	34
Базовий струм навантаження I_B , А	30,9
Струм перевантаження I_{MAX} , А	46,4
Номінальний струм DC ланки I_{DC} , А	40,5
Вхідний струм I_{BX} , А	37,4
Втрати при 2,5 кГц, кВт	0,47
КПД η	0,96-0,98
Коефіцієнт потужності $\cos\varphi$: по першій гармоніці повний	$\geq 0,98$ 0,93÷96
Номінальна частота живлення f Гц,	50\60 ($\pm 6\%$)
Вихідна частота, Гц: при $U/f=\text{const}$ при $U=\text{const}$	0-200 0-300
Частота ШІМ, кГц: мінімальна частота ШІМ заводська уставка максимальна частота ШІМ	1,7 2,5 16
Зразкова вага m , кг	24

2.6 Висновки за розділом

На основі проведених розрахунків можна зробити такі висновки:

1) Удосконалені параметри кінематичної схеми механічної частини електропривода, а саме, визначено оптимальне значення обертового та поступального моментів рухомих мас і визначені коефіцієнти жорсткості кінематичних зв'язків.

2) Проведене моделювання пуску електропривода із три масовою пружною механічною частиною, з урахуванням природного демпфування. Це дало змогу встановити, що коливання першої й другої мас перебувають у протифазі із третьою масою, отже, розрахунок проведено правильно.

3) Проведено розрахунок та побудовано навантажувальну діаграму та тахограму, відповідно до завдання на магістерську роботу.

4) Визначено статичний момент навантаження та виконано розрахунки по визначенню необхідної потужності приводного електродвигуна.

5) Вибрано приводний електродвигун та виконано його перевірку на нагрів.

6) Виконано розрахунки та побудовано механічну і перехідну характеристики електродвигуна для динамічного режиму.

7) Проведено обґрунтування на виконано вибір перетворювача частоти для приводного асинхронного електродвигуна, серії Simovert Masterdrives.

3. ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

3.1 Математичне моделювання електродвигуна

Математична теорія електричних машин змінного струму характеризується досить повним описом фізичних процесів, що протікають в них у сталих і перехідних режимах роботи.

Динамічні моделі машин змінного струму базуються на диференціальних рівняннях, які характеризуються більшою розмаїтістю, застосуванням різних систем координат і базисних величин. При вирішенні кожного конкретного завдання модель повинна бути максимально спрощена за рахунок відкидання другорядних факторів. У зв'язку зі складністю алгоритмів пошуку оптимальних керувань і фактором нелінійності машини як об'єкта керування вдалий вибір моделі об'єкта є запорукою успішного вирішення завдання.

3.2 Математичний опис узагальненої асинхронної машини

Узагальнена електрична машина є спрощеною моделлю реальної машини. У ній прийняті наступні допущення:

- 1) магніторушійні сили, створювані струмами фаз, синусоїдально розподілені уздовж повітряного зазору, тим самим ігнорується вплив вищих просторових гармонік магнітного поля;
- 2) електрична машина симетрична, тобто обмотки фаз мають рівне число витків;
- 3) відсутні насичення, і втрати в сталі;
- 4) відсутній вплив енергії електростатичного поля, утвореного за рахунок наявності ємності всередині обмоток і між ними.

Математичний опис узагальненої асинхронної машини базується на наступних чотирьох законах:

- 1) другий закон Кірхгофа, що визначає рівняння ЕРС на обмотках

статора й ротора;

2) закон Ампера, що зв'язує потокозчеплення обмоток зі струмами, що протікають по обмотках;

3) другий закон Ньютона – закон рівноваги моментів на валу машини;

4) закон Ленца – правило лівої руки, що зв'язує векторні величини моменту, потокозчеплення й струму.

Крім того, для спрощення математичного опису використовується метод просторового вектора, що дозволяє зв'язати всі рівняння для перерахованих вище законів у єдину систему з векторними змінними стану. Суть методу полягає в тім, що миттєві значення симетричних трифазних змінних стану (напруги, струми, потокозчеплення) можна математично перетворити так, щоб вони були представлені єдиним просторовим вектором. Тобто всі три фазні вектори струму або напруги, або потокозчеплення представляються результируючим просторовим вектором. При синусоїдальних законах зміни змінних станів, що утворюють симетричну трифазну систему, їхні результируючі вектори рухаються по круговій траєкторії з постійною кутовою швидкістю.

При переході до просторових векторів рівняння, що описують перші два з вищевказаних законів, мають вигляд:

$$\begin{cases} \bar{u}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} \\ \bar{u}_r = R_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} \\ \bar{\psi}_s = L_s \bar{i}_s + L_m(\theta) \bar{i}_r \\ \bar{\psi}_r = L_m(\theta) \bar{i}_s + L_r \bar{i}_r \end{cases} \quad (3.1)$$

де: \bar{u}_s , \bar{i}_s , $\bar{\psi}_s$ - просторові вектори відповідно напруги, струму й потокозчеплення статора;

\bar{u}_r , \bar{i}_r , $\bar{\psi}_r$ - просторові вектори відповідно напруги, струму й потокозчеплення ротора;

L_s , L_r – індуктивності статора й ротора, Гн;

$L_m(\Theta)$ – взаємна індуктивність між статором і ротором, Гн;

Θ - кут повороту ротора щодо статора, град.;

t - час, с.

Змінні коефіцієнти взаємної індукції в рівняннях для потокозчеплення є результатом того, що рівняння рівноваги е.р.с. для статора записані в нерухомій системі координат, зв'язаній зі статором, а рівняння рівноваги е.р.с. для ротора записані в обертових систем координат, пов'язаній з ротором. Метод просторового вектора дозволяє записати ці рівняння в єдиній системі координат, що обертається з довільною швидкістю. У цьому випадку рівняння (3.1) отримає вид.

$$\begin{cases} \bar{u}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} + j\omega_k \bar{\psi}_s \\ \bar{u}_r = R_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} + j(\omega_k - p\omega) \bar{\psi}_r \\ \bar{\psi}_s = L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r \\ \bar{\psi}_r = L_m \bar{i}_s + L_r \bar{i}_r \end{cases} \quad (3.2)$$

де: ω_k – довільна кутова швидкість обертання координат, радий/з;

ω – кутова швидкість обертання ротора, радий/з;

p – число пар полюсів у машині;

j – комплексна змінна.

Закон рівноваги моментів на валу машини має вигляд:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \bar{M} - \bar{M}_H \quad (3.3)$$

де: J – момент інерції на валу машини, що враховує інерційність як самої машини, так і наведеної до вала інерційності робочого механізму й редуктора, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

\bar{M} – момент робочого механізму, приведений до вала машини, $\text{Н} \times \text{м}$;

$\bar{M}_{\text{занр}}^r$ – момент навантаження, приведений до вала машини, $\text{Н} \times \text{м}$.

Правило лівої руки, що зв'язує векторні величини моменту, потокозчеплення й струму, математично записується в такий спосіб:

$$\vec{M} = k(\vec{\psi} \cdot \vec{i}) \quad (3.4)$$

де: k - коефіцієнт, що залежить від обраної пари векторів.

Момент у рівнянні (2.128) є векторним добутком кожної із шести пар векторів: (\vec{i}_s, \vec{i}_r) ; $(\vec{\psi}_s, \vec{\psi}_r)$; $(\vec{i}_s, \vec{\psi}_s)$; $(\vec{i}_s, \vec{\psi}_r)$; $(\vec{i}_r, \vec{\psi}_s)$; $(\vec{i}_r, \vec{\psi}_r)$.

Часто в розгляд уводиться потокозчеплення взаємної індукції:

$$\vec{\psi}_m = L_m(\vec{i}_s + \vec{i}_r) \quad (3.5)$$

У цьому випадку з'являється ще чотири можливості подання електромагнітного моменту машини через наступні пари $(\vec{i}_s, \vec{\psi}_m)$; $(\vec{i}_r, \vec{\psi}_m)$; $(\vec{\psi}_s, \vec{\psi}_m)$; $(\vec{\psi}_r, \vec{\psi}_m)$. Після вибору тієї або іншої пари рівняння моменту отримує визначеність, а кількість рівнянь у системі (3.2) скорочується до двох. Крім того, у рівняннях (3.4) і (3.5) векторні величини моменту й швидкості можуть бути замінені їхніми модульними значеннями. Це є наслідком того, що просторові вектори струмів і потокозчеплення розташовані в площині, перпендикулярній осі обертання, а вектори моменту й кутової швидкості збігаються з віссю.

Тепер зробимо перехід до відносних (безрозмірних) величин. Введення відносних величин істотно скорочує час моделювання й дозволяє усунути багато проблем при моделюванні.

Змінні й параметри у відносних одиницях:

$$\bar{u} = \frac{\vec{u}}{U_b}, \bar{i} = \frac{\vec{i}}{I_b}, \bar{\psi} = \frac{\vec{\psi}}{\Psi_b} \text{ – відносні електромагнітні змінні стану,}$$

$$\alpha_k = \frac{\omega_k}{\omega_b}, \text{ – відносна частота статора й відносна швидкість ротора на}$$

валу машини.

Розрахуємо базові й безрозмірні коефіцієнти, необхідні для побудови математичних моделей:

Базова частота обертання:

$$\omega_B = 2 \cdot \pi \cdot f; \quad (3.6)$$

$$\omega_B = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с};$$

Базовий час:

$$t_B = \frac{1}{\omega_B}; \quad (3.7)$$

$$t_B = \frac{1}{314} = 0,00318 \text{ Ом};$$

Базове значення моменту:

$$M_B = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{2 \cdot U_H \cdot I_H}{\omega_B}; \quad (3.8)$$

$$M_B = \frac{3}{2} \cdot 4 \cdot \frac{2 \cdot 400 \cdot 32}{314} = 464,71 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

Базовий опір:

$$R_B = \frac{U_H}{I_H}; \quad (3.9)$$

$$R_B = \frac{400}{32} = 12,5 \text{ Ом};$$

Приведений індуктивний опір контуру намагнічування:

$$x_m = \frac{\omega_B \cdot L_m}{R_B}; \quad (3.10)$$

$$x_m = \frac{314 \cdot 0,0357}{12,5} = 0,8962 \text{ Ом};$$

Приведений індуктивний опір статора й ротора:

$$x_S = x_R = \frac{\omega_B \cdot L_S}{R_B}; \quad (3.11)$$

$$x_S = x_R = \frac{314 \cdot 0,0368}{12,5} = 0,9242 \text{ Ом};$$

Коефіцієнт k_R :

$$k_R = \frac{X_m^*}{X_S^*}; \quad (3.12)$$

$$k_R = \frac{0,8962}{0,9242} = 0,9697;$$

Приведений опір статора:

$$r_S = \frac{R_S}{R_B}; \quad (3.13)$$

$$r_S = \frac{0,4864}{12,5} = 0,0389 \text{ Ом};$$

Приведений опір ротора:

$$r_R = \frac{R_R}{R_B}; \quad (3.14)$$

$$r_R = \frac{0,1696}{12,5} = 0,0136 \text{ Ом};$$

Параметр r :

$$r = r_S + k_R^2 \cdot r_R; \quad (3.15)$$

$$r = 0,0389 + 0,9697^2 \cdot 0,0136 = 0,517;$$

Параметр x'_S :

$$x'_S = x_S - \frac{(x_S)^2}{x_r}; \quad (3.14)$$

$$x'_S = 0,9242 - \frac{0,8962^2}{0,9242} = 0,0551;$$

Приведена постійна часу статора \overline{T}_S :

$$\overline{T}_S = \frac{x'_S}{r}; \quad (3.15)$$

$$\overline{T}_S = \frac{0,0551}{0,517} = 1,066 ;$$

Приведена постійна часу ротора \overline{T}_R :

$$\overline{T}_R = \frac{x_R}{r_R}; \quad (3.16)$$

$$\overline{T}_R = \frac{0,9242}{0,0136} = 68,1 ;$$

Приведене значення T_m :

$$T_m = \frac{J_{ДВ} \cdot \omega_B^2}{M_B}; \quad (3.17)$$

$$T_m = \frac{1,6 \cdot 314^2}{464,71} = 74,58 ;$$

Приведена постійна часу перетворювача:

$$T_\mu = \frac{0,0005}{t_B}; \quad (3.18)$$

$$T_\mu = \frac{0,0005}{0,00318} = 0,157 ;$$

Приведена еквівалентна постійна часу перетворювача:

$$T_{\mu Z} = \frac{0,001}{t_B}; \quad (3.19)$$

$$T_{\mu Z} = \frac{0,001}{0,00318} = 0,314 ;$$

Відносний момент навантаження $M_{нагр}$:

$$M_{нагр} = \frac{M_c}{M_\delta}; \quad (3.20)$$

$$M_{нагр} = \frac{205}{464,71} = 0,44 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

3.3 Характеристики якості перехідних процесів

Електромагнітна постійна часу ротора:

$$T_R = \overline{T}_R \cdot t_b; \quad (3.21)$$

$$T_R = 68,1 \cdot 0,00318 = 0,217 \text{ с};$$

Час перехідних процесів приймаємо:

$$t_{m1} = 3,5 \cdot T_R ; \quad (3.21)$$

$$t_{m1} = 3,5 \cdot 0,217 = 0,76 \text{ с};$$

Час досягнення першого максимуму:

$$t_{\max} = \frac{\pi}{\omega_r} ; \quad (3.22)$$

$$t_{\max} = \frac{\pi}{75,92} = 0,0414 \text{ с};$$

Перерегулювання:

$$\sigma = e^{\left(\frac{-\pi}{\omega_r \cdot T_R}\right)} ; \quad (3.23)$$

$$\sigma = e^{\left(\frac{-\pi}{75,92 \cdot 0,217}\right)} = 0,8263 .$$

3.4 Моделювання асинхронної машини з коротко замкнутим ротором у нерухомій системі координат

Схема асинхронної машини з короткозамкнутим ротором виходить із узагальненої схеми, якщо обмотки ротора замкнуті накоротко. При цьому в загальних рівняннях варто зазначити $\bar{u}_r = 0$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{u}_s = r_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} + j\alpha_k \bar{\psi}_s \\ 0 = r_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} + j(\alpha_k - p\nu)\bar{\psi}_r \\ \bar{\psi}_s = x_s \bar{i}_s + x_m \bar{i}_r \\ \bar{\psi}_r = x_m \bar{i}_s + x_r \bar{i}_r \\ m = k \text{Mod}(\bar{\psi}_i \times \bar{i}_k) \\ \bar{T}_m \frac{d\nu}{dt} = m - m_H \end{array} \right. \quad (3.24)$$

Для динамічних систем необхідно враховувати перехідні електромагнітні процеси в машині. У цьому випадку як пару змінних, що описують машину, залишимо просторові вектори струму статора й

потокочеплення ротора $(\bar{i}_s, \bar{\psi}_r)$, тоді рівняння (3.24) після відповідних перетворень приймуть вид:

$$\begin{cases} \bar{u}_s = r_s \bar{i}_s + x'_s \frac{d\bar{i}_s}{dt} + j\alpha_k x'_s \bar{i}_s - \frac{k_r}{T_r} \bar{\psi}_r + jk_r p\psi \bar{\psi}_r \\ 0 = -k_r r_r \bar{i}_s + \frac{1}{T_r} \bar{\psi}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} + j(\alpha_k - p\psi) \bar{\psi}_r \\ m = k_r \text{Mod}(\bar{\psi}_r \times \bar{i}_s) \\ \bar{T}_m \frac{d\psi}{dt} = m - m_H \end{cases} \quad (3.25)$$

де: x'_s, k_r, T_r - безрозмірні коефіцієнти:

При розгляді асинхронної машини з короткозамкненим ротором у системі координат (α, β) , пов'язаної з нерухомим статором, рівняння (3.25) приймають вид:

$$\begin{cases} \bar{u}_{s\alpha} = r_s \bar{i}_{s\alpha} + x'_s \frac{d\bar{i}_{s\alpha}}{dt} - \frac{k_r}{T_r} \bar{\psi}_{r\alpha} - k_r p\psi \bar{\psi}_{r\beta} \\ \bar{u}_{s\beta} = r_s \bar{i}_{s\beta} + x'_s \frac{d\bar{i}_{s\beta}}{dt} - \frac{k_r}{T_r} \bar{\psi}_{r\beta} + k_r p\psi \bar{\psi}_{r\alpha} \\ 0 = -k_r r_r \bar{i}_{s\alpha} + \frac{1}{T_r} \bar{\psi}_{r\alpha} + \frac{d\bar{\psi}_{r\alpha}}{dt} + p\psi \bar{\psi}_{r\beta} \\ 0 = -k_r r_r \bar{i}_{s\beta} + \frac{1}{T_r} \bar{\psi}_{r\beta} + \frac{d\bar{\psi}_{r\beta}}{dt} - p\psi \bar{\psi}_{r\alpha} \\ m = k_r (\bar{\psi}_{r\alpha} \bar{i}_{s\beta} - \bar{\psi}_{r\beta} \bar{i}_{s\alpha}) \\ \bar{T}_m \frac{d\psi}{dt} = m - m_{назр} \end{cases} \quad (3.26)$$

де: $\bar{u}_{s\alpha}, \bar{i}_{s\alpha}, \bar{\psi}_{r\alpha}$ - відносні проекції векторів змінних стану на вісь α ;

$\bar{u}_{s\beta}, \bar{i}_{s\beta}, \bar{\psi}_{r\beta}$ - відносні проекції векторів змінних стану на вісь β .

Система рівнянь (3.26) в операторній формі прийме вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{u}_{sa} = r(1 + \bar{T}_s s) i_{sa} - \frac{k_r}{T_r} \psi_{ra} - k_r p \psi_{r\beta} \\ \bar{u}_{s\beta} = r(1 + \bar{T}_s s) i_{s\beta} - \frac{k_r}{T_r} \psi_{r\beta} + k_r p \psi_{ra} \\ 0 = -k_r r_r i_{s\alpha} + \frac{1}{T_r} (1 + \bar{T}_r s) \psi_{ra} + \rho \psi_{r\beta} \\ 0 = -k_r r_r i_{s\beta} + \frac{1}{T_r} (1 + \bar{T}_r s) \psi_{ra} - \rho \psi_{r\beta} \\ m = k_r (\psi_{ra} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{s\alpha}) \\ \bar{T}_m s \psi = m - m_{напр} \end{array} \right. \quad (3.27)$$

де: $s = \frac{d}{dt}$ – оператор диференціювання;

r і \bar{T}_s – безрозмірні коефіцієнти:

Математична модель АД з короткозамкненим ротором у нерухомій системі координат, складена на підставі рівнянь (3.26), показана на рис.3.1.

Для дослідження моделі будемо використати пакет Simulink, повністю інтегрований із програмою MATLAB. Модель двигуна, побудована з використанням даної програми, має вигляд, представлений на рис. 3.2.

На вхід моделі подається відносна синусоїдальна напруга статора (а точніше, проекції його просторового вектора на осі α й β) з амплітудою й частотою, рівними 1, тобто рівними базовим значенням напруги й частоти. На виході осцилографи вимірюють відносні значення електромагнітного моменту, швидкості, струму $i_{s\beta}$ й потокозчеплення $\psi_{r\beta}$. Результати вимірів моменту й швидкості представлені на рис. 3.3., струму й потокозчеплення - на рис. 3.4.

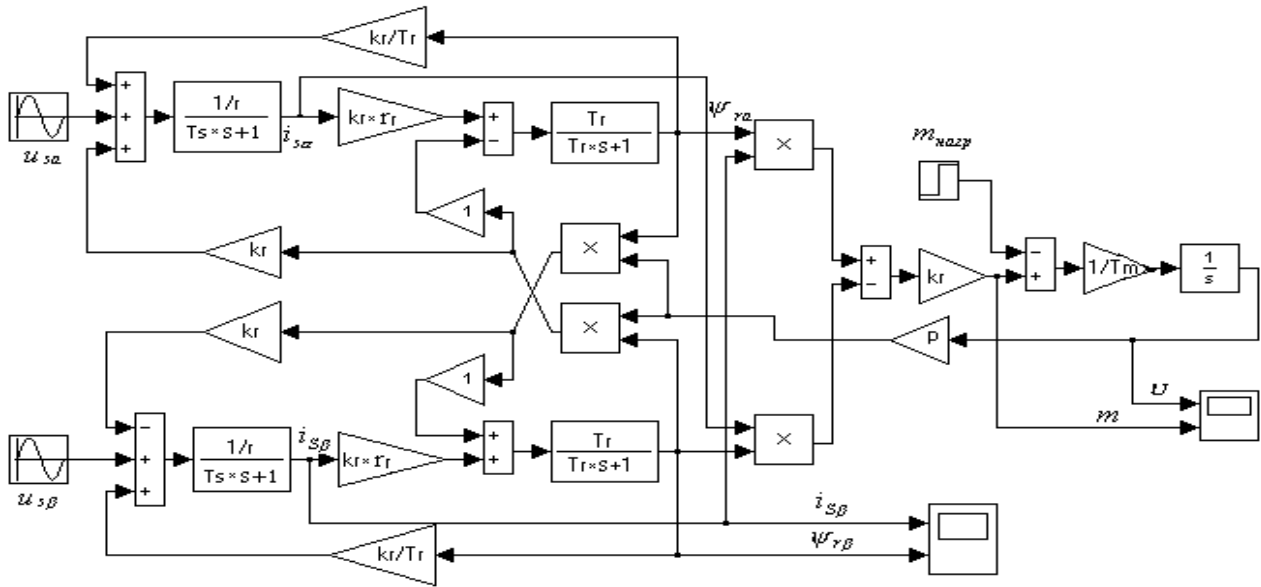


Рисунок 3.1 - Модель АД з короткозамкненим ротором у нерухомій системі координат

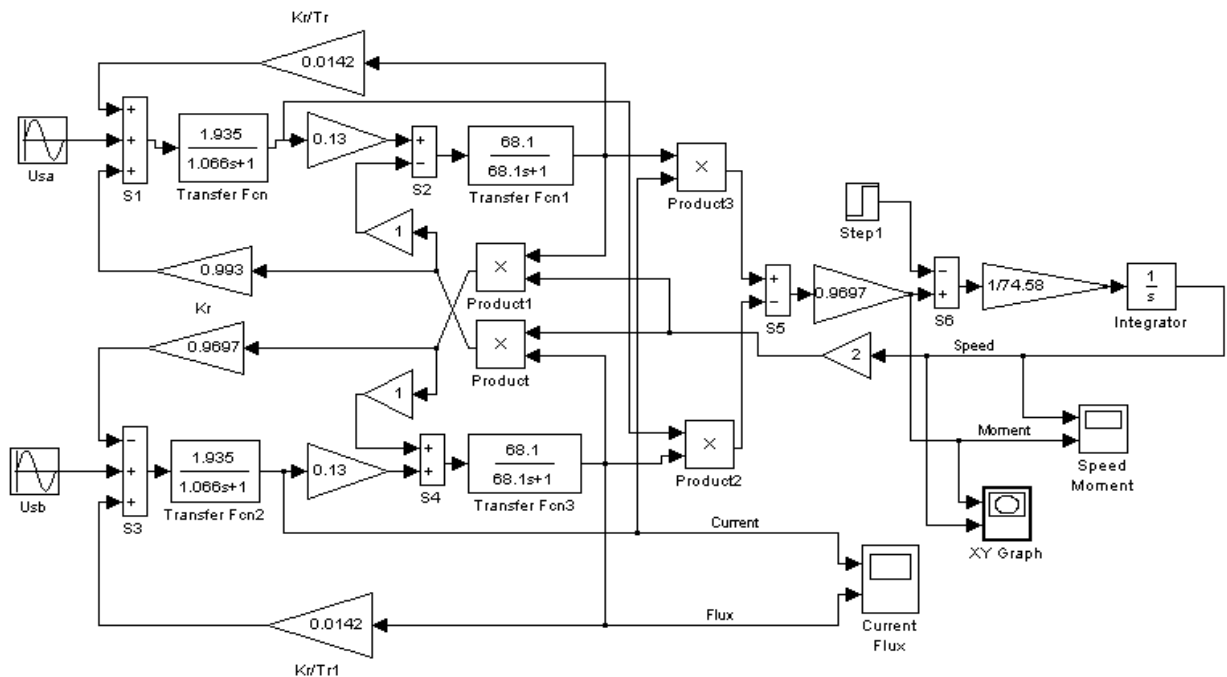


Рисунок 3.2 - Модель АД з короткозамкненим ротором у нерухомій системі координат в MATLAB (пакет Simulink)

Результати моделювання показують, що при прямому пуску під навантаженням спочатку спостерігаються значні коливання моменту й

струму. По закінченню перехідного процесу швидкість досягає свого робочого значення, момент спадає до сталого значення, розрахованого по (2.146), а струм статора й потокозчеплення ротора продовжують коливатися, але вже з постійною амплітудою.

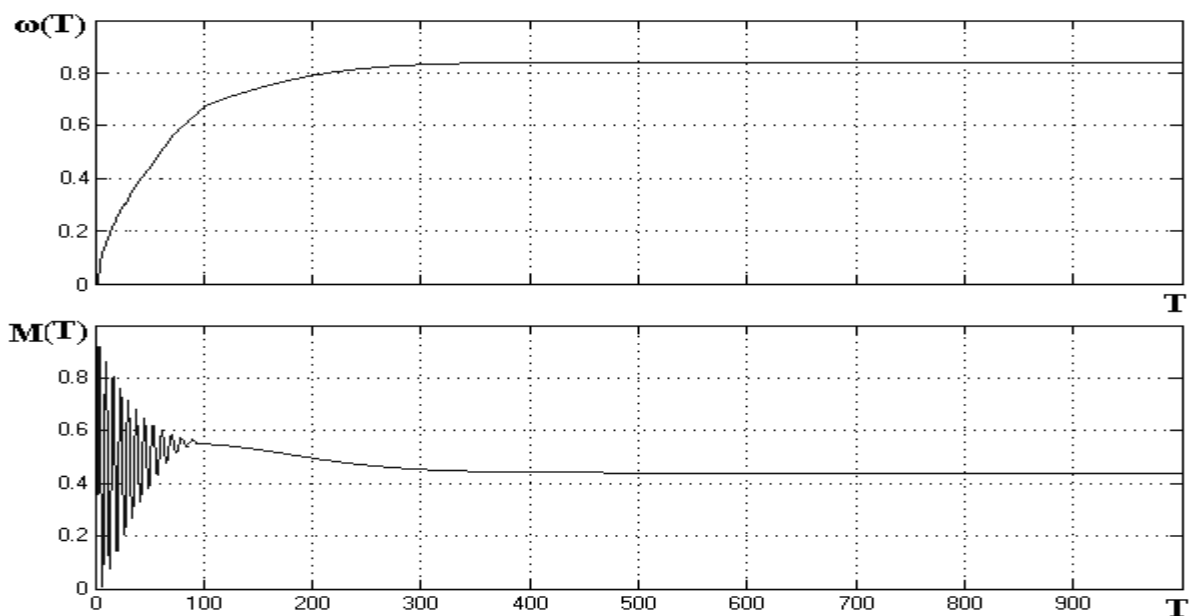


Рисунок 3.3 - Графіки зміни швидкості й моменту в часі

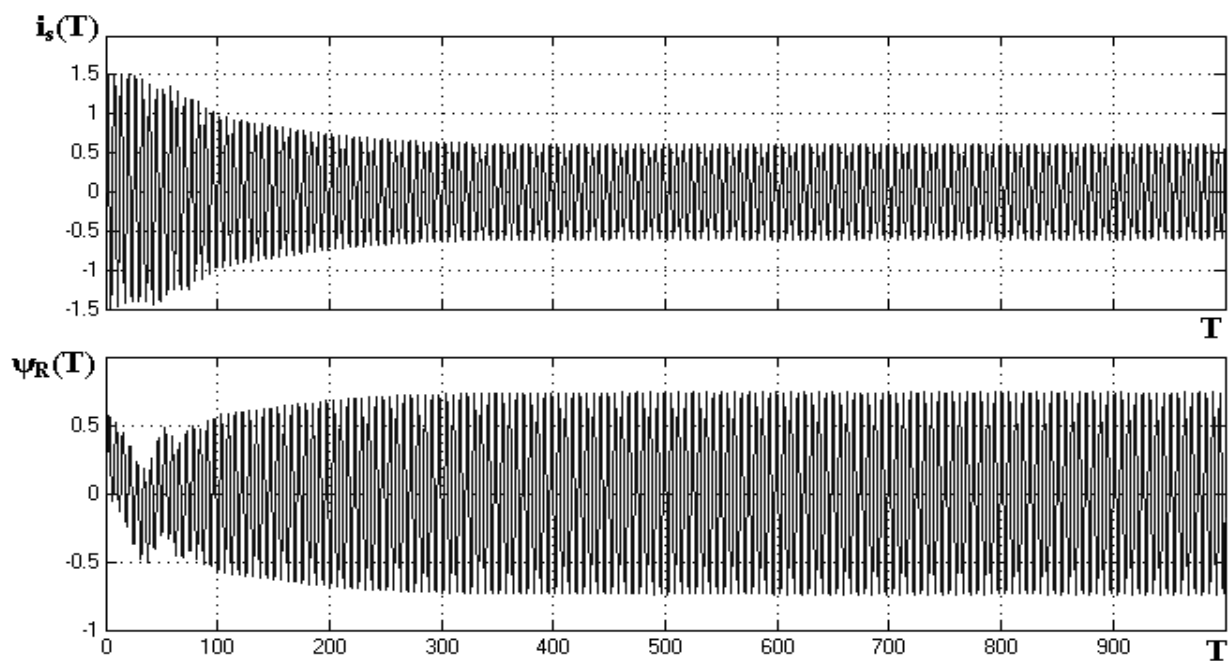


Рисунок 3.4 - Графіки зміни струму статора й потокозчеплення ротора в часі

Динамічна механічна характеристика змодельованого двигуна представлена на рис. 3.5.

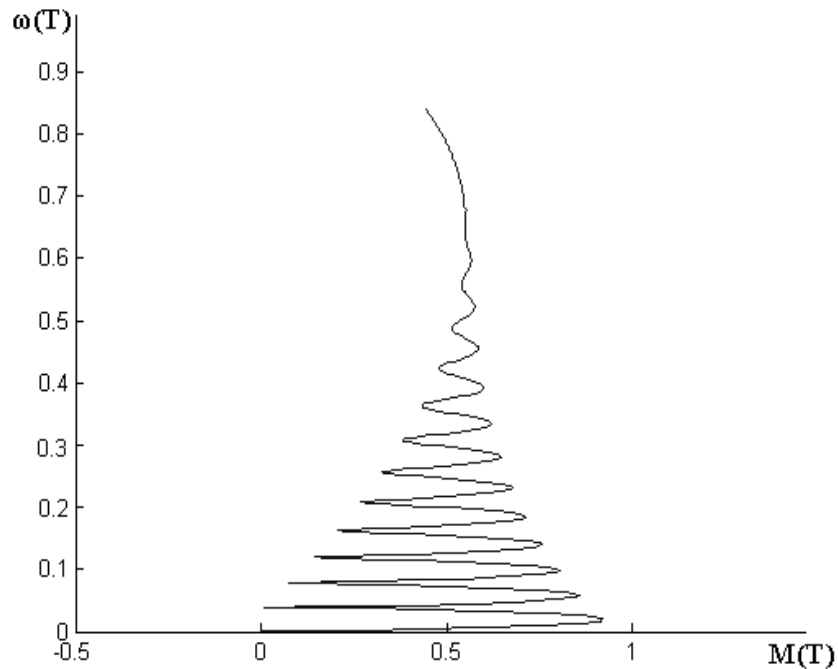


Рисунок 3.5 - Динамічна механічна характеристика двигуна

3.5 Математичне моделювання електропривода

3.5.1 Структурна схема АД з контурами регулювання змінних

вектора потокозчеплення ротора $\dot{\Psi}_r$, i_{sx} і контуром керування u_{sx}

Складемо структурну схему (рис.3.6) привода з контурами регулювання змінних: вектора потокозчеплення ротора $\dot{\Psi}_r$, i_{sx} і контуром керування u_{sx} , так, щоб перехресний зв'язок $x'_s \cdot \alpha_k \cdot i_{sy}$ був збурюванням, що не залежить від змінних розглянутого каналу.

У такому випадку, диференціальні рівняння, що описують канал керування модулем потокозчеплення ротора, будуть мати вигляд:

$$\frac{d|\dot{\Psi}_r|}{dt} = -\frac{r_R}{x_R} \cdot |\dot{\Psi}_r| + k_R \cdot r_R \cdot i_{sx} \quad (3.28)$$

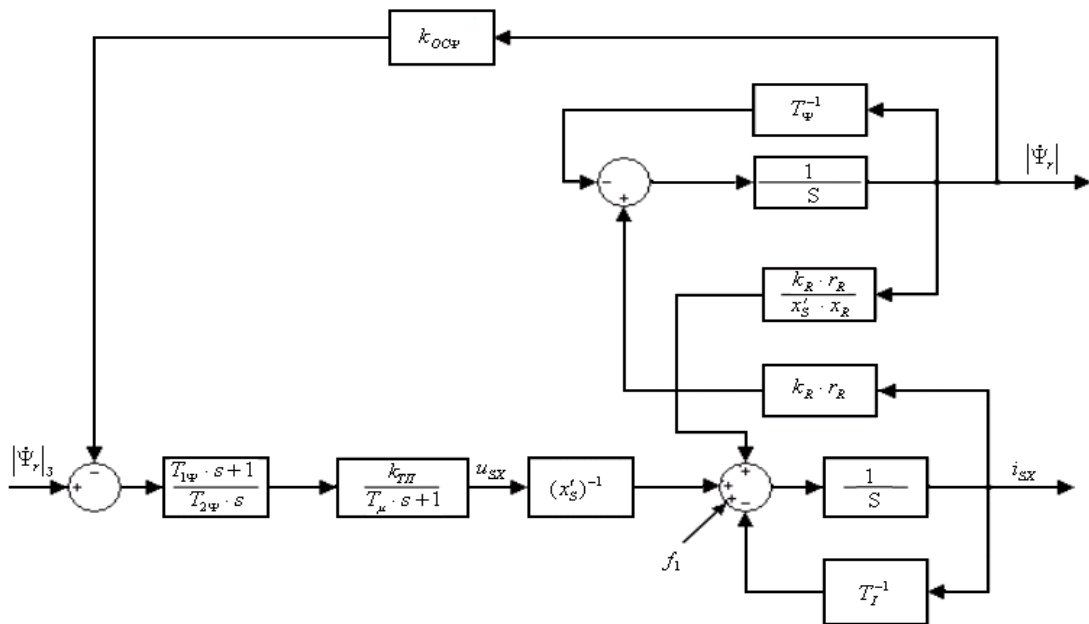


Рисунок 3.6 - Структурна схема АД з контурами регулювання змінних $|\psi_r|$, i_{sx} і контуром керування u_{sx}

$$\frac{di_{sx}}{dt} = -\frac{r_S \cdot k_R^2 \cdot r_R}{x'_S} \cdot i_{sx} + \frac{k_R \cdot r_R}{x'_S \cdot x_R} \cdot |\dot{\Psi}_r| + \frac{1}{x'_S} \cdot u_{sx} + f_1(s) \quad (3.29)$$

де: $f_1(s) = i_{sx} - x'_S \cdot \alpha_k \cdot i_{sy}$

Так як рівняння відносно $|\dot{\Psi}_r|$ й i_{sx} лінійні, то можна застосувати перетворення Лапласа.

Характеристичне рівняння буде мати вигляд:

$$A(s) = \frac{r_S \cdot r_R}{\sigma \cdot x_S \cdot x_R} \cdot \left[\sigma \cdot \frac{x_S \cdot x_R}{r_S \cdot r_R} \cdot s^2 + \left(\frac{x_S}{r_S} + \frac{x_R}{r_R} \right) \cdot s + 1 \right] \quad (3.30)$$

де: $\sigma = 1 - k_s \cdot k_R$, $k_s = \frac{x_m}{x_s}$.

$$A(s) = p^2 + 0,9527 \cdot p + 0,0104$$

Це рівняння має два корені: $S_1 = -0,9417$, $S_2 = -0,011$.

Отже, для контуру керування складової струму статора $i_{SX}(s)$ в знаменнику передавальної функції є один істотний корінь, рівний з $\frac{r_R}{x_R}$, а сама передавальна функція має вигляд:

$$i_{SX}(s) = \frac{\left(s + \frac{r_R}{x_R}\right)}{A(s)} \cdot u_{SX}(s); \quad (3.31)$$

Передавальна функція для модуля потокозчеплення ротора відносно складової $i_{SX}(s)$:

$$\left|\dot{\Psi}_r\right|(s) = \frac{k_R \cdot r_R}{s + \frac{r_R}{x_R}} \cdot i_{SX}(s); \quad (3.32)$$

або при вхідному керуючому сигналі $u_{SX}(s)$:

$$\left|\dot{\Psi}_r\right|(s) = \frac{k_R \cdot r_R}{A(s)} \cdot u_{SX}(s); \quad (3.33)$$

На підставі отриманого співвідношення й, тому що $s_1 \ll s_2$, можна зробити висновок, що канал керування модулем потокозчеплення ротора досить виконати одноконтурним. При цьому вплив каналу керування кутовою швидкістю в модулі потокозчеплення ротора буде:

$$\delta \cdot \left|\dot{\Psi}_r\right|(s) = \frac{k_R \cdot r_R}{A(s)} \cdot f_1(s); \quad (3.34)$$

При замиканні контуру керування модулем потокозчеплення ротора за допомогою Пі-регулятора з налаштуваннями:

$$W_P(s) = \frac{T_{1\Psi} \cdot s + 1}{T_{2\Psi} \cdot s}; \quad (3.35)$$

де:

$$T_{1\Psi} = \left|s_2^{-1}\right|; \quad (3.36)$$

$$T_{1\Psi} = \left| \frac{1}{-0,011} \right| = 90,91;$$

$$T_{2\Psi} = 2 \cdot T_{\mu\sigma} \cdot \frac{x_m}{r_s}; \quad (3.37)$$

$$T_{2\Psi} = 2 \cdot 0,314 \cdot \frac{0,8962}{0,0389} = 7,458.$$

3.5.2 Моделювання контуру регулювання струму статора i_{sx}

Структурна схема розглянутого контуру регулювання представлена на рис. 3.7.

На рис. 3.7 показаний вплив збурення, що збурює $f_1(s)$, від перехресного зв'язку. При наявності розв'язки каналів цей вплив у процесі синтезу регуляторів можна не враховувати.

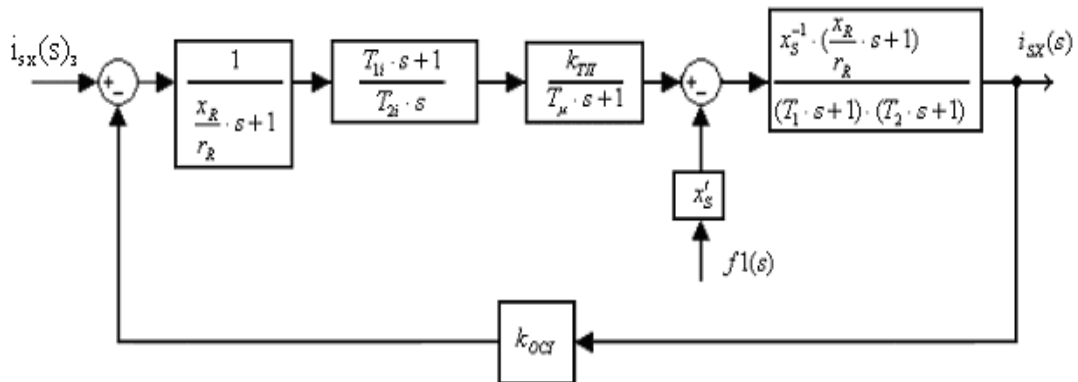


Рисунок 3.7 - Контур регулювання складового струму статора i_{sx}

Для даної схеми в знаменнику передавальної функції є один істотний корінь, рівний $\frac{r_R}{x_R}$, а сама передавальна функція має вигляд:

$$i_{sx}(s) = \frac{\left(s + \frac{r_R}{x_R} \right)}{\frac{x'_S}{A(s)}} \cdot u_{sx}(s); \quad (3.38)$$

Контур керування складовою струму статора i_{sx} може містити Пі-регулятор з фільтром, його рівняння за керуючим сигналом $i_{sx3}(s)$:

$$i_{sx}(s) = \frac{k_{O.C.I}^{-1}}{2 \cdot T_{\mu\sigma}^2 \cdot s^2 + 2 \cdot T_{\mu\sigma} \cdot s + 1} \cdot i_{sx3}(s); \quad (3.39)$$

де:

$$T_{2i} = \frac{2 \cdot T_{\mu\sigma} \cdot k_{T.II} \cdot k_{O.C.I}}{r_s} \quad (3.40)$$

Рівняння Пі-регулятора з фільтром по збурюванню від перехресного зв'язку $f_1(s)$:

$$\delta i_{sx}(s) = \frac{\frac{2 \cdot T_{\mu\sigma} \cdot x'_s}{r_s} \cdot \left(\frac{x_r}{r_R} \cdot s + 1 \right) \cdot (T_\mu \cdot s + 1) \cdot s}{\left(2 \cdot T_{\mu\sigma} \cdot T_2 \cdot T_\mu \cdot s^3 + 2 \cdot T_{\mu\sigma}^2 \cdot s^2 + 2 \cdot T_{\mu\sigma} \cdot s + 1 \right) \cdot (T_1 \cdot s + 1)} \cdot f_1(s). \quad (3.41)$$

При визначенні передавальної функції за керуючим сигналом поліноми, що відповідають малим постійним часу T_μ й T_2 були замінені поліномом першого ступеня з постійною часу, рівною $T_{\mu\sigma}$, а при обчисленні передавальної функції за збуренням враховувалися обидва поліноми.

У випадку використання прямої компенсації, збурювання від перехресного зв'язку:

$$\delta i_{sx}(s) = \left[2 \cdot T_{\mu\sigma} \cdot \frac{x'_s}{r_s} \cdot \left(\frac{x_r}{r_R} \cdot s + 1 \right) \cdot T_\mu \cdot s^2 \cdot f_1(s) \right] \times \quad (3.42)$$

$$\times \left[\left(2 \cdot T_{\mu\sigma} \cdot T_2 \cdot T_\mu \cdot s^3 + 2 \cdot T_{\mu\sigma}^2 \cdot s^2 + 2 \cdot T_{\mu\sigma} \cdot s + 1 \right) \cdot (T_1 \cdot s + 1) \right]^{-1};$$

$$T_{2i} = 2 \cdot \frac{T_{\mu\sigma}}{r_s}; \quad (3.43)$$

$$T_{2i} = 2 \cdot \frac{0314}{0,0389} = 16,14;$$

$$T_{li} = 0,5 \cdot \left(\frac{x_S}{r_S} + \frac{x_R}{r_R} \right); \quad (3.44)$$

$$T_{li} = 0,5 \cdot \left(\frac{0,9242}{0,0389} + \frac{0,9242}{0,0136} \right) = 45.923$$

$$T_1 = T_{1\psi} = 90,91;$$

$$T_2 = T_{\mu} = 0,157.$$

Реалізуємо схему в MATHLAB і побудуємо графік перехідного процесу. Структурна схема контуру регулювання складовій струму i_{sx} виглядає в такий спосіб (рис.3.7).

Результати моделювання можна оцінити за допомогою осцилографа (рис. 3.8).

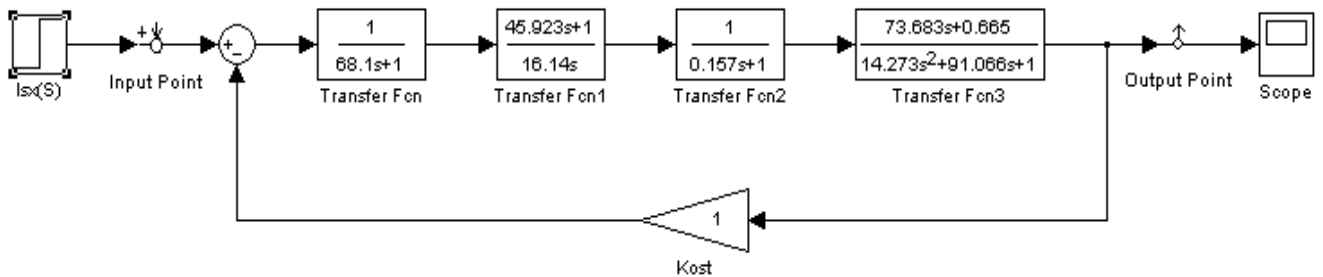


Рисунок 3.8 - Контур регулювання складової струму i_{sx}

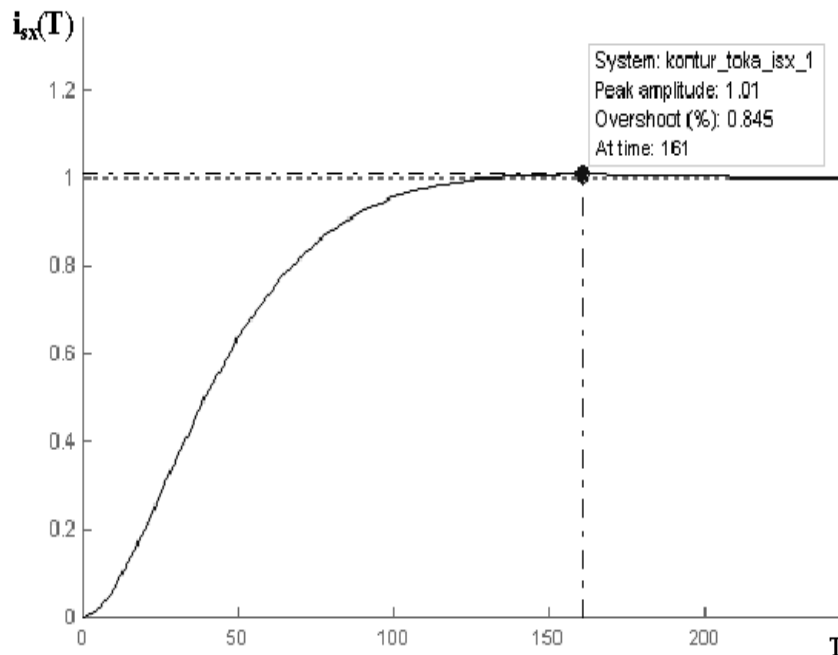


Рисунок 3.9 - Перехідний процес складового струму статора i_{sx}

Форма кривої на графіку дозволяє судити про правильність розрахунку коефіцієнтів регуляторів системи. По малюнку видно, що відносний час перехідного процесу для розглянутого контуру склало $T_{IIIix} = 215$. Абсолютний час перехідного процесу буде дорівнює:

$$t_{IIIix} = T_{IIIix} \cdot t_b ; \quad (3.45)$$

$$t_{IIIix} = 215 \cdot 0,00318 = 0,683 \text{ с.}$$

Проведемо аналіз усталеної роботи привода за допомогою електронного прикладного пакета MATLAB.

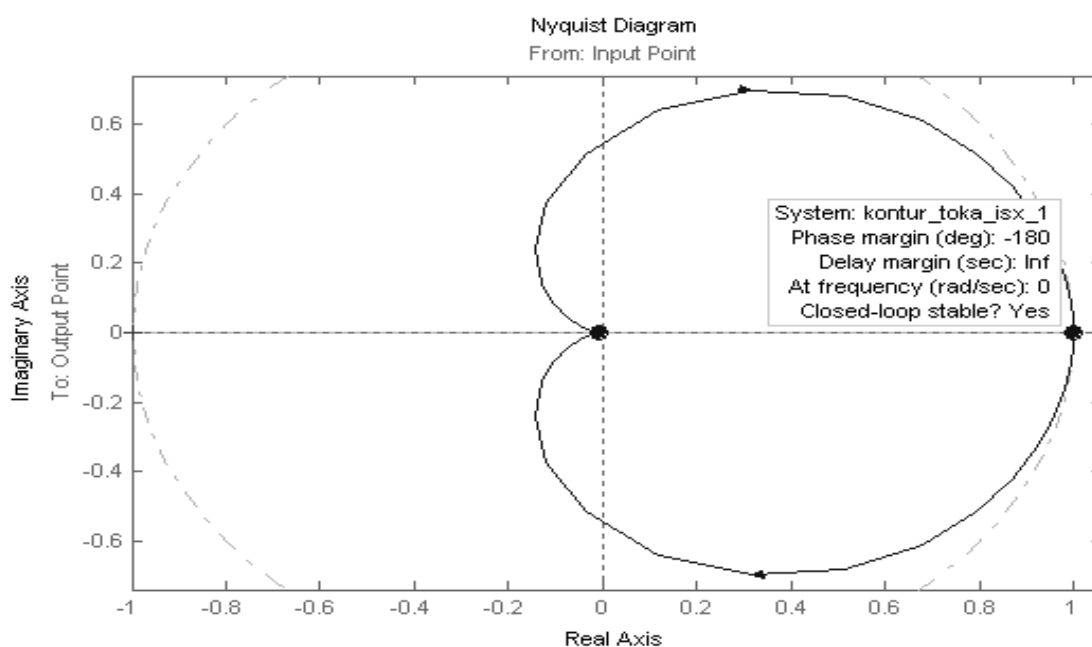


Рисунок 3.10 - Годограф Найквіста

На рис. 3.10 і рис. 3.11 показані частотні характеристики - годограф Найквіста й діаграми Боде. Частотні характеристики задовольняють вимоги стійкості системи.

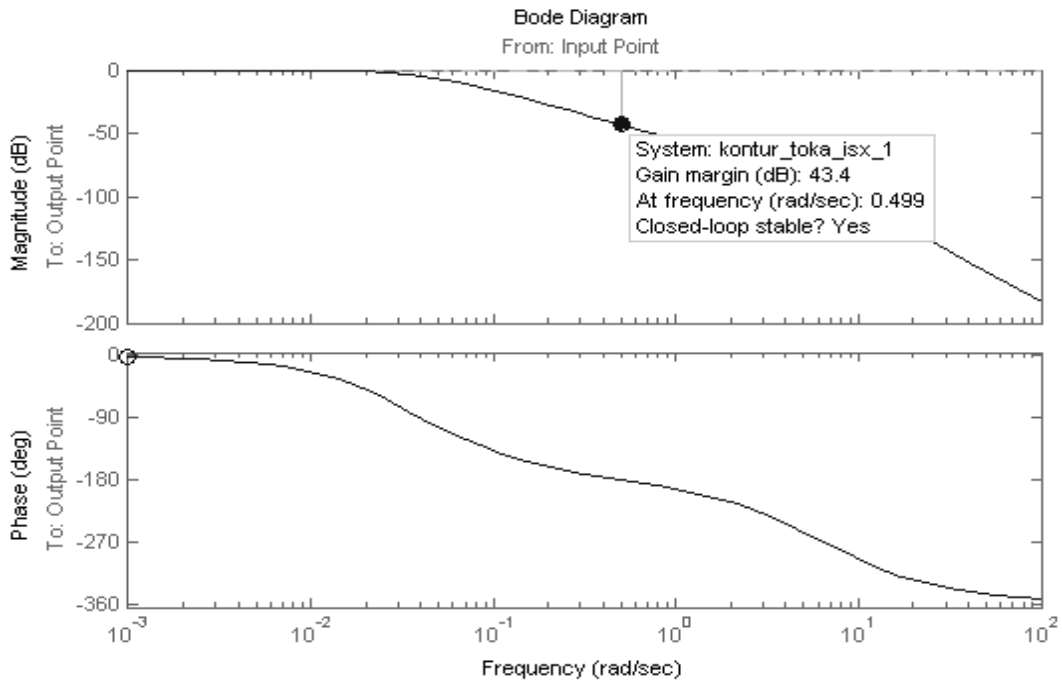


Рисунок 3.11 - Діаграми Боде

3.5.3 Моделювання контуру керування модулем потокозчеплення ротора Ψ_R

Складемо структурну схему зовнішнього контуру керування модулем потокозчеплення ротора Ψ_R (рис.3.12).

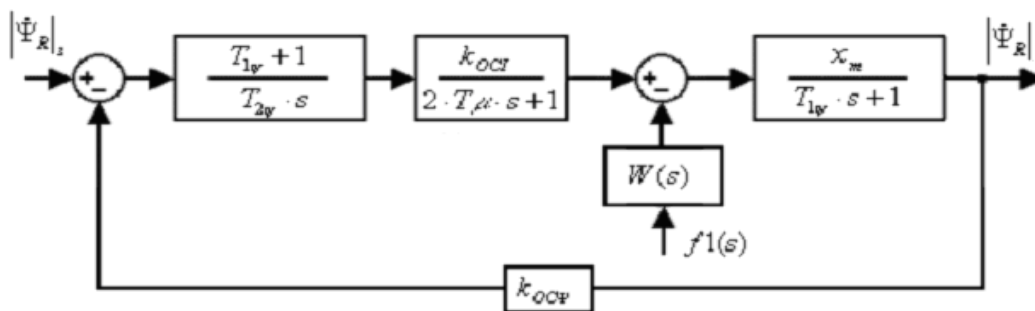


Рисунок 3.12 - Зовнішній контур керування модулем потокозчеплення ротора

Передавальна функція для модуля потокозчеплення ротора відносно складової $i_{sx}(s)$:

$$\left| \dot{\Psi}_r \right| (s) = \frac{k_R \cdot r_R}{s + \frac{r_R}{x_R}} \cdot i_{sx}(s); \quad (3.46)$$

або при вхідному керуючому сигналі $u_{sx}(s)$:

$$\left| \dot{\Psi}_r \right| (s) = \frac{k_R \cdot r_R}{A(s)} \cdot u_{sx}(s); \quad (3.47)$$

На підставі отриманого співвідношення й за умови $s_1 \ll s_2$, можна зробити висновок, що канал керування модулем потокозчеплення ротора досить виконати одноконтурним. При цьому вплив каналу керування кутовою швидкістю в модулі потокозчеплення ротора буде:

$$\delta \left| \dot{\Psi}_r \right| (s) = \frac{k_R \cdot r_R}{A(s)} \cdot f_1(s); \quad (3.48)$$

При замиканні контуру керування модулем потокозчеплення ротора за допомогою Пі-регулятора з передавальною функцією:

$$W_P(s) = \frac{T_{1\Psi} \cdot s + 1}{T_{2\Psi} \cdot s}; \quad (3.49)$$

$$T_{1\Psi} = s_1^{-1}; \quad (3.50)$$

$$T_{2\Psi} = 2 \cdot T_{\mu\sigma} \cdot \frac{k_{T.П.} \cdot x_m \cdot k_{O.C.\Psi}}{r_s}; \quad (3.51)$$

Передавальна функція для модуля потокозчеплення ротора за керуючим сигналом:

$$\left| \dot{\Psi}_r \right| (s) = \frac{k_{O.C.\Psi}^{-1}}{2 \cdot T_{\mu\sigma}^2 \cdot s^2 + 2 \cdot T_{\mu\sigma} \cdot s + 1} \cdot \left| \dot{\Psi}_r \right|_3 (s); \quad (3.52)$$

Збурювання від перехресного зв'язку:

$$\delta \left| \dot{\Psi}_r \right| (s) = \frac{2 \cdot T_{\mu\sigma} \cdot \sigma \cdot x_m \cdot x_s \cdot s \cdot (T_{\mu} \cdot s + 1)}{r_s \cdot (2 \cdot T_{\mu\sigma}^2 \cdot s^2 + 2 \cdot T_{\mu\sigma} \cdot s + 1) \cdot (T_2 \cdot s + 1)} \cdot f_1(s); \quad (3.53)$$

У випадку використання в системі прямої компенсації вираз для збурювання від перехресного зв'язку буде:

$$\delta \left| \dot{\Psi}_r \right| (s) = \frac{2 \cdot T_{\mu\sigma} \cdot T_{\mu} \cdot \sigma \cdot x_m \cdot x_s \cdot s^2}{r_s} \cdot f_1(s); \quad (3.54)$$

Рівняння контуру керування $\left| \dot{\Psi}_r \right| (s)$ за керуючим сигналом:

$$\left| \dot{\Psi}_r \right| (s) = \frac{k_{O.C.\Psi}^{-1}}{8 \cdot T_{\mu\sigma}^2 \cdot s^2 + 4 \cdot T_{\mu\sigma} \cdot s + 1} \cdot \left| \dot{\Psi}_r \right|_3 (s); \quad (3.55)$$

Рівняння контуру керування $\left| \dot{\Psi}_r \right| (s)$ за збуренням без прямої компенсації:

$$\delta \left| \dot{\Psi}_r \right| (s) = \frac{8 \cdot T_{\mu\sigma}^2 \cdot x_m \cdot \frac{x'_s}{r_s} \cdot (T_{\mu} \cdot s + 1) \cdot s^2}{(8 \cdot T_{\mu\sigma}^3 \cdot s^3 + 8 \cdot T_{\mu\sigma}^2 \cdot s^2 + 4 \cdot T_{\mu\sigma} \cdot s + 1) \cdot (T_1 \cdot s + 1)} \cdot f_1(s); \quad (3.56)$$

Так як електромагнітний момент асинхронної машини для змінних $\left| \dot{\Psi}_r \right|$ і i_{sy} в системі координат, пов'язаної з вектором потокозчеплення ротора, дорівнює:

$$M_{em} = \frac{3 \cdot p}{2} \cdot k_R \left| \dot{\Psi}_r \right| \cdot i_{sy}; \quad (3.57)$$

то при $\left| \dot{\Psi}_r \right| = const$ електромагнітний момент M_{em} пропорційний i_{sy} і керування електромагнітним моментом зводиться до управління складової струму i_{sy} . Диференціальне рівняння для струму i_{sy} має вигляд:

$$\frac{di_{sy}}{dt} = -\frac{r_s + k_R^2 \cdot r_R}{x'_s} \cdot i_{sy} + \frac{1}{x'_s} \cdot \left(u_{sx} - k_R \cdot p \cdot \nu \cdot \left| \dot{\Psi}_r \right| - \alpha_k \cdot x'_s \cdot i_{sx} \right); \quad (3.58)$$

Коефіцієнти можна розрахувати аналогічно коефіцієнтам попередніх контурів.

Реалізуємо схему в MATLAB і побудуємо графік перехідного процесу (рис.3.13).

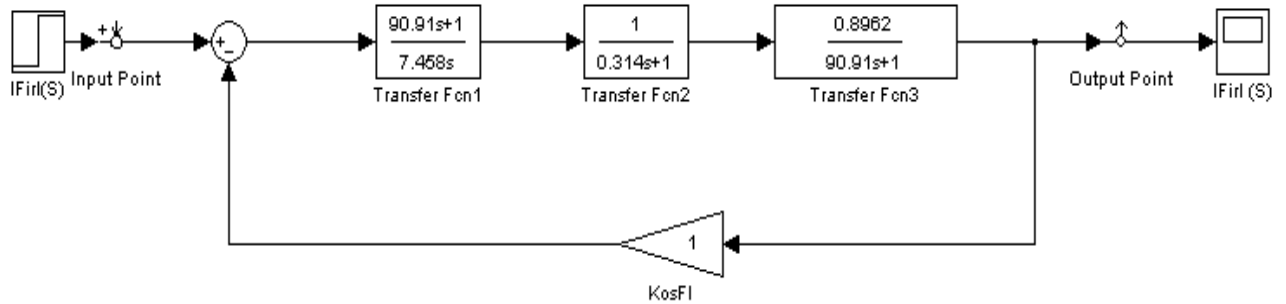


Рисунок 3.13 - Зовнішній контур керування модулем потокозчеплення ротора

Результати перехідного процесу можна подивитися за допомогою електронного осцилографа (рис. 3.14).

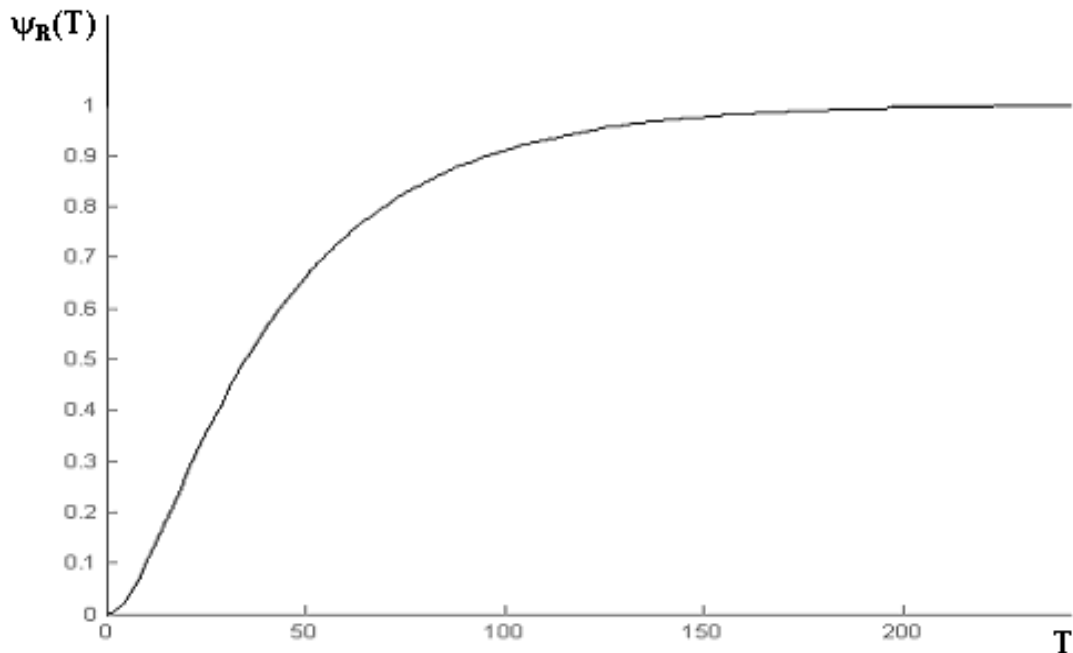


Рисунок 3.14 - Перехідний процес потокозчеплення ротора

Форма кривої на графіку (рис. 3.14) дозволяє судити про правильність розрахунку коефіцієнтів регулятора системи. По малюнку видно, що відносний час перехідного процесу для розглянутого контуру склало $T_{III\psi R} = 230$. Абсолютний час перехідного процесу буде дорівнює:

$$t_{III\psi R} = T_{III\psi R} \cdot t_b, \quad (3.59)$$

$$t_{III\psi R} = 230 \cdot 0,00318 = 0,731 \text{ с.}$$

Проведемо аналіз усталеної роботи привода за допомогою методу Найквіста. Годограф за критерієм Найквіста виведемо за допомогою електронного прикладного пакета MATLAB.

На рис. 3.15 і рис. 3.16 показані частотні характеристики - годограф Найквіста й діаграми Бode. Частотні характеристики задовольняють вимогам стійкості системи.

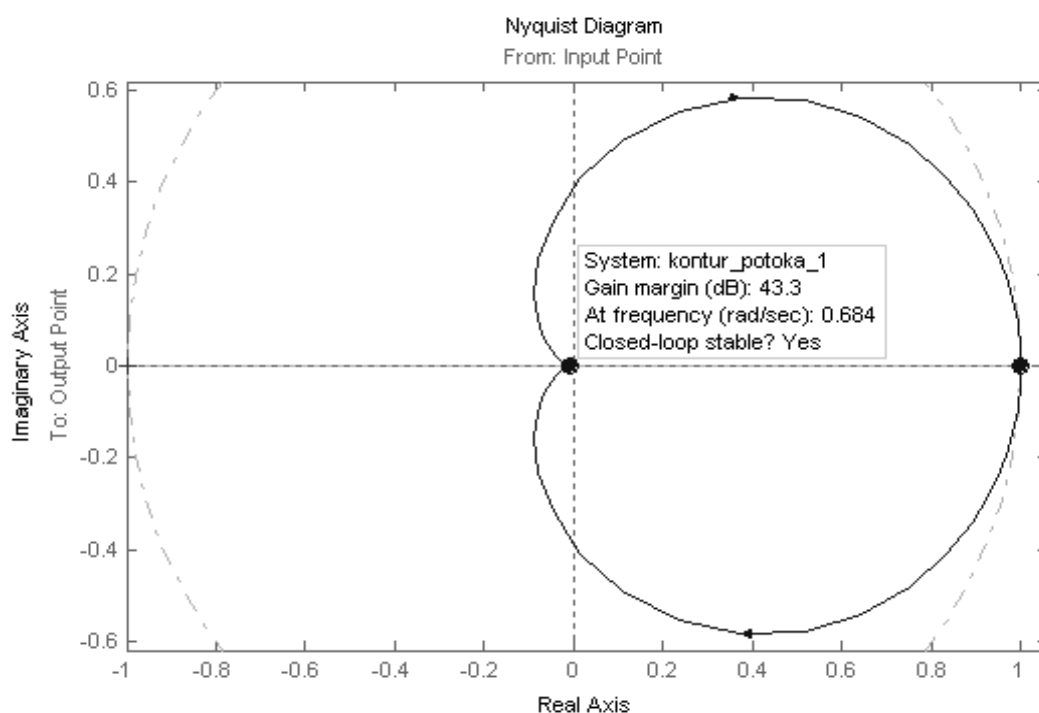


Рисунок 3.15 - Годограф Найквіста

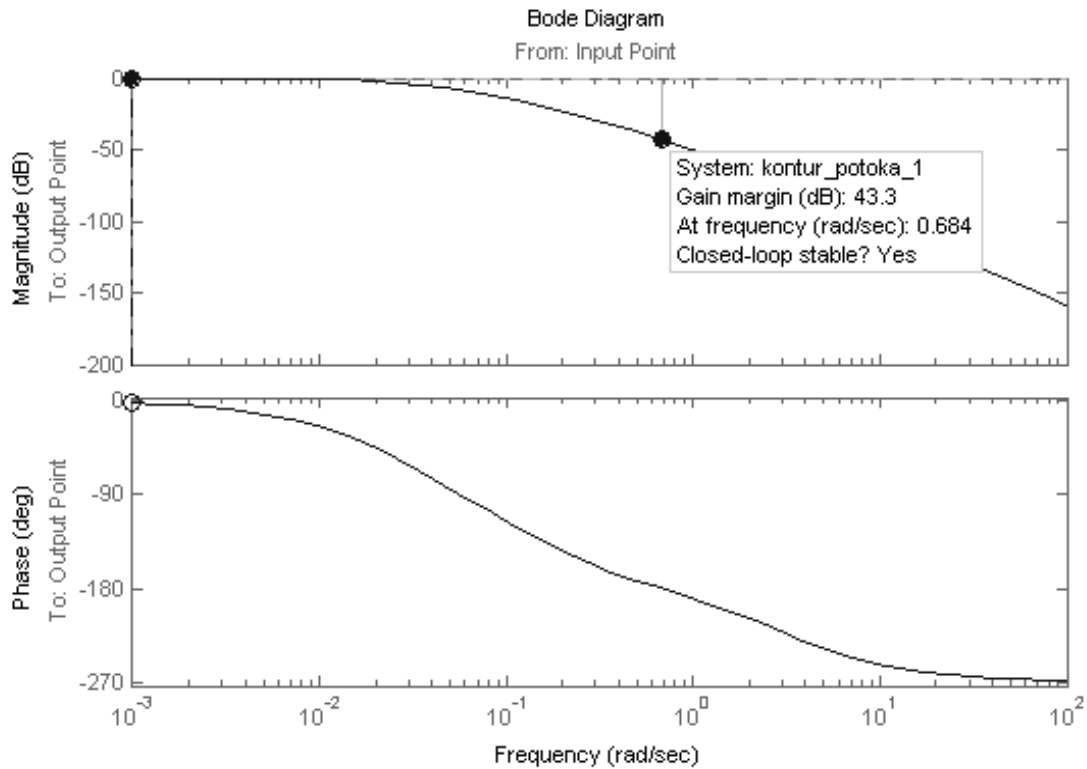


Рисунок 3.16 - Діаграми Боде

3.5.4 Моделювання контуру регулювання складової струму статора

Складемо структурну схему контуру складовій i_{sy} з Пі-регулятором в основному каналі й додатково введемо контур з еталонною моделлю (рис. 3.17).

Так як електрорушійна сила частоти обертання $E_{\omega} = k_R \cdot p \cdot \psi_r$ становить приблизно $0,9 \cdot u_{sy}$, доцільно використати пряму компенсацію E_{ω} .

Постійні часу Пі-регулятора:

$$T_i = \frac{x'_s}{r_s + k_R^2 \cdot r_R}, \quad (3.60)$$

$$T_i = \frac{0,0551}{0,0389 + 0,969^2 \cdot 0,0136} = 1,066$$

$$T_{Hi} = 2 \cdot T_{\mu\zeta} \cdot (r_s + k_R^2 \cdot r_R) \cdot k_{T.П} \cdot k_{O.C.T.} \quad (3.61)$$

$$T_{ii} = 2 \cdot 0,314 \cdot (0,0389 + 0,9697^2 \cdot 0,0136) \cdot 1 \cdot 1 = 0,0325$$

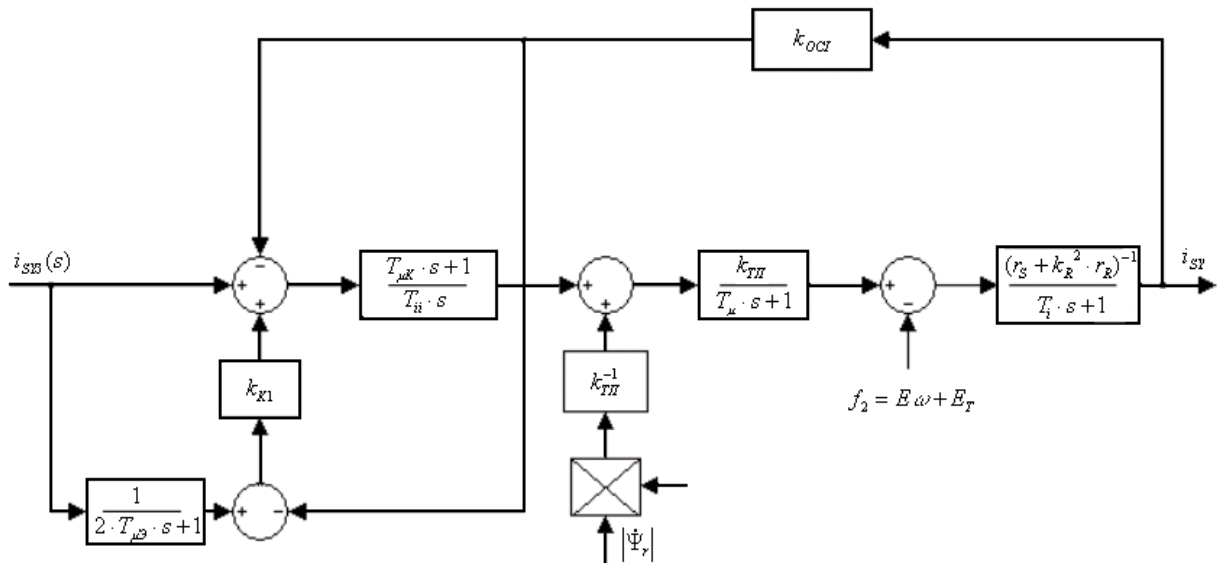


Рисунок 3.17 - Контур складової i_{sy} з Пі-регулятором в основному каналі й контуром з еталонною моделлю

При цих налаштуваннях вихідна складова струму за керуючим ВХОДОМ:

$$i_{sy}(s) = \frac{\left(\frac{2 \cdot T_{\mu 3}}{k_{k1} + 1} \cdot s + 1 \right) \cdot k_{OCT}^{-1}}{\left(\frac{2 \cdot T_{\mu 3}^2}{k_{k1} + 1} \cdot s^2 + \frac{2 \cdot T_{\mu 3}}{k_{k1} + 1} \cdot s + 1 \right) \cdot (2 \cdot T_{\mu 3} \cdot s + 1)} \cdot i_{sy3}(s) \quad (3.62)$$

Вихідна складова струму за впливом, що обурює (E_ω, E_T)

$$\delta i_{sy}(s) = \left[\frac{2 \cdot T_{\mu 3}}{k_{k1} + 1} \cdot s \cdot (T_{\mu 3} \cdot s + 1) \cdot (r_s + k_R^2 \cdot r_R)^{-1} \cdot \left(\frac{T_\mu \cdot s}{T_\mu \cdot s + 1} \cdot E_\omega + E_T \right) \right] \times \left[\left(\frac{2 \cdot T_{\mu 3}^2}{k_{k1} + 1} \cdot s^2 + \frac{2 \cdot T_{\mu 3}}{k_{k1} + 1} \cdot s + 1 \right) (T_{\mu 3} \cdot s + 1) \right]^{-1} \quad (3.63)$$

де: $T_\mu = \sum T_i$; T_i - малі постійні часу.

Трансформаторна ЕРС E_T придушується слабкіше, ніж ЕРС обертання E_ω .

Реалізуємо схему в MATHLAB і побудуємо графік перехідного процесу (рис.3.18).

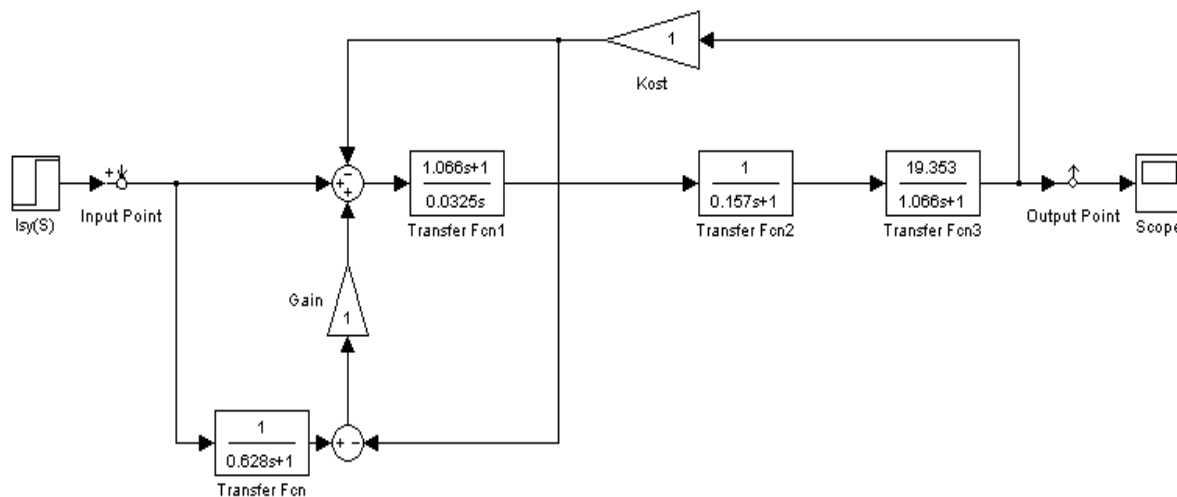


Рисунок 3.18 - Контур складової i_{sy} з Пі-регулятором в основному каналі й контуром з еталонною моделлю

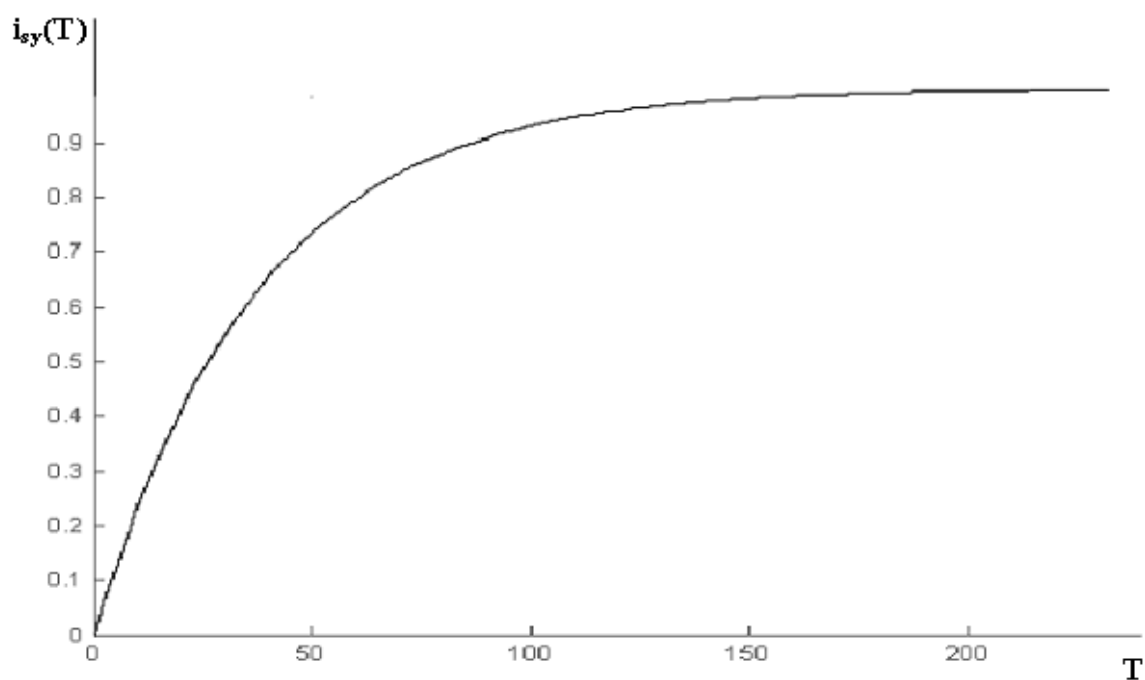


Рисунок 3.19 - Перехідний процес складової струму статора i_{sy}

Форма кривої на графіку (рис.3.19) дозволяє судити про правильність розрахунку коефіцієнтів регуляторів системи. По малюнку видно, що відносний час перехідного процесу для розглянутого контуру склало $T_{IIIiy} = 220$. Абсолютний час перехідного процесу буде дорівнює

$$t_{IIIiy} = T_{IIIiy} \cdot t_b \quad (3.64)$$

$$t_{IIIiy} = 220 \cdot 0,00318 = 0,7 \text{ с.}$$

Проведемо аналіз усталеної роботи привода за допомогою електронного прикладного пакета MATLAB.

На рис.3.20 і рис. 3.21 показані частотні характеристики - годограф Найквіста й діаграми Бode. Частотні характеристики задовольняють вимоги стійкості системи.

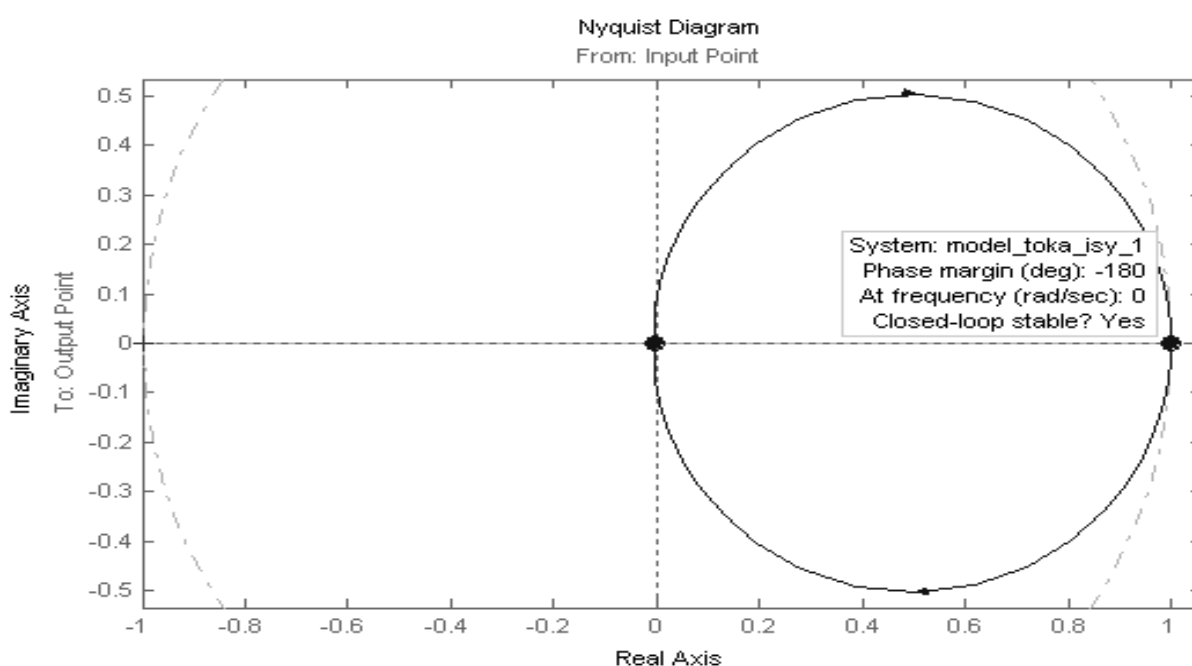


Рисунок 3.20 - Годограф Найквіста

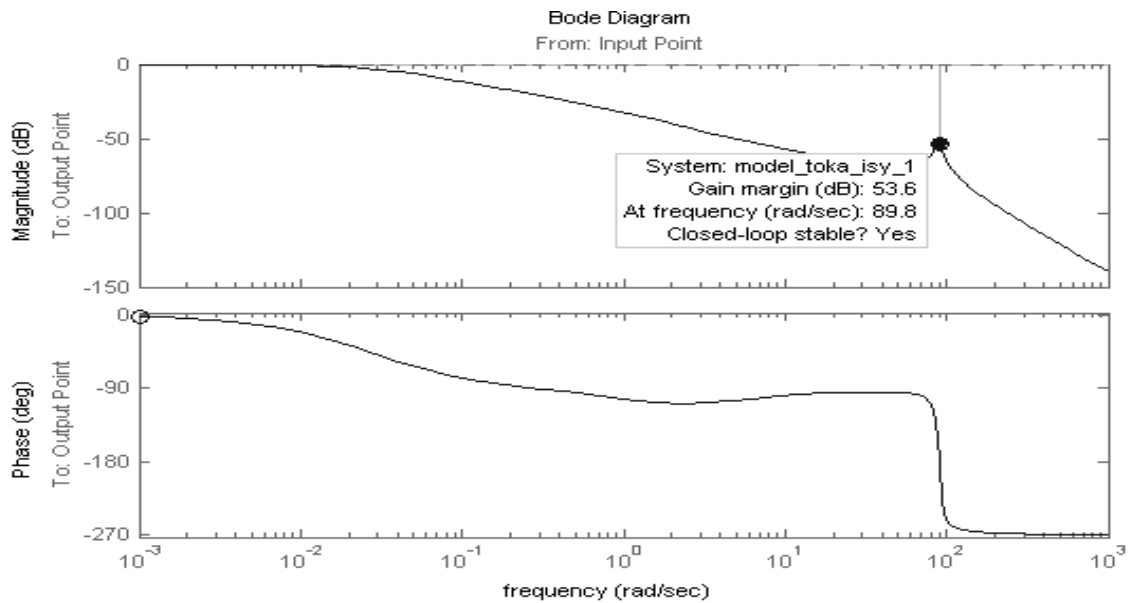


Рисунок 3.21 - Діаграми Боде

3.5.5. Моделювання контуру регулювання швидкості

При розгляді контуру регулювання ν передавальна функція його підлеглого контуру (контуру регулювання i_{sy}), оптимізованого по технічному оптимумі, може бути спрощена. Це можна зробити, апроксимуючи підлеглий контур ланкою першого порядку (помилка апроксимації несуттєва) з передавальною функцією:

$$W_{isy}(s) = \frac{K_{OCT}}{2 \cdot T_{\mu} \cdot s + 1}; \quad (3.65)$$

Диференціальне рівняння для ν по каналу керуючого сигналу $i_{syз}$ має вигляд:

$$\nu(s) = \frac{K_{OCT}}{2 \cdot T_{\mu} \cdot s + 1} \cdot \frac{3 \cdot p \cdot k_r}{2} \cdot \frac{1}{T_m \cdot s} \cdot i_{syз}(s); \quad (3.66)$$

Таким чином, об'єкт регулювання в розглянутому контурі має одну велику постійну часу, рівну T_m і одну малу постійну часу, рівну $2 \cdot T_{\mu}$.

У даному контурі використаємо Пі-регулятор з передавальною функцією:

$$W_{PC}(s) = \frac{T_{v1} \cdot s + 1}{T_{v2} \cdot s}; \quad (3.67)$$

де: T_{v1}, T_{v2} - відносні постійні часу регулятора.

Структурна схема контуру регулювання швидкості представлена на рис.3.22.

На схемі показаний вплив на підлеглий контур перешкоди $f_2(s)$ від перехресного зв'язку, а також вплив відносної електрорушійної сили частоти обертання, які при наявності розв'язків каналів можна не враховувати (даний контур є спрощеним, тому що не враховується вплив потокозчеплення ротора на формування швидкості; таке допущення можливо при стабільному модулі потокозчеплення ротора, рівному по величині одній його відносній одиниці.)

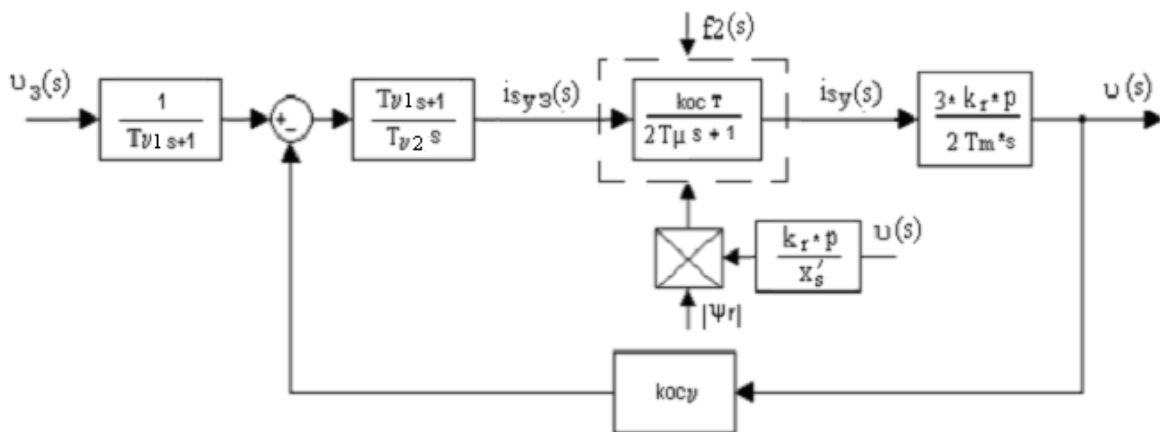


Рисунок 3.22 - Структурна схема контуру регулювання швидкості

У цій схемі K_{ocv} – відносний передавальний коефіцієнт зворотнього зв'язку по швидкості ($K_{ocv} = 1$).

Зробимо налаштування регулятора швидкості на симетричний оптимум. Розрахуємо постійні часу регулятора швидкості по формулах:

$$T_{v1} = 8T_{\mu\Omega} \cdot T_m \cdot k_{O.C.T}; \quad (3.68)$$

$$T_{v1} = 8 \cdot 0,314 \cdot 74,58 \cdot 1 = 18,733;$$

$$T_{v2} = \frac{32T_{\mu e}^2 \cdot k_{зз}}{T_m \cdot k_{O.C.T}}; \quad (3.69)$$

$$T_{v2} = \frac{32 \cdot 0,314^2 \cdot 1}{74,58 \cdot 1} = 0,423;$$

Підставляючи необхідні значення, одержуємо:

$$W_{PC}(s) = \frac{18,733s + 1}{0,423s};$$

Для компенсації перерегулювання будемо використовувати фільтр у каналі задання з передавальною функцією:

$$W_{\phi v}(s) = \frac{1}{T_{v1} \cdot s + 1}; \quad (3.70)$$

$$W_{\phi v}(s) = \frac{1}{18,423 \cdot s + 1}.$$

В Simulink модель розглянутого контуру має вигляд, представлений на рис. 3.23. (канали збурювань не враховуються).

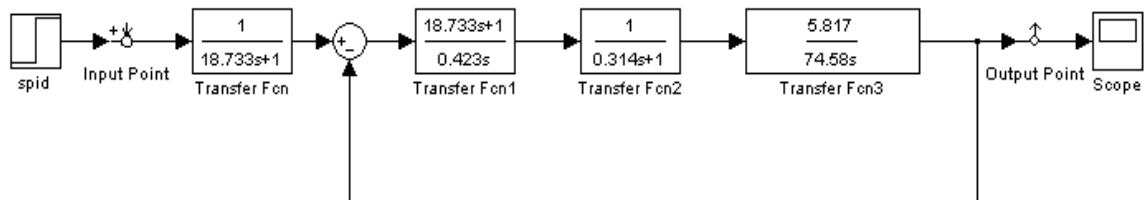


Рисунок 3.23 - Контур регулювання швидкості

Форма кривої на графіку (рис.2.40.) дозволяє судити про правильність розрахунку коефіцієнтів регулятора швидкості. По малюнку видно, що відносний час перехідного процесу для розглянутого контуру склав $T_{\text{Плix}} = 275$ Абсолютний час перехідного процесу буде дорівнює:

$$t_{\text{Плix}} = T_{\text{Плix}} \cdot t_b; \quad (3.71)$$

$$t_{\text{Плix}} = 275 \cdot 0,00318 = 0,875 \text{ с.}$$

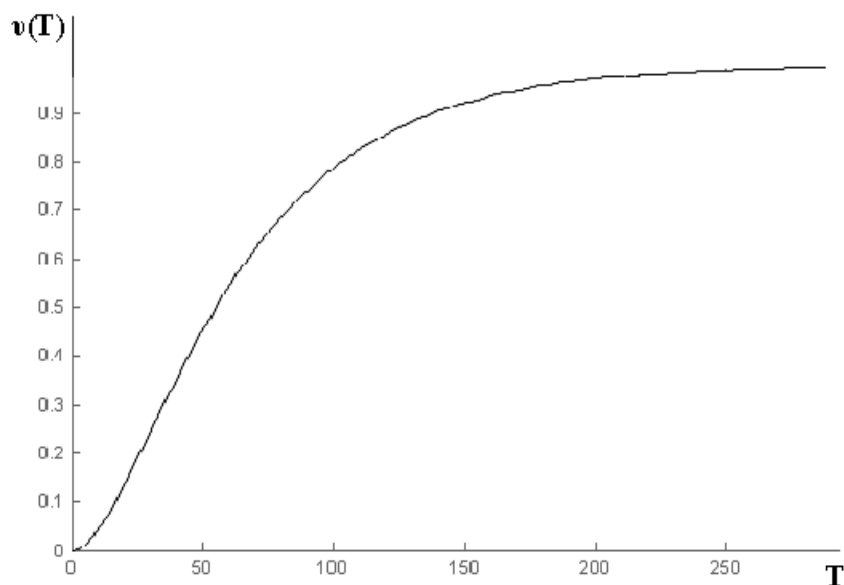


Рисунок 3.24 - Перехідний процес швидкості

Проведемо аналіз усталеної роботи привода за допомогою електронного прикладного пакета MATLAB.

На рис. 3.25 і рис. 3.26 показані частотні характеристики - годограф Найквіста й діаграми Бode. Частотні характеристики задовольняють вимоги стійкості системи.

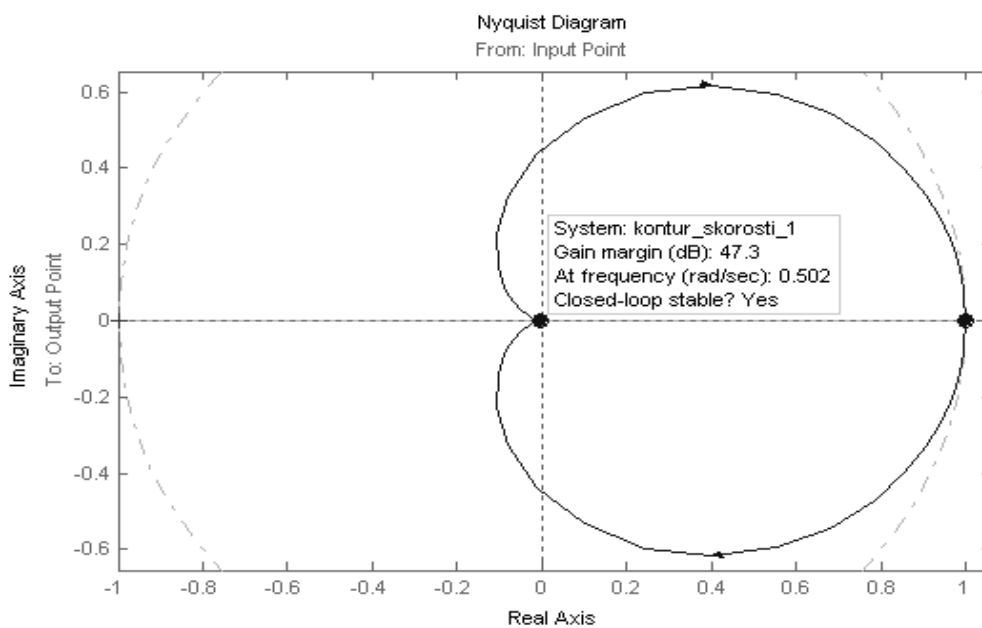


Рисунок 3.25 - Годограф Найквіста

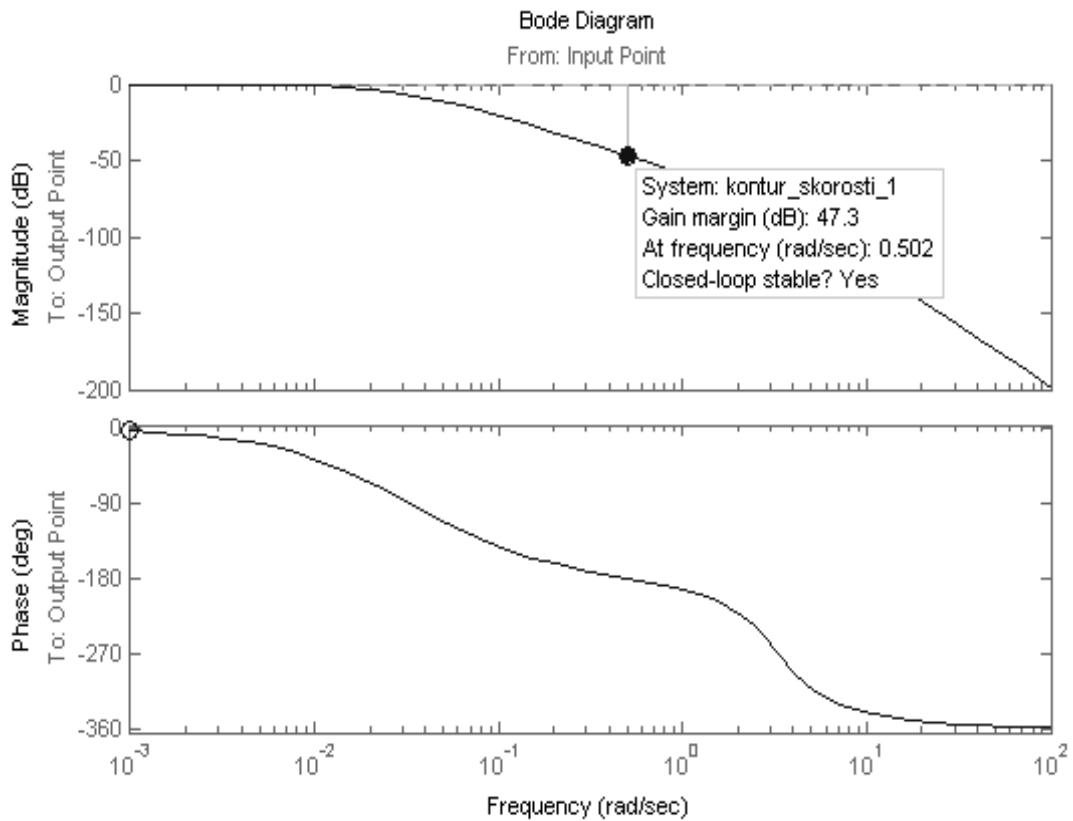


Рисунок 3.26 - Діаграми Боде

3.5.6 Дослідження математичної моделі асинхронного електропривода

Для розв'язки контуру керування складовими струму i_{sy} й i_{sx} можна застосувати перехресні зв'язки за сигналами керування u_{sx} й u_{sy} .

Формально вихідні сигнали $i_{sx}(D)$ й $i_{sy}(D)$, де $D \leftrightarrow \frac{d}{dt}$, будуть

$$i_{sx}(D) = \frac{W_i(D) \cdot [u_{sx}(D) + x'_s \cdot \alpha_k \cdot W_i(D) \cdot u_{sy}(D)]}{1 + (x'_s \cdot \alpha_k)^2 \cdot W_i^2(D)}; \quad (3.72)$$

$$i_{sy}(D) = \frac{W_i(D) \cdot [u_{sy}(D) - x'_s \cdot \alpha_k \cdot W_i(D) \cdot u_{sx}(D)]}{1 + (x'_s \cdot \alpha_k)^2 \cdot W_i^2(D)}; \quad (3.73)$$

Зробимо заміну змінних:

$$u_{sx}(D) = W_{11}(D)u'_{sx}(D) + W_{12}(D)u'_{sy}(D); \quad (3.74)$$

$$u_{sy}(D) = W_{12}(D) \cdot u'_{sx}(D) + W_{22}(D) \cdot u'_{sy}(D); \quad (3.75)$$

і визначимо $W_{ij}(D)$, так щоб i_{sx} і i_{sy} залежали тільки від u'_{sx} і u'_{sy} . Тоді, відносно u'_{sx} й u'_{sy} складової струму i_s будуть незалежно керованими.

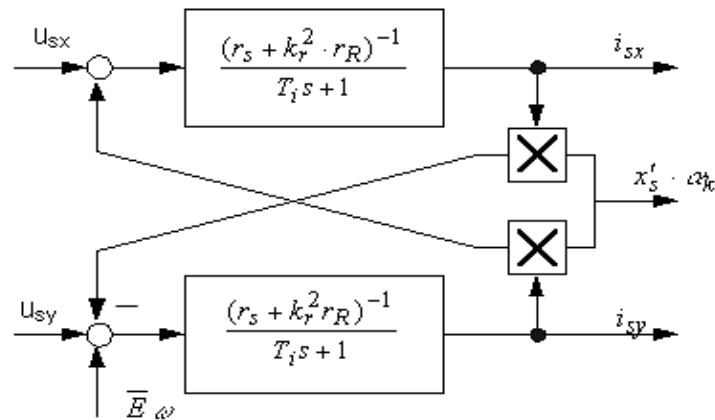


Рисунок 3.27 - Перехресні зв'язки за сигналами керування u_{sx} й u_{sy}

Форсуючий поліном фільтра $(T_{\mu}s + 1)$ буде компенсувати вплив інерційності перетворювача частоти.

Замикання контуру кутової швидкості пропорційним регулятором у першому контурі й ланцюговим Пі-регулятором у другому дає астатичну систему керування швидкістю.

Система рівнянь для двигуна електропривода:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{d\left|\frac{\&}{\Psi_r}\right|}{dt} &= -\frac{r_R}{x_R} \cdot \left|\frac{\&}{\Psi_r}\right| + k_R \cdot r_R \cdot i_{SX}, \\
 \frac{di_{SX}}{dt} &= -\frac{r_S \cdot k_R^2 \cdot r_R}{x'_S} \cdot i_{SX} + \frac{k_R \cdot r_R}{x'_S \cdot x_R} \cdot \left|\frac{\&}{\Psi_r}\right| + \alpha_K \cdot i_{SX} + \frac{1}{x'_S} \cdot u_{SX}, \\
 \frac{di_{SY}}{dt} &= -\frac{r_S \cdot k_R^2 \cdot r_R}{x'_S} \cdot i_{SY} - \alpha_K \cdot i_{SX} - \frac{k_R}{x'_S} \cdot p \cdot v \cdot \left|\frac{\&}{\Psi_r}\right| + \frac{1}{x'_S} \cdot u_{SY}, \\
 \frac{dv}{dt} &= \frac{3 \cdot k_R \cdot p}{2 \cdot J} \cdot \left|\frac{\&}{\Psi_r}\right| \cdot i_{SX}, \\
 \frac{d\omega}{dt} &= \frac{3 \cdot k_R \cdot p}{2 \cdot J} \cdot \left|\frac{\&}{\Psi_r}\right| \cdot i_{SX} - \frac{1}{J} \cdot M_C,
 \end{aligned} \right\} \quad (3.76)$$

$$\left| \frac{\Psi_r}{s} \right| \cdot (\omega_{\Psi_r} - p \cdot \omega) = k_R \cdot r_R \cdot i_{SX}.$$

Для цієї моделі також були розраховані всі необхідні коефіцієнти регуляторів:

$$T_{\Psi} = T_{1\Psi}, \quad (3.77)$$

$$T_{\Psi} = 90,91.$$

$$T_{I\Psi} = T_{2\Psi}, \quad (3.78)$$

$$T_{I\Psi} = 7,458.$$

$$a_{\Psi i} = \frac{k_R \cdot r_R}{x'_S \cdot x_R}, \quad (3.79)$$

$$a_{\Psi i} = \frac{0,9697 \cdot 0,0136}{0,0551 \cdot 0,9242} = 0,258.$$

$$a_{i\Psi} = b_{i\Psi} = k_R \cdot r_R, \quad (3.80)$$

$$a_{i\Psi} = b_{i\Psi} = 0,9697 \cdot 0,0145 = 0,013.$$

$$a_{oi} = \frac{k_R \cdot p}{x'_S}, \quad (3.81)$$

$$a_{oi} = \frac{0,9697 \cdot 1}{0,0551} = 35,207.$$

$$k_M = \frac{3 \cdot p \cdot k_R}{2}, \quad (3.82)$$

$$k_M = \frac{3 \cdot 2 \cdot 0,9697}{2} = 2,91.$$

Модель привода, побудована в Simulink представлена на рис. 3.28. Осцилографи вимірюють відносні сигнали ω , $|\psi_r|$, m.

Для визначення величини відносного сигналу завдання u_3 за швидкістю скористаємося розрахованим значенням частоти обертання двигуна:

$$v_3 = \frac{\omega}{\omega_b}, \quad (3.83)$$

$$v_3 = \frac{75,92}{314} = 0,24$$

Для каналу поточкозчеплення й швидкості відносний сигнал завдання дорівнює 1, а для моменту скористаємося значенням, розрахованим по (3.57).

З метою запобігання ділення на нуль на початку моделювання в схему вводиться блок «Constant», що формує малу постійну величину.

На рис. 3.29 і рис 3.30 наведені графіки перехідних процесів вимірюваних величин.

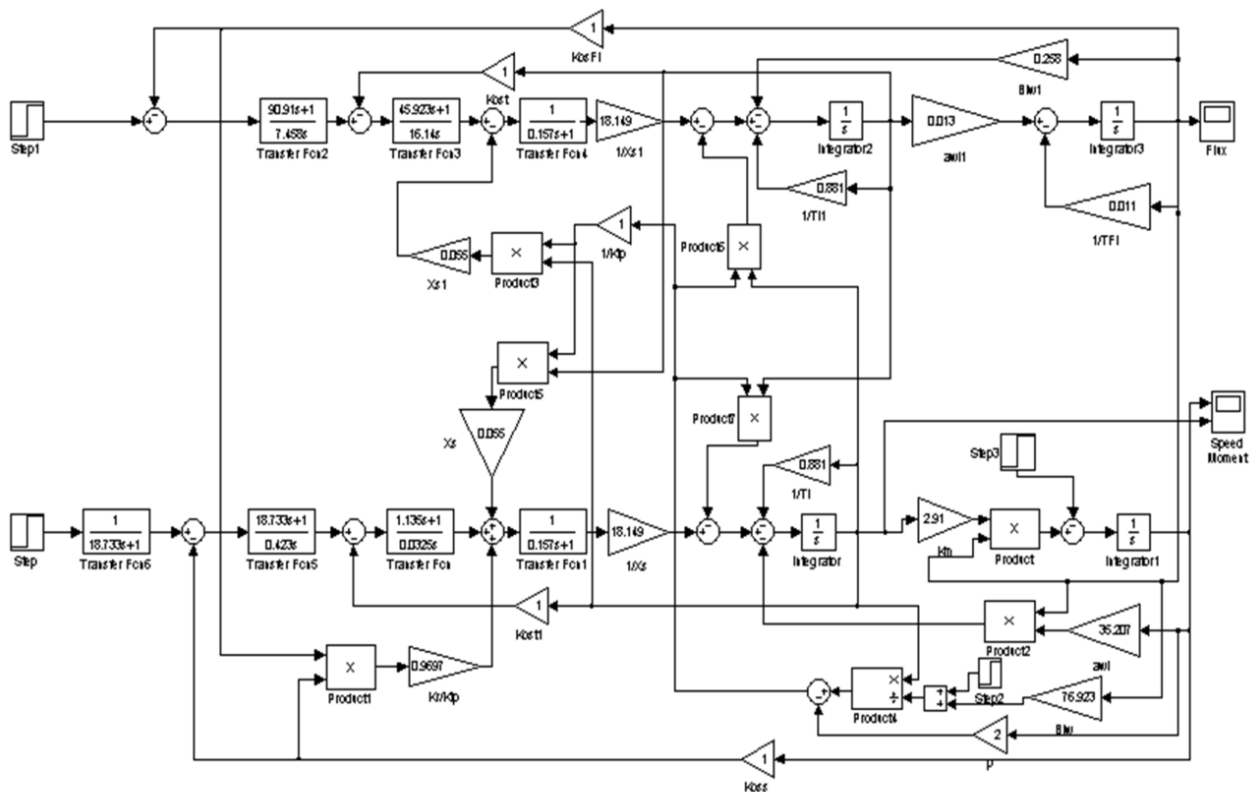


Рисунок 3.28 - Математична модель асинхронного електропривода

На рис. 3.31 – 3.34 наведені частотні характеристики Найквіста й діаграми Боде для розглянутих каналів регулювання координат. По діаграмах Найквіста видно, що контури, для яких вони наведені задовольняють вимогам стійкості й перебувають досить далеко від границі стійкості.

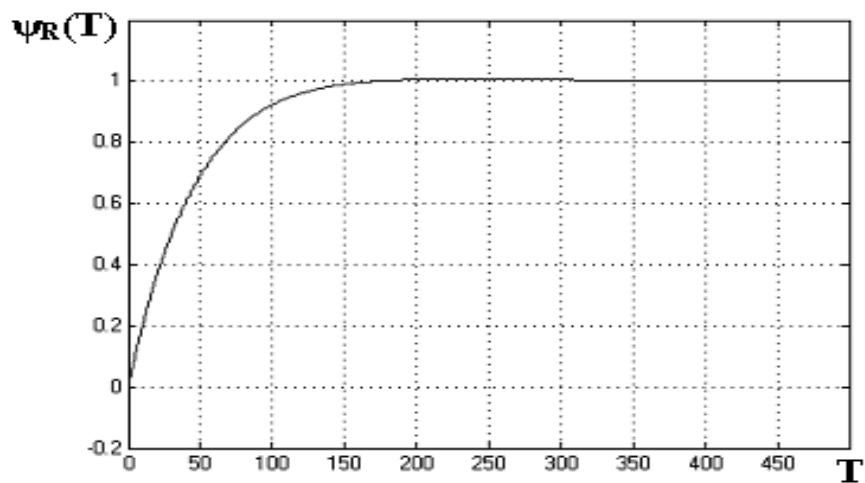


Рисунок 3.29 - Графік зміни модуля потокозчеплення ротора в часі

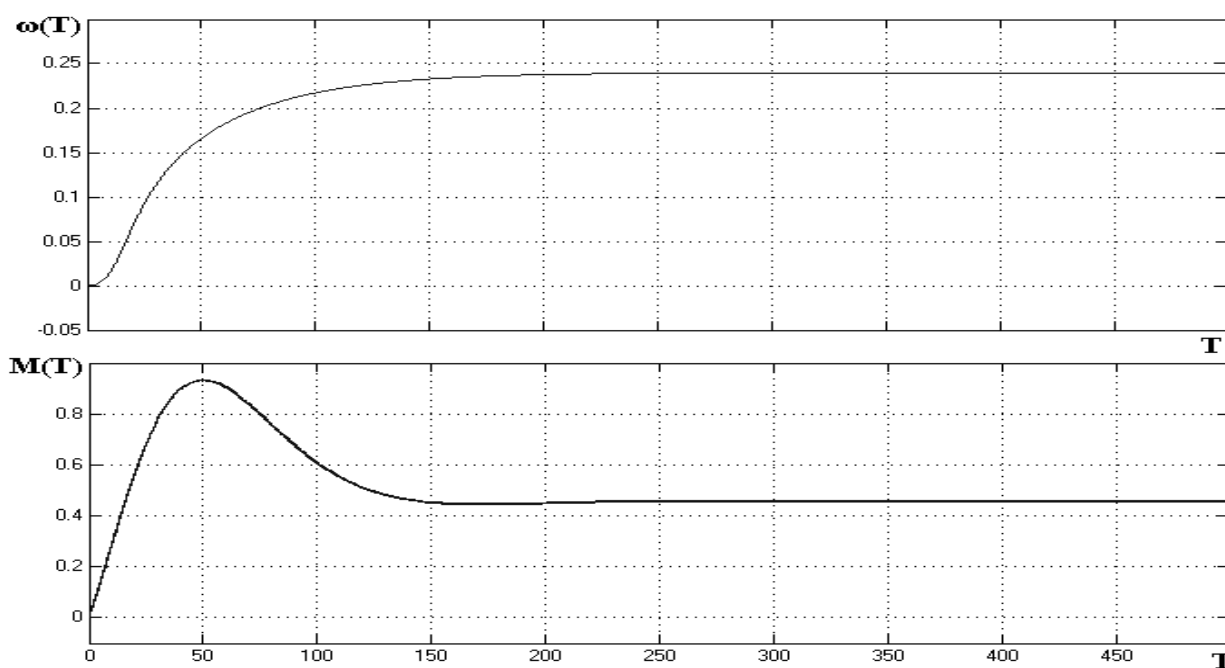


Рисунок 3.30 - Графік зміни швидкості й моменту в часі

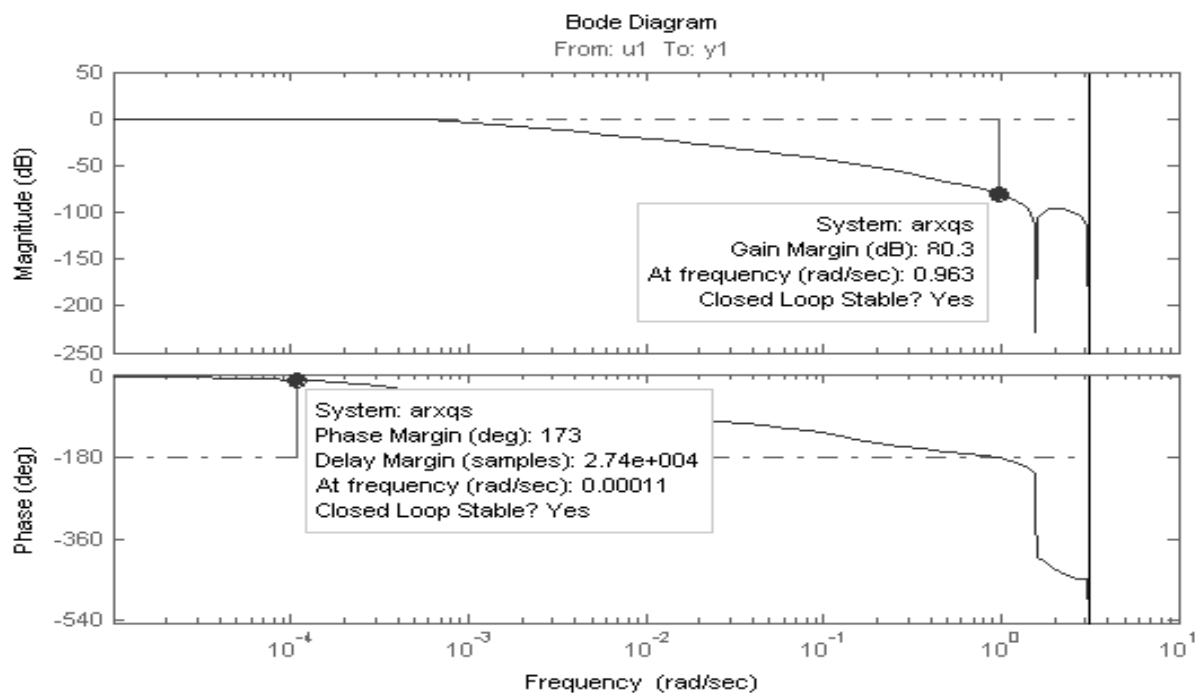


Рисунок 3.31 - Діаграми Бode для каналу керування модулем
потокочеплення ротора

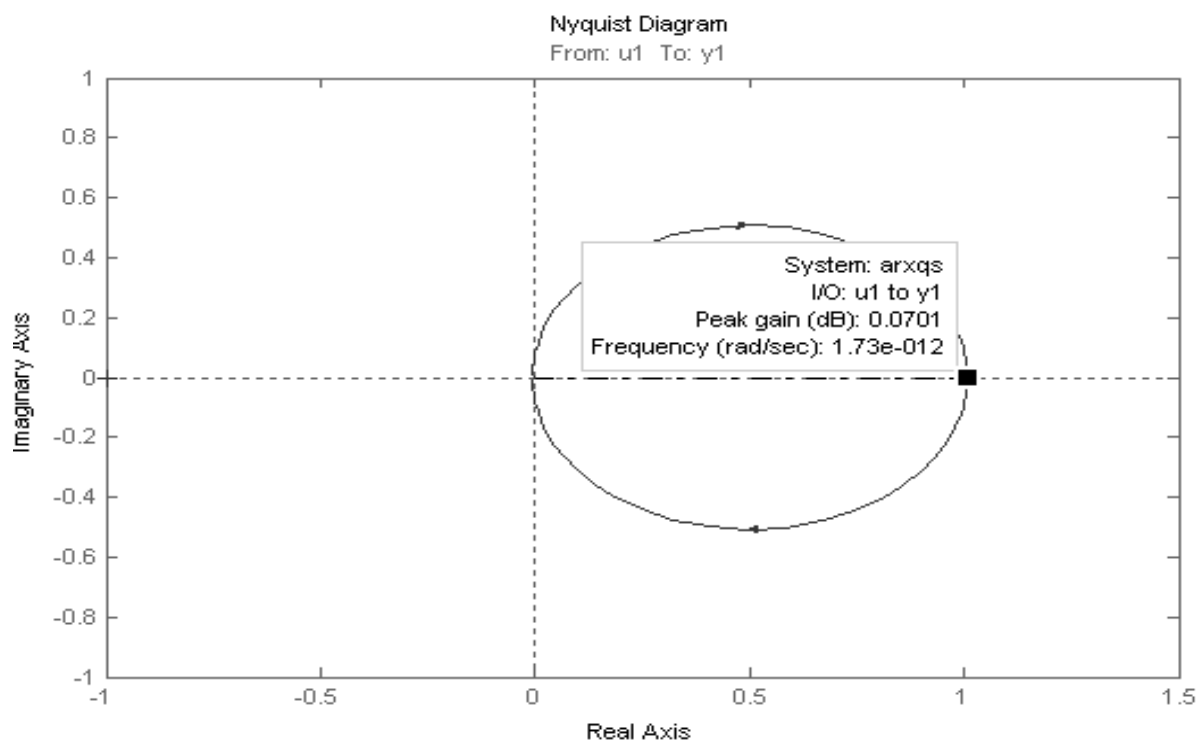


Рисунок 3.32 - Частотна характеристика Найквіста для каналу керування
модулем потокочеплення ротора

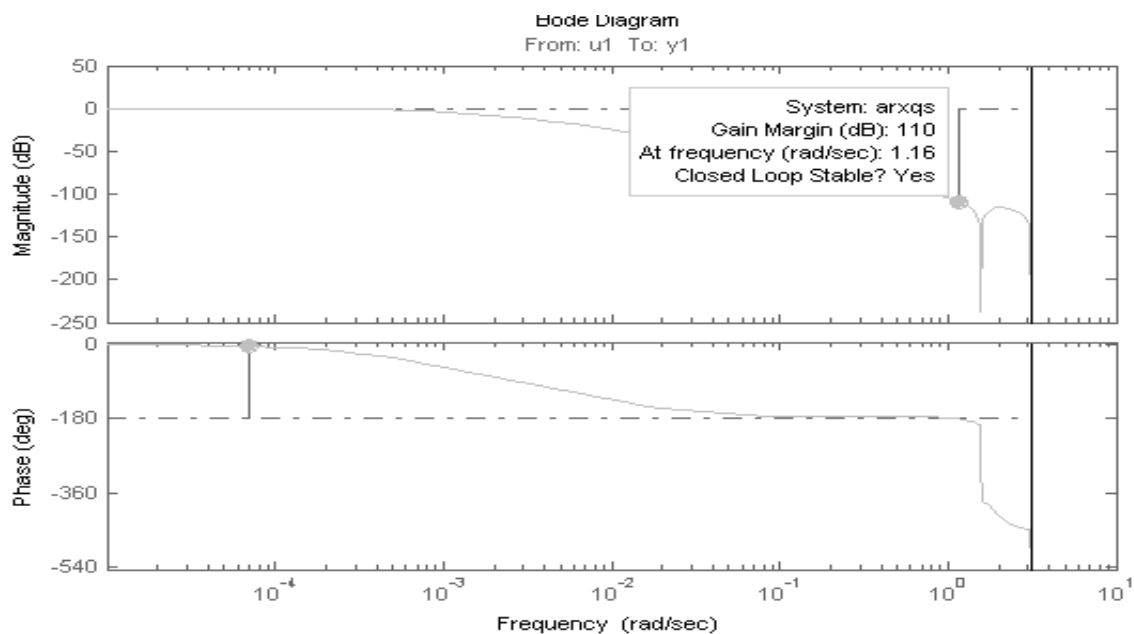


Рисунок 3.33 - Діаграми Бode для каналу керування швидкістю ротора

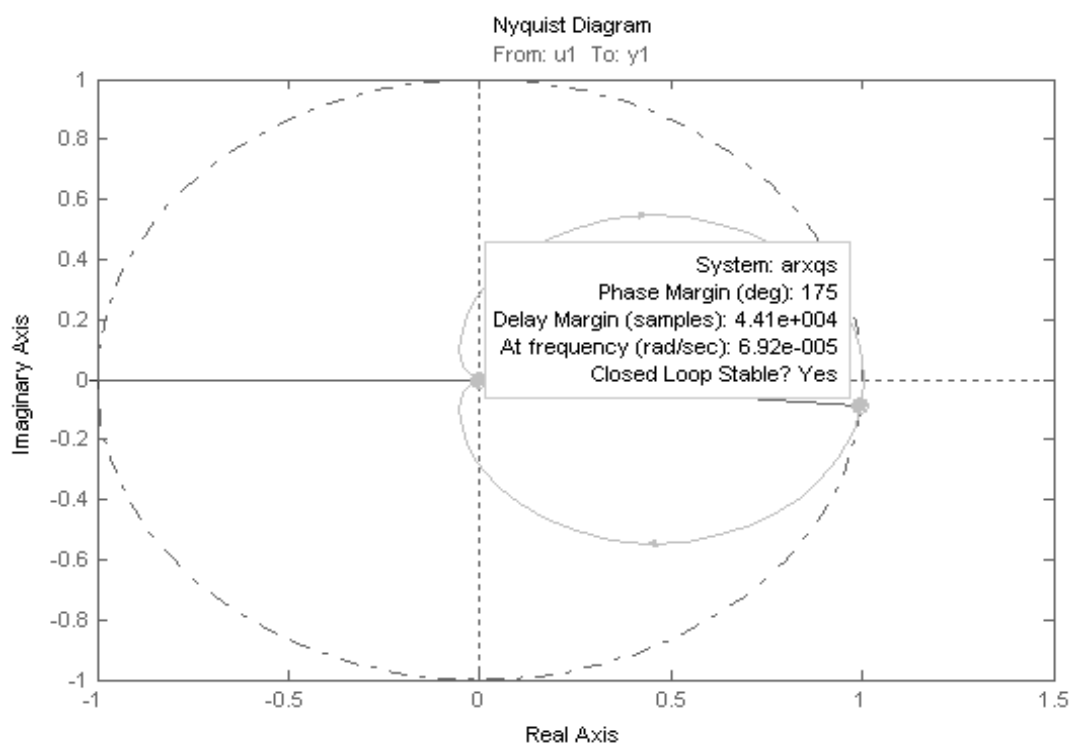


Рисунок 3.34 - Частотна характеристика Найквіста для каналу керування швидкістю ротора

3.6. Скалярне керування електроприводом

При скалярному керуванні рівняння лінеаризованої механічної характеристики двигуна має вигляд:

$$(1 + T_e) \cdot M = \beta \cdot (\omega_0 - \omega); \quad (3.84)$$

У системі ПЧ-АД синхронна частота обертання статора:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot K_{зш}}{p} \cdot u_{зш}; \quad (3.85)$$

де: $u_{зш}$ – завдання на швидкість.

Коефіцієнт керування частотою:

$$K_{зш} = \frac{f}{u_{зш}}; \quad (3.86)$$

$$K_{зш} = \frac{50}{10} = 5 \frac{c^{-1}}{B};$$

Доповнивши (3.84) і (3.85) рівнянням руху, одержимо систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} (1 + T_s) \cdot M &= \beta \cdot (\omega_0 - \omega) \\ \omega_0 &= \frac{2 \cdot \pi \cdot K_{уч}}{p} \cdot u_{уч} \\ M - M_c &= J \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (3.87)$$

Використовуючи систему (3.86), складемо структурну схему системи ПЧ-АД.

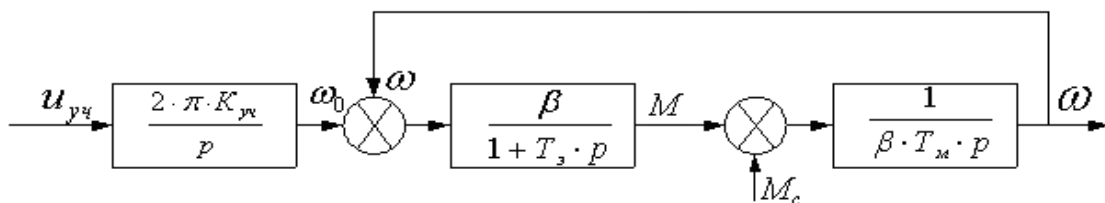


Рисунок 3.35 - Структурна схема лінеаризованої системи ПЧ-АД

Модуль жорсткості лінеаризованої механічної характеристики:

$$\beta = \frac{2 \cdot M_k}{\omega_0 \cdot s_k}; \quad (3.88)$$

$$\beta = \frac{2 \cdot 435,6}{75,8 \cdot 0,1387} = 80,015 H \cdot m \cdot c$$

Електромагнітна постійна часу двигуна:

$$T_g = \frac{1}{\omega_{0эл} \cdot s_k}; \quad (3.89)$$

$$T_g = \frac{1}{314 \cdot 0,1387} = 0,114 c$$

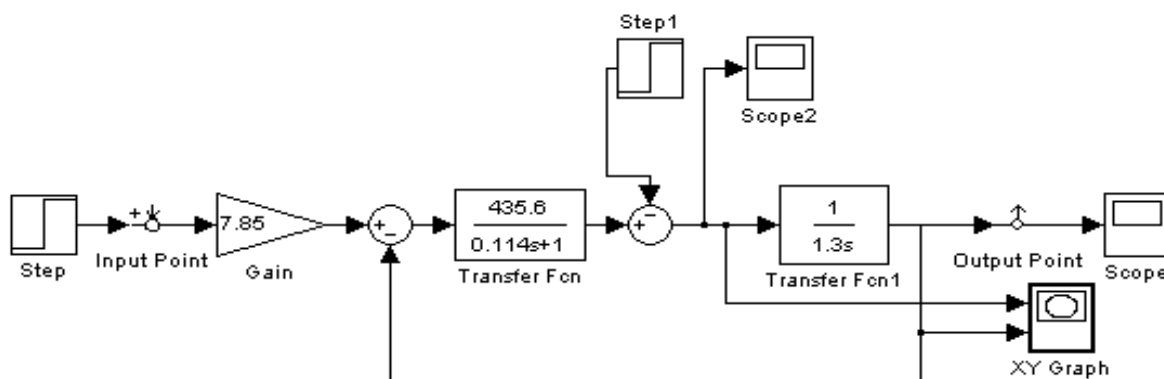


Рисунок 3.36 - Структурна схема лінеаризованої системи ПЧ-АД

Час перехідного процесу відповідає розрахованому часу пуску

Проведемо аналіз усталеної роботи привода за допомогою методу Найквіста. Годограф за критерієм Найквіста виведемо за допомогою електронного прикладного пакета MATLAB.

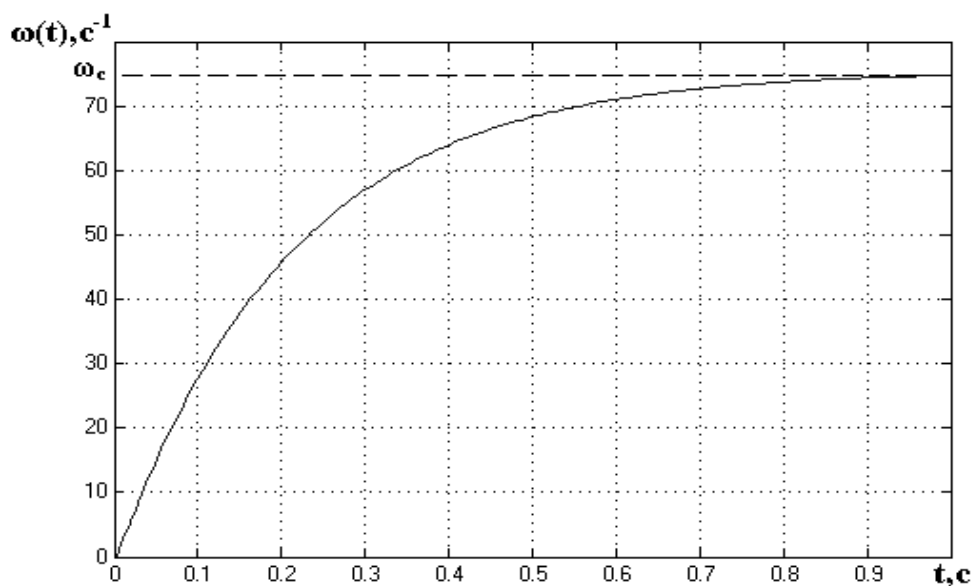


Рисунок 3.37 - Перехідний процес швидкості при пуску АД під навантаженням

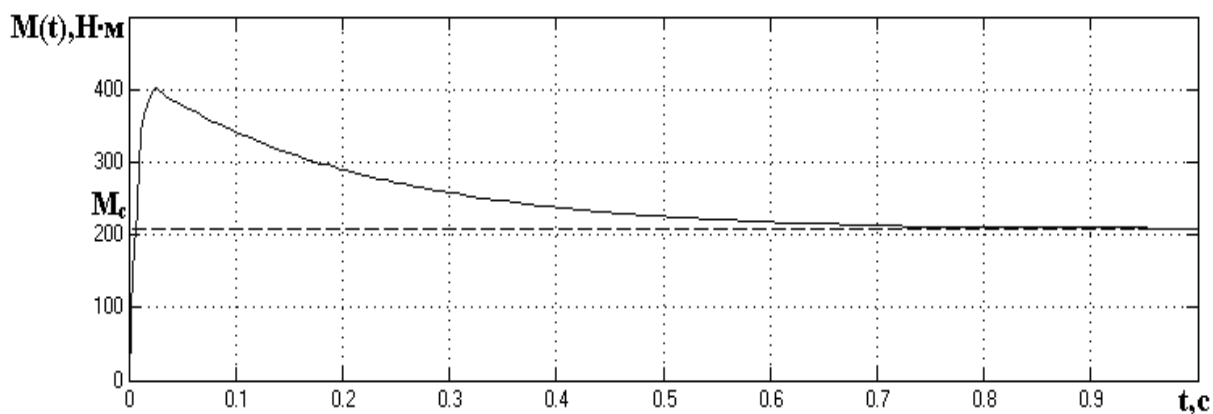


Рисунок 3.38 - Перехідний процес моменту при пуску АД під навантаженням

Частотні характеристики наведені на рис. 3.40 і 3.41.

По рис. 3.40 видно, що годограф Найквіста не перетинає крапку з координатами $(-1;0)$. Це говорить про стійкість системи.

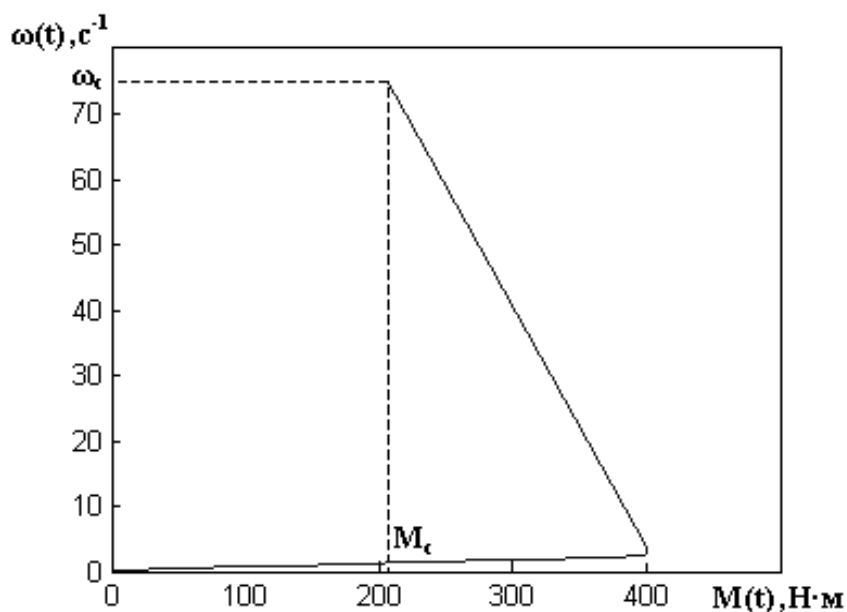


Рисунок 3.39 - Механічна динамічна характеристика при пуску АД під навантаженням

Побудуємо механічні характеристики при скалярному керуванні швидкістю ротора. У відносних одиницях закон зміни напруги при частотному регулюванні, при допущенні $R_s = 0$:

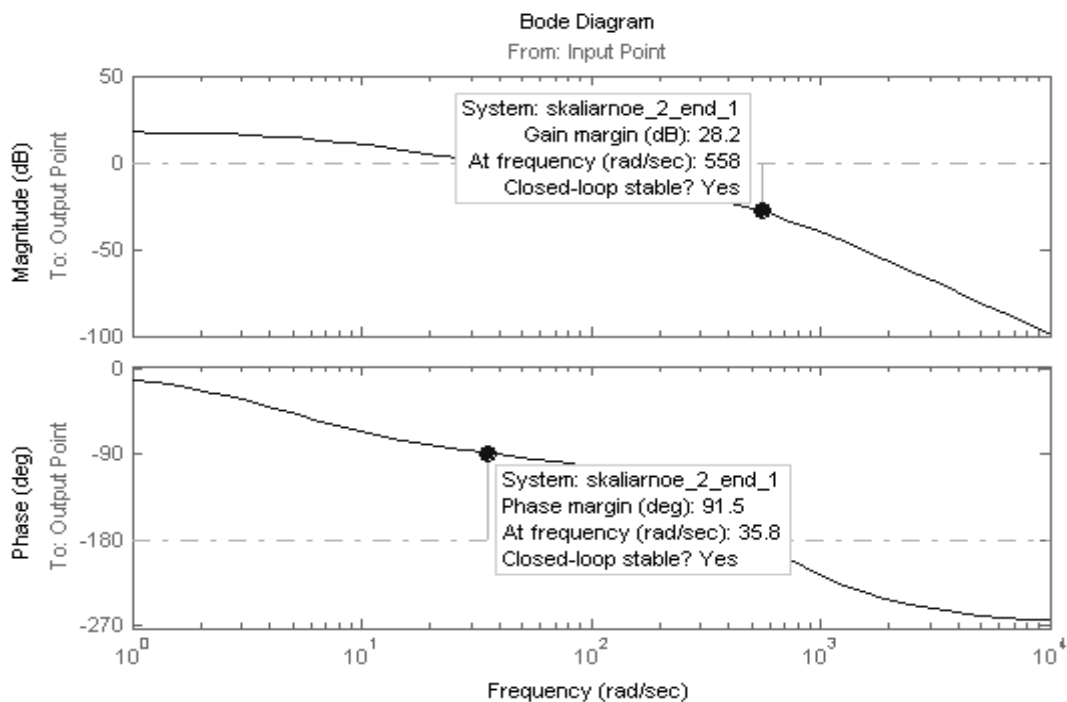


Рисунок 3.40 - Діаграми Бодє структурної схеми лінеаризованої системи ПЧ-АД

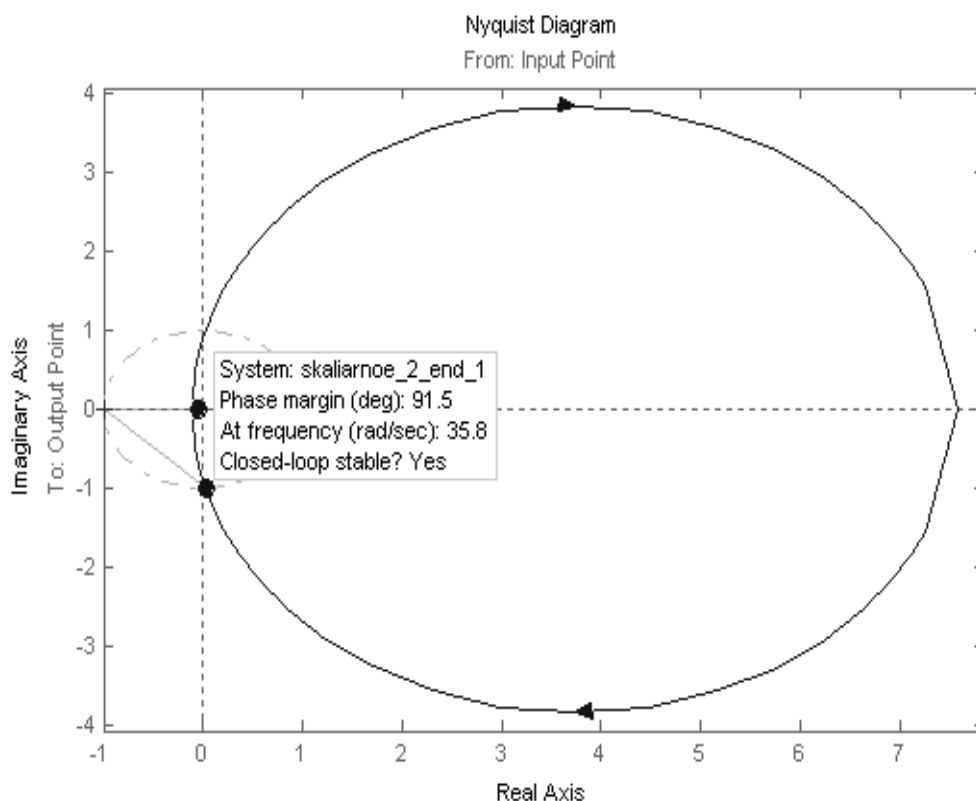


Рисунок 3.41 - Частотна характеристика Найквіста структурної схеми лінеаризованої системи ПЧ-АД

$$U_1^* = f_1^* \cdot \sqrt{M_c} ; \quad (3.90)$$

де
$$U_1^* = \frac{U_1}{U_{1ном}}, f_1^* = \frac{f_1}{f_{1ном}}, M_c = \frac{M_c}{M_{снво}} .$$

При $M_c = const$ (1.217) запишеться у вигляді:

$$U_1^* = f_1^* ; \quad (3.91)$$

або,

$$\frac{U_1^*}{f_1^*} = const . \quad (3.92)$$

Уточнений закон зміни напруги при частотному регулюванні з обліком $R_s \neq 0$:

$$U_1^* = \sqrt{\frac{f_1^* \cdot \rho_{1k} + \sqrt{(f_1^{*2} + \rho_{1k}^2) \cdot (f_1^{*2} + \rho_{1\mu}^2)}}{\rho_{1k} + \sqrt{(1 + \rho_{1k}^2) \cdot (1 + \rho_{1\mu}^2)}}} M_c^*(f_1^*) ; \quad (3.93)$$

$$\rho_{1k} = \frac{Rs}{x_{кнно}}; \quad (3.94)$$

$$\rho_{1k} = \frac{0,4864}{6,981} = 0,071;$$

$$\rho_{1\mu} = \frac{Rs}{x_{тнно}}; \quad (3.95)$$

$$\rho_{1\mu} = \frac{0,4864}{11,215} = 0,043.$$

Розрахунок механічних характеристик АД при частотному регулюванні швидкості за уточненим законом (3.95) ведеться в наступній послідовності. Розраховується значення критичного моменту АД при частотному регулюванні по формулі:

$$M'_k = \frac{3 \cdot U_1^2}{\omega_{ном} \cdot x_k \cdot (f_1^{*2} + \sqrt{(f_1^{*2} + \rho_{1k}^2) \cdot (f_1^{*2} + \rho_{1\mu}^2)})}. \quad (3.96)$$

Розраховується значення критичного ковзання при частотному регулюванні:

$$s'_k = \frac{R'_r}{f_1^* \cdot x_{кнно}} \cdot \sqrt{\frac{f_1^{*2} + \rho_{1\mu}^2}{f_1^{*2} + \rho_{1k}^2}}. \quad (3.97)$$

Механічні характеристики будуються по уточненій формулі Клосса:

$$M = \frac{2M'_k (1 + \alpha s'_k)}{\frac{s}{s'_k} + \frac{s'_k}{s} + 2\alpha s'_k}; \quad (3.98)$$

де:

$$\alpha = \frac{Rs \cdot f_1^{*2}}{R'_r \cdot f_1^{*2} + \rho_{1\mu}^2}. \quad (3.99)$$

При використанні математичної програми MathCAD побудовані механічні характеристики для частот $f_1^* = 1; 0,6; 0,16$ (50; 30; 8 Гц відповідно).

На рис.3.42 зображені отримані в такий спосіб характеристики двигуна.

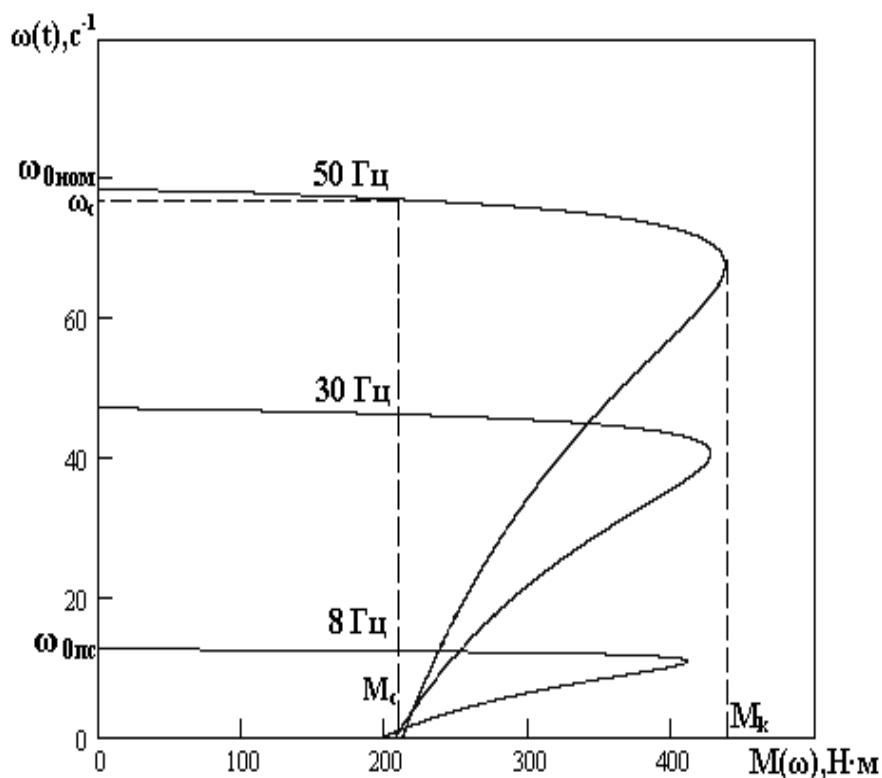


Рисунок 3.42 - Механічні характеристики АД при частотному регулюванні швидкості

Механічні характеристики показують, що при переході на знижену швидкість відбувається зменшення максимального й пускового моментів.

3.7 Висновки за розділом

На основі проведених досліджень зроблені такі висновки:

- 1) Проведено математичне моделювання асинхронної машини у нерухомій та рухомій системі координат.

- 2) Розроблена структурна схема асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором та контуром регулювання вектора потокощеплення ротора.
- 3) Проведене моделювання контуру регулювання струму статора та контуру регулювання швидкості.
- 4) Розроблена модель та проведено дослідження частотних характеристик асинхронного електропривода.
- 5) Розроблені пропозиції по скалярному керуванню електроприводом.
- 6) Проведені дослідження стійкості системи до збурувальних впливів за критерієм Найквіста та діаграмами Боде, які свідчать про стійкість системи автоматичного керування.

Висновки

В процесі виконання кваліфікаційної роботи магістра синтезована механічна частина електропривода, вибраний та перевірений на нагрів двигун, вибраний частотний перетворювач. Побудована і досліджена модель двигуна.

На основі аналізу системи керування виконаний розрахунок регуляторів і побудована модель привода з урахуванням специфіки математичного опису асинхронного привода при живленні від джерела напруги.

У дослідницькій частині проекту була розглянута та синтезована модель скалярного керування асинхронним електроприводом.

Впровадження результатів виконання кваліфікаційної роботи скоротить витрати на ремонт, експлуатацію, і загалом підвищить економічні показники.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) O. M. Oduola, C. A. Ikutegbe, K. Akinluwade. Cutting Tool Materials and Wear Mechanisms in Metal Cutting: Toughness, hot hardness and wear resistance constitute the prime properties for cutting tool materials in manufacturing. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 68 с.
- 2) Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations and CNC design (2nd ed.) Cambridge. 2012. 382 p.
- 3) Шевченко В.В., Олінійчук А.І., Заєць С.С. Аналіз акустичної емісії в процесах механічної обробки з використанням вейвлет-пакетів. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нове в сучасних технологіях. ISSN 2079-5459. – Харків: Вид-во НТУ «ХПІ», - 2017. – №7 (1229), – с.233-238.
- 4) Ferrell E. R. Analysis of Tool Wear and Tool Life of Cutting Tool Inserts Using Statistical Process Control Charts: A Case Study. Morehead State University, 2017. 37 с.
- 5) Stephenson D. A., Agapiou J. S. Metal Cutting Theory and Practice. Missouri : CRC Press, 2021. 976 с.
- 6) Groche P., Nitzsche G. Influence of temperature on the initiation of adhesive wear with respect to deep drawing of aluminum-alloys. Journal of Materials Processing Technology. 2007. Т. 191, № 1-3. С. 314–316.
- 7) Шевченко В.В., Капінос І.В., Грабовський Д.О. Система контролю процесу обробки деталей в умовах «безлюдної технології» / В.В. Шевченко, І.В. Капінос, Д.О. Грабовський // Прогресивні технології та прилади. м. Луцьк – 2011. -№1. -С. 223-231.
- 8) Шевченко В.В., Коробцов,С.І., Богачев Є.В., Заєць С.С. Система діагностики працездатності різального інструменту на верстатах з ЧПК.// Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 29 (68), №2, 2018. – с.198 – 202.

9) Автоматизований електропривод ч. 2 [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів освітньої програми «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / В.І. Теряєв. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.– 204 с.

10) Галай М.В. Теорія автоматичного керування: неперервні та дискретні системи: Навчальний посібник. – Полтава: ПНТУ, 2002.

11) Казачковській, М. М. Комплектні Електроприводи: навч. посібник / М. М. Казачковській. - Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2003. - 226 с.

12) Автоматизація і привід: Каталог СА01. - Випуск 10/2003. – ДП Сіменс Україна.

13) Частотно-регульовані приводи: Каталог. - Випуск 02/2003. – ДП Сіменс Україна.

14) Зеленов А.Б. Теорія електропривода: Методика проектування електроприводів: Підручник. – Луганськ: Вид-во "Ноулідж", 2010. – 670 с.

15) Теорія електропривода: Підручник / За ред. М.Г. Поповича. – К.: Вища школа, 1993. – 494 с.

16) Донець О. В. Теорія електропривода : конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка) / В. І. Колотіло, О. В. Донець; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 148 с.

17) Безрученко В. М. Теорія електроприводу: підручник. Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2011. Режим доступу <http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/handle/123456789/402>

18) ДСТУ EN 60034-1:2016 Машини електричні обертові. Частина 1. Номінальні та робочі характеристики (EN 60034-1:2010; EN 60034-1:2010/AC:2010, IDT).

19) Васи́лега П. О. Електропривод робочих машин : підручник / П. О. Васи́лега. – Суми: Сумський державний університет, 2022. – 290 с.

20) Електропривод виробничих машин і механізмів: Навчальний посібник / О.Ю. Синявський, В.В. Савченко, В.Я. Бунько, В.Ю. Рамш; За ред. О.Ю. Синявського. – К.: ФОП Ямчинський О.В. , 2020. – 444 с.

21) 8. Видмиш А. А., Ярошенко Л. В. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 387 с.
Режим доступу <http://repository.vsau.org/getfile.php/25015.pdf>

22) Leonhard W. Control of Electrical Drives. Berlin: Springer-Verlag, 2001.

23) Колб Ант. А, Колб А. А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник. – 2-е вид. перероб. і доп. –Д., Національний гірничий університет, 2011. – 540 с.

24) Журнал «Електротехніка і Електромеханіка». URL: <http://eie.khpi.edu.ua/>.

25) Журнал «Технічна електродинаміка». URL: <http://techned.org.ua/>.

26) Журнал «Електромеханічні і енергозберігаючі системи». URL: <http://ees.kdu.edu.ua/>.

ДОДАТКИ

1. Technological part

1.1. Description of the technological process of the rolling mill 700

Rolling mill 700 refers to powerful metallurgical installations designed for processing metal blanks. The metal rolling process in such installations allows you to produce products with specified mechanical properties and dimensions.

Rolling mill 700 is designed for the production of a wide range of metal products, including:

Sheets and strips of various thicknesses

Reinforcement products

Bars and profiles of various shapes

Plates and other products for various industries (mechanical engineering, construction, energy, etc.)

Due to its high productivity and technological capabilities, rolling mill 700 allows you to produce metal products with high accuracy and mechanical strength characteristics that meet the requirements of modern industry.

Section 1. "Warehouse for cast billets". The task of the warehouse is to receive cast billets with different chemical compositions received from the steelmaking shop, to stack them and issue them to the rolling mill in accordance with the production program.

Cast billets are transported from the steelmaking shop by melts, with a mass of 150 tons, laid on the wide side, on one of two parallel roller conveyors. All billets coming from the steelmaking shop are stopped and automatically weighed at the end of the roller conveyor. The mass of the billets is automatically recorded and entered into the data recording system. Data on the billet brand is also entered into this system.

According to the technological scheme of material movement, after weighing, all billets of one melt are fed to six loading and unloading devices or directly to the heating furnaces.

In the section of the heating furnaces, the billets are pushed one by one from the roller conveyor onto the loading tables in front of the furnaces, and from these tables they enter the furnaces. Billets from one melt are distributed equally across three furnaces, which ensures their readiness for rolling in the same sequence as when loaded into the furnace. Billets 7-12 m long are fed into the furnace one by one, billets 5-6 m long can be loaded two by two. The heated billets are delivered from the furnaces to the discharge roller conveyor individually using unloading machines. Homogenization furnaces can be loaded with both cold billets from the warehouse and hot billets from the heating furnaces.

Section 2. "Heating furnaces and homogenization furnaces". Cast billets are transported by roller conveyor to the loading windows of the three heating furnaces. Opposite the loading windows, the blanks lying on the roller conveyor are automatically positioned (reducing the speed of the rollers to 0.1 m/s). The positioned blanks are transferred from the roller conveyor to the loading tables using the pushers of the loading machines.

Heating furnaces with their equipment and control systems ensure the heating of the blanks to a rolling temperature of 1250 °C (on the surface) with a heating unevenness of no more than 20 °C along the length of the blank.

The average productivity of each heating furnace is 150 t/hour.

The blanks heated to the rolling temperature are discharged by unloading machines controlled by the operating speed of the reversing mill.

Fig.1.1. shows the layout of the main technological equipment, where in turn: 1- casting furnaces, 2- homogenization furnace, 3- rolling mill span.

Section 3. "Duo-reversible stand". Heated and removed from the furnace blooms of all steel grades, except bearing steel, are fed by a discharge roller table to the hydroblasting unit to remove scale from their surface with a high-pressure water jet. When passing through the hydroblasting unit, scale is removed from the workpiece from all sides simultaneously. The bloom cleaned of scale is fed to the working roller table of the reversing stand and, in accordance with the rolling

program, is installed by manipulator lines in front of the corresponding roll caliber, tilted by 90° and fed by working roller tables to the rolls.

Blooms are rolled into rolled products with a cross section of 230×230 mm in 5 passes, and rolled products with a cross section of 190×190 mm in 7 passes.

All rolled products are subjected to end trimming and, if necessary, in emergency cases, to cutting into parts on stationary shears (800-ton guillotine shears) of hot cutting.

After the hot cutting shears, the rolled products are transported to the first group of continuous billeting mill.

Section 4. “Continuous rolling mill with hot cutting saw lines”.

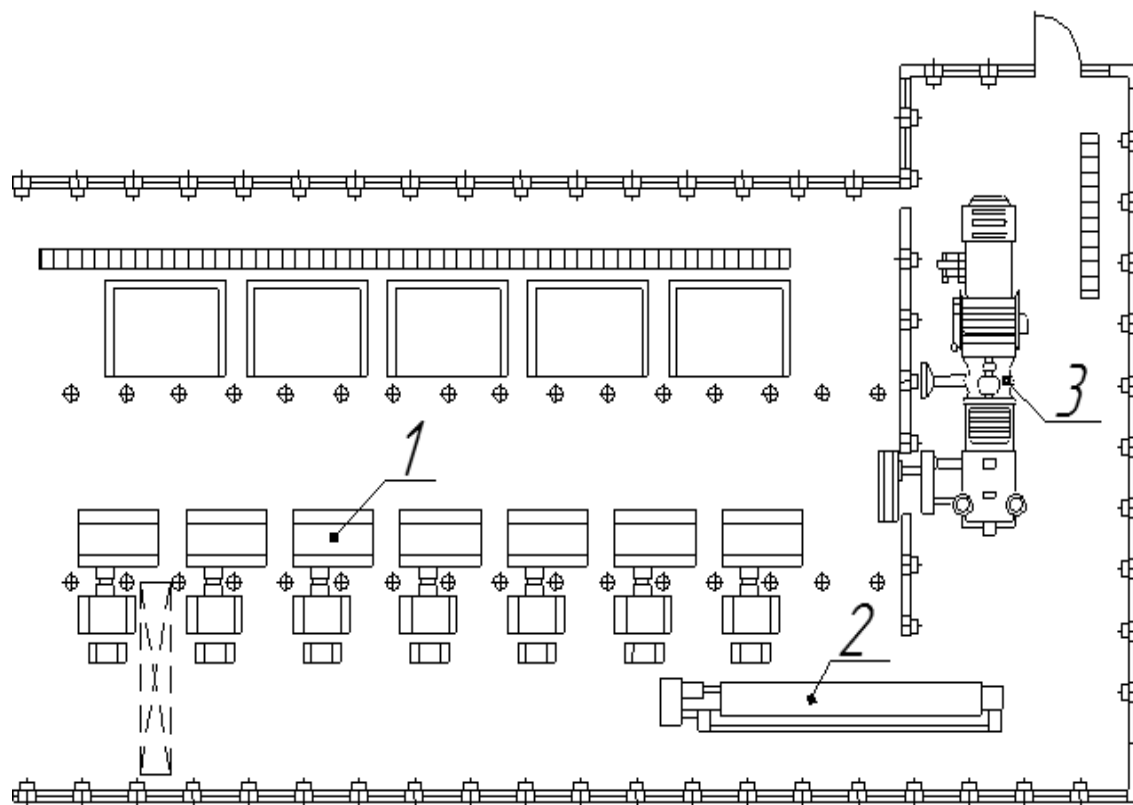


Figure 1.1 - Placement of a homogenizing tunnel furnace in the flow of the casting and rolling shops

At the NPS section, hot billets enter the first group of rolling stands, consisting of two vertical and two horizontal stands.

After passing through the first group of stands, the rolled products are subjected to further processing either on one saw line or on two saw lines. In the

above process, every second billet, having passed through the first group of stands, is positioned on the roller table and then transported by a transfer truck behind the second group of stands from the first saw line to the second.

After passing through the second group of stands, the rolled metal is cut into two segments using four-crank flying shears behind the second group of stands, one of which remains on the second line, and the other is positioned on the roller table and then transported by a transfer truck behind the second group of stands from the second line to the first.

During the transportation of the material along the roller table from the hot cutting saw section, the ends of the billets are branded using special branding machines.

Section 5. "Annealing furnaces and coolers".

The cooler section consists of special, representing four groups of walking beams, on which the billets that have passed through the annealing furnaces are cooled to the required temperature. Further, on the roller conveyor, the workpieces are transferred to the scales - the roller conveyor using a transfer trolley.

Section 6. "Intermediate warehouse". The workpieces arrive at this section via a transverse transfer trolley.

According to the task, the workpieces are transferred using a trolley at the warehouse exit to the cleaning or peeling section. The stacking of workpieces in the warehouse is carried out by stackers, which move the workpieces both horizontally and vertically, placing them on the specified shelves.

Sections 7 and 8. "Cleaning and peeling".

In these sections, the final processing operations of the workpieces are performed, and control is carried out for the presence of both surface and internal defects.

After that, the workpieces are formed into packages and transferred to the finished product warehouse.

Section 9. "Finished product warehouse". The packages that arrive at the SGP are stacked in stacks using cranes with special grippers. The packages are

marked with a combination of colors, and an individual tag is hung on each package. The packages are then loaded into railway cars or other modes of transport and sent to the customer.

1.2. Design and principle of operation of the mechanism

The unloading machine consists of two identical sections. Each section is driven by two identical asynchronous motors with a squirrel-cage rotor. Moreover, each motor operates from a separate frequency converter.

The operation of the two sections is synchronized by an electric clutch.

Each section has two unloading levers with drive gear racks.

The section is driven by a transmission consisting of a three-phase current motor, a shoe brake and a reducer.

The welded lifting frame of the section provides lifting of the unloading levers, moving using hydraulic cylinders (hydraulic drive).

The mechanism is stopped by braking using a special shoe brake (SIEMENS brake type SN720B250–EP23). The recommended stopping distance accuracy from the unloading machine: 2 cm.

When the workpiece passes through the furnace, the gamma element starts counting pulses (1 pulse = 1 mm).

The programmable logic controller stores the number of pulses generated by the pulse sensor when the workpiece passes from the gamma element to the stop. This number determines the position of the workpiece in the furnace. After that, the controller gives a command to the unloading machine to move, taking into account the actual position of the workpiece.

The main elements of the unloading machine design are:

- Drive gearboxes.

The unloading mechanism is equipped with a cylindrical-bevel gear reducer on paws - KEN 200.

- Shafts of type ZZS 198.

Characteristics:

Maximum transmission torque - $M_{max} = 9500 \text{ N} \cdot \text{m}$.

Rotation speed $n = 64 \text{ min}^{-1}$.

- Geared electric coupling.

Characteristics:

Maximum transmission torque – $M_{max} = 412 \text{ N} \cdot \text{m}$.

Rotation speed $n = 720 \text{ min}^{-1}$.

Operation of the electro-coupling:

When voltage is applied, the electromagnet creates a magnetic field that attracts the movable cam coupling. The gear rings engage and can transmit torque. To disengage, it is enough to turn off the power, after which the cam coupling will move to the non-working position under the action of springs.

1.3. Technical and technological data

The lifting frame is a welded trolley equipped with four rollers.

- The unloading levers, made of welded square profile, have a toothed rack and a roller on ball bearings in the lower part.

The operation cycle of the unloading machine consists of the following stages:

moving into the furnace without a workpiece; lifting; moving with the workpiece in the opposite direction to the roller table; stacking.

The unloading mechanism operates cyclically with a maximum of -30 cycles per hour.

In order to prevent emergency situations, the operation of the unloading machine drive must be strictly synchronized with the operation of other drives (outfeed roller tables).

The main tasks of the drive are:

- maintaining the engine speed at a given level, both in nominal mode and at reduced speed;
- the drive control system must ensure the specified stopping accuracy;
- acceleration to operating speed and braking must occur in a time of no more than 1.0 s.

For normal start-up, a significant starting torque is required, since the start-up is carried out under load. The drive control system must ensure minimal speed deviation and its rapid stabilization at a given level. The engine must have high rigidity of the working section of the mechanical characteristic and have a small slip value.

Since the drive operation consists of two stages (operation at nominal and reduced speed), it is necessary to ensure the drive operation in a certain speed range.

The engine must operate stably at both increased and reduced speeds in a repeated short-term mode.

One of the main requirements for the drive is the economical consumption of electrical energy by the power part, while maintaining high dynamic characteristics.

The control system must also provide all necessary types of protection and interlocks.

Let us conduct a comparative characteristic of the most common systems with synchronous, asynchronous drives and a DC drive in order to determine which of them most fully satisfies the above requirements.

The modern stage is characterized by the widespread use of cheap frequency converters for asynchronous and synchronous AC machines. These machines are easy to maintain and quite reliable in operation.

Although synchronous motors are superior in their technical and economic indicators to motors of other types, they are impractical to use for drives with wide speed regulation.

Frequency control of an asynchronous motor is quite economical, because it provides speed regulation without significant power losses in the rotor circuit, which worsen the efficiency of the electric drive and lead to the need to overestimate the motor power.

Frequency speed regulation can be carried out smoothly, in a wide range, in both directions from the natural characteristic, that is, an asynchronous motor can have a speed both greater and less than the nominal. At the same time, the control characteristics have high rigidity, and the motor retains greater overload capacity.

In a DC motor, speed regulation in both directions from the natural characteristic is possible by changing the magnetic flux, for example, using a controlled rectifier in the excitation circuit. This method is widely used due to its simplicity of implementation and cost-effectiveness, since the regulation is carried out in a relatively low-power motor excitation circuit and is not accompanied by significant power losses. But DC motors have significant disadvantages - relatively high cost and low reliability. This is due to the presence of a brush-collector assembly, which is also a source of radio interference and fire hazard and significantly reduces the efficiency of the motor.

Therefore, an asynchronous motor with a frequency converter best meets the proposed requirements.

1.5. Setting the tasks of the qualification work

During the master's qualification work, it is necessary to solve the following tasks:

- Perform calculations of the mechanical part of the EP;
- Select a drive electric motor;
- Select a frequency converter;
- Perform mathematical modeling of the motor and electric drive;
- Perform scalar control of the electric drive.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ
КОНДРАТЮКА»

КАФЕДРА АВТОМАТИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

**ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО
КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ В
ПРОКАТНОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

Кваліфікаційна робота магістра

Виконав:

А. Б.Теребецький

Керівник:

к.т.н., доцент

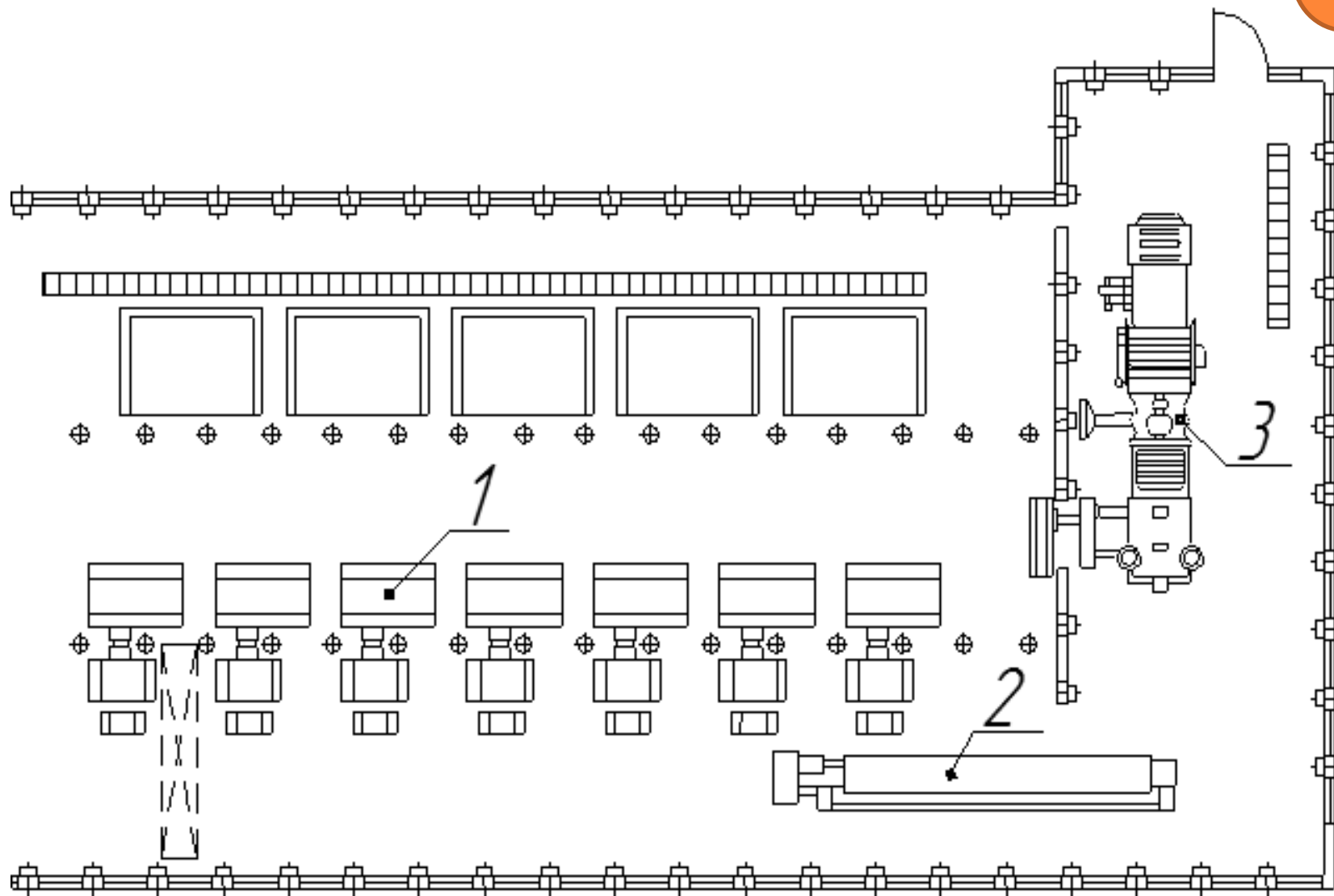
М. К. Бороздін

Полтава 2025

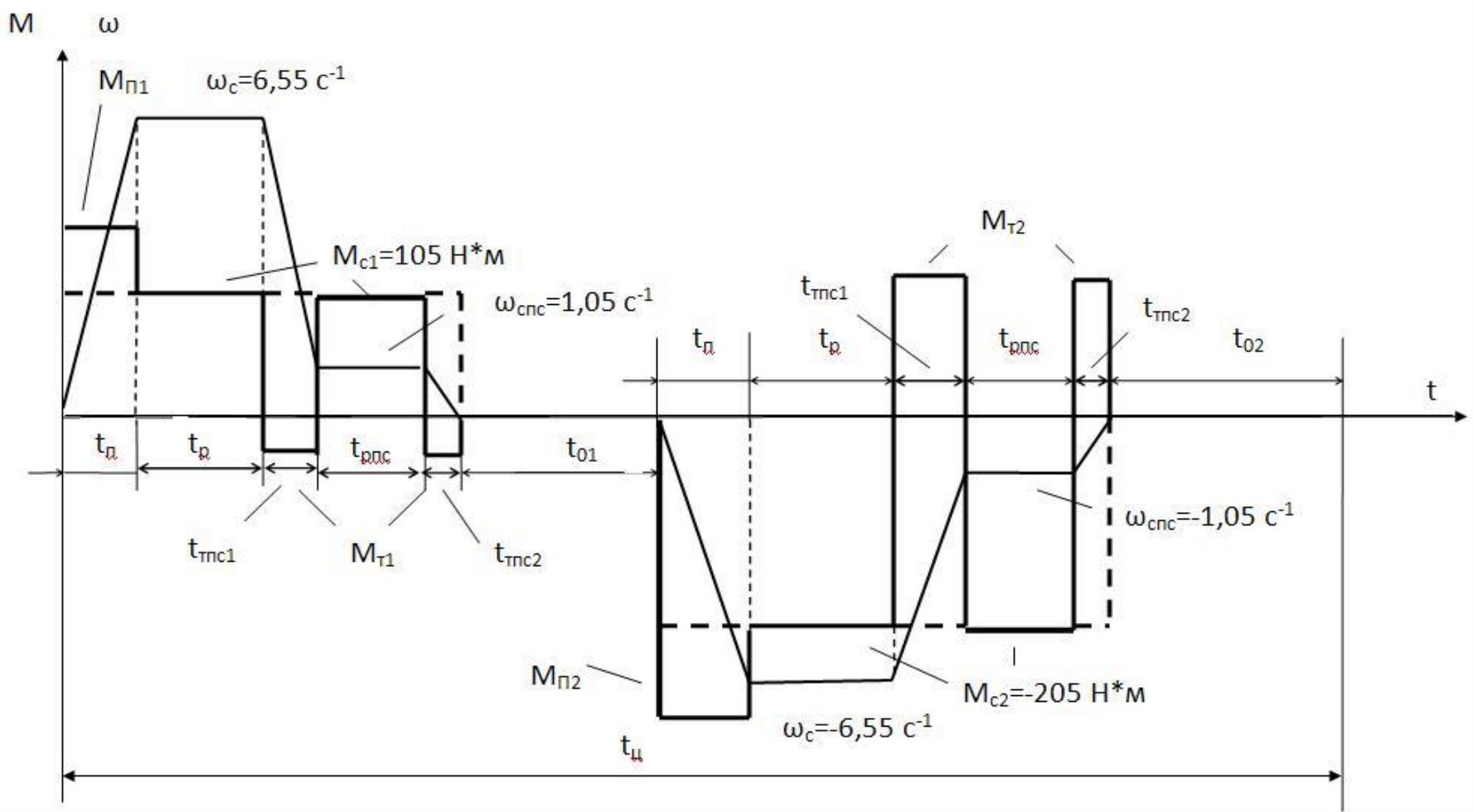
Метою даного дослідження є аналіз та вдосконалення системи електроприводу прокатного стану 700, спрямоване на підвищення ефективності, енергоефективності та надійності його роботи. Дослідження має на меті розробку рекомендацій щодо оптимізації роботи електроприводу в умовах змінних навантажень та технологічних вимог, що дозволить підвищити точність і стабільність прокатного процесу, знизити енергетичні витрати, а також забезпечити безпечну експлуатацію обладнання.

Предметом дослідження є комплекс електромеханічних систем та компонентів, що забезпечують безперебійне, ефективне і безпечне функціонування прокатного стану 700 в умовах металургійного виробництва.

Об'єктом дослідження є технологія автоматичного регулювання швидкості та моменту для досягнення стабільної роботи прокатного стану.

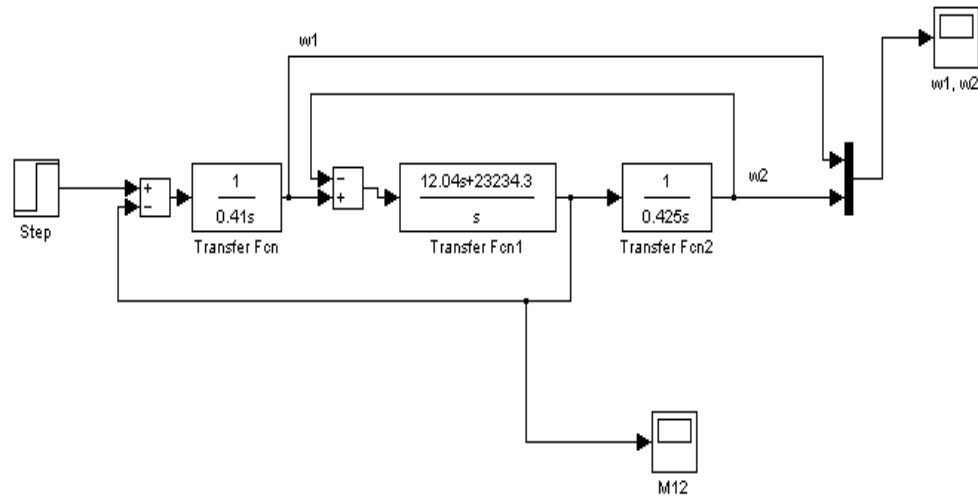


Розміщення гомогенізаційної тунельної печі в потоці
ливарного й прокатного цехів

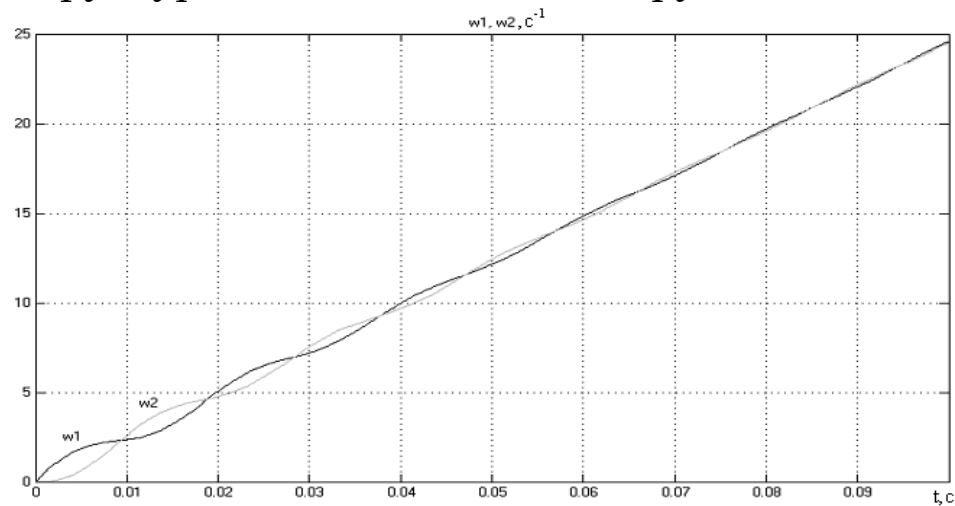


Навантажувальна діаграма технологічного процесу

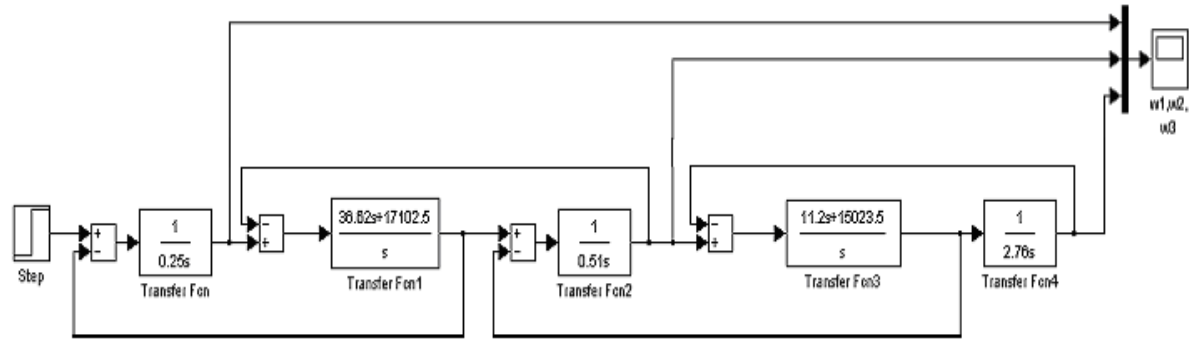




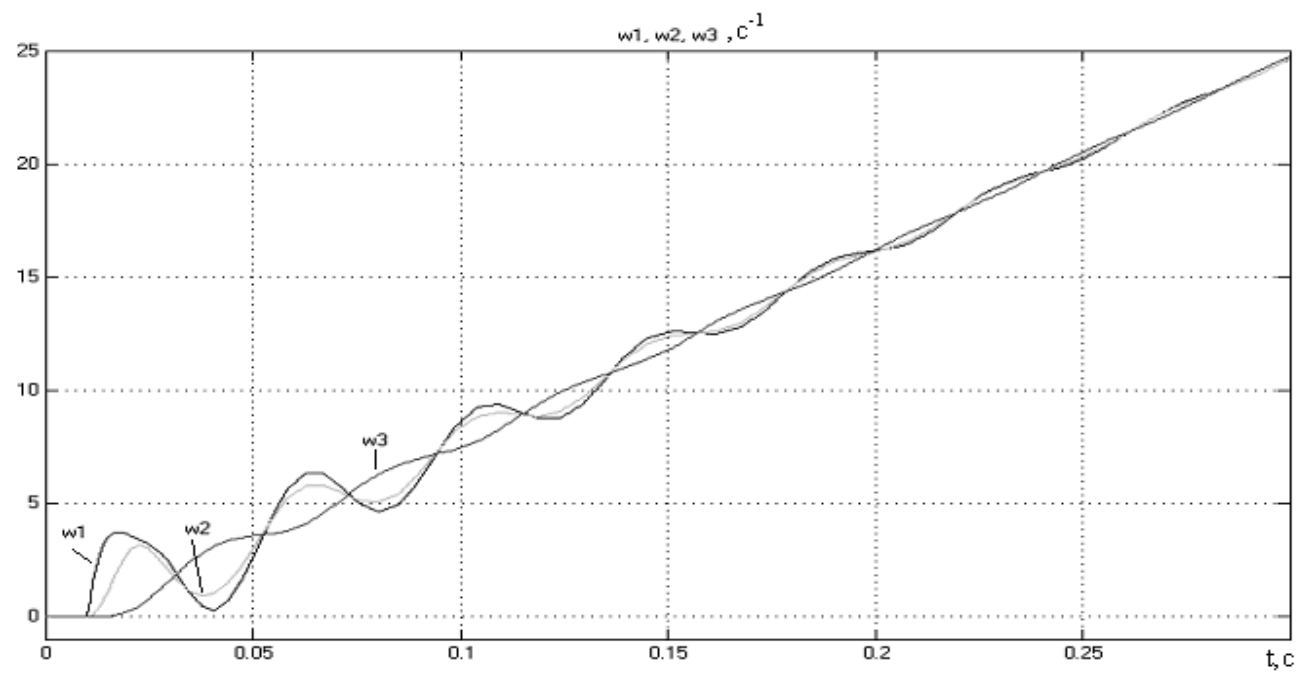
Структурна схема двомасової пружної системи



Пуск електропривода із двомасовою пружною механічною частиною із урахуванням природного демпфування

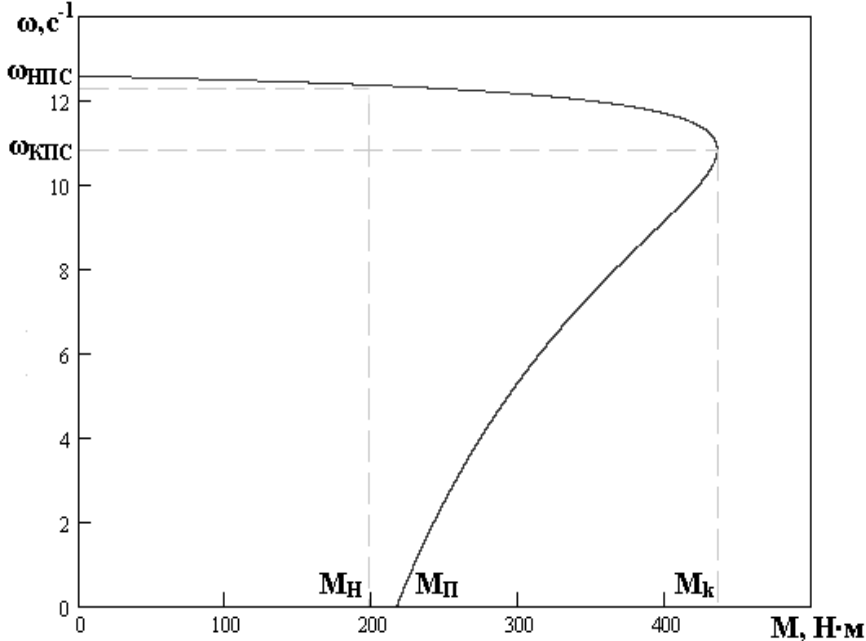


Структурна схема тримасової пружної системи

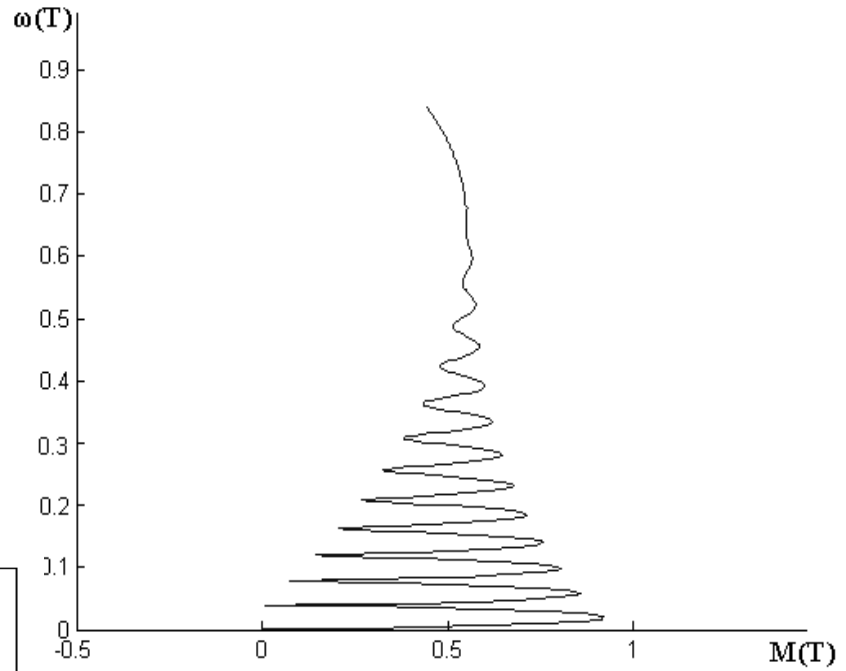


Пуск електропривода із тримасовою пружною механічною частиною з урахуванням природного демпфування

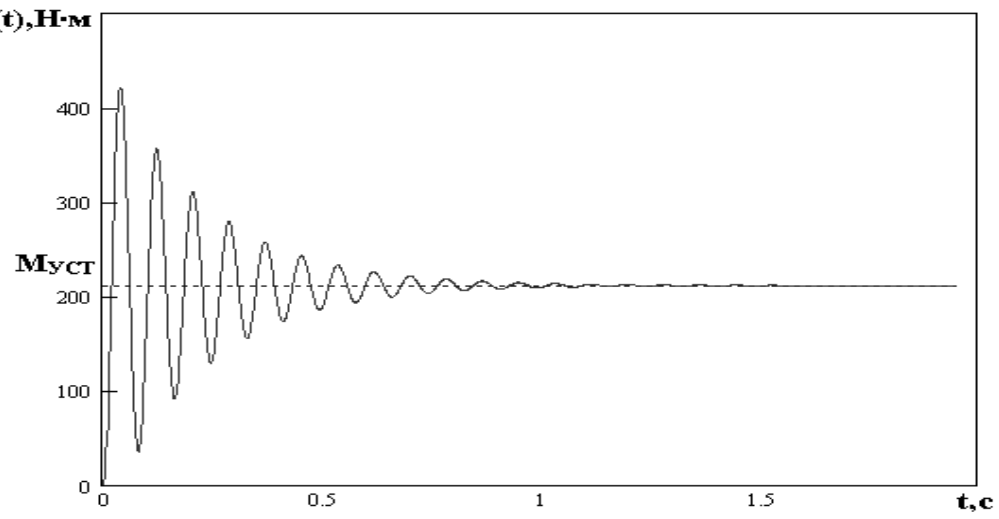




Механічна характеристика двигуна зі зниженою швидкістю

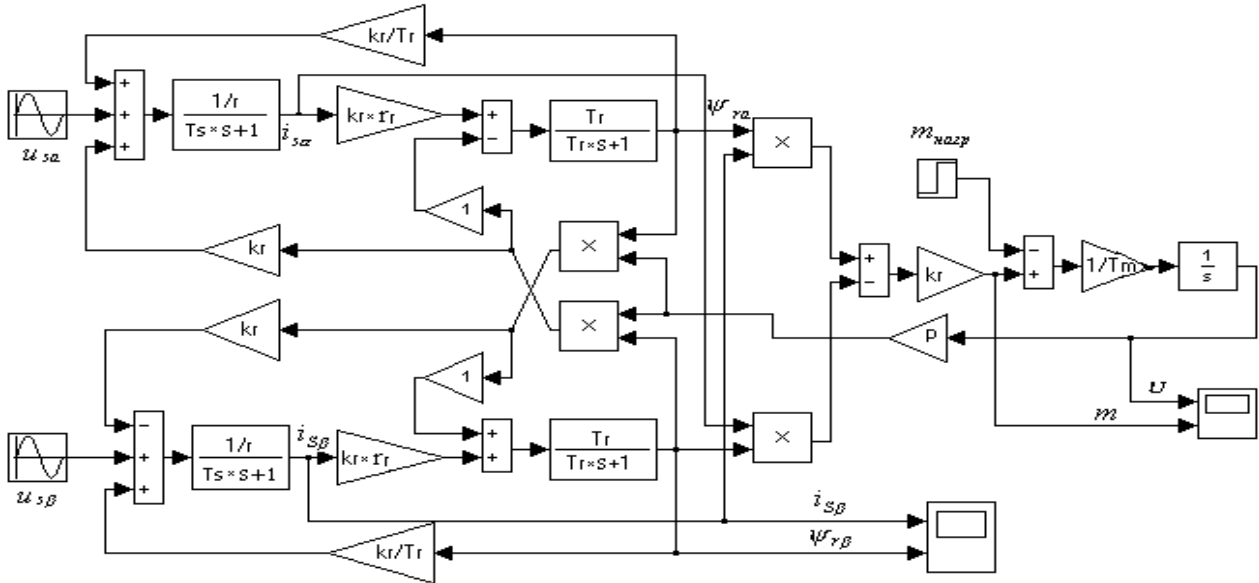


Динамічна механічна характеристика двигуна

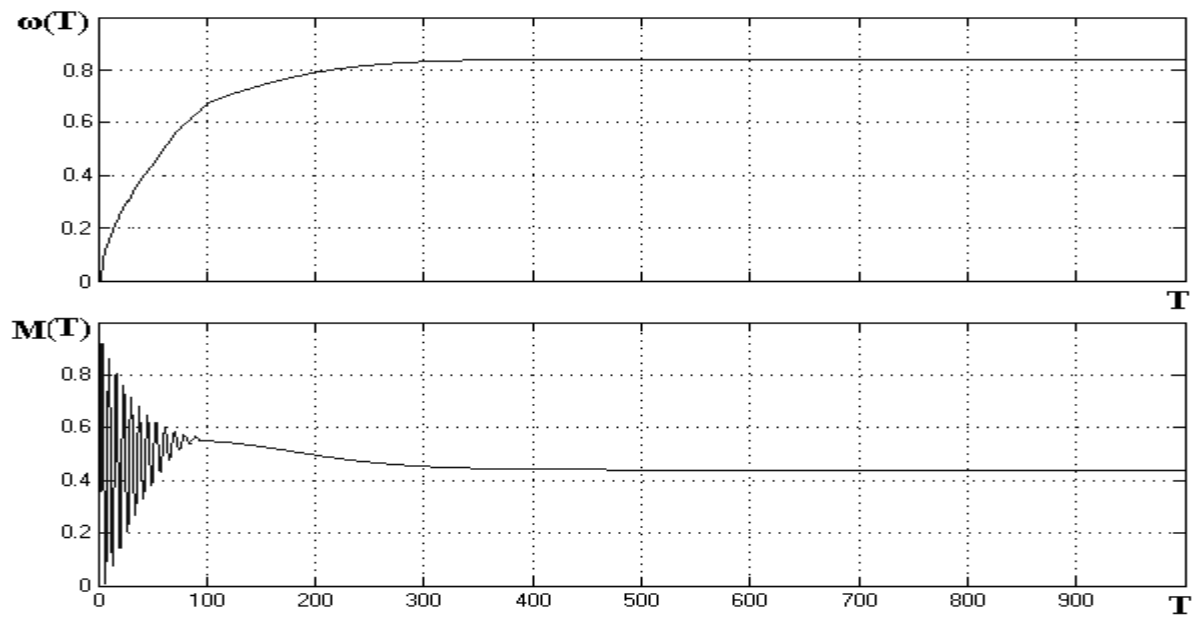


Перехідна характеристика моменту при пуску під навантаженням



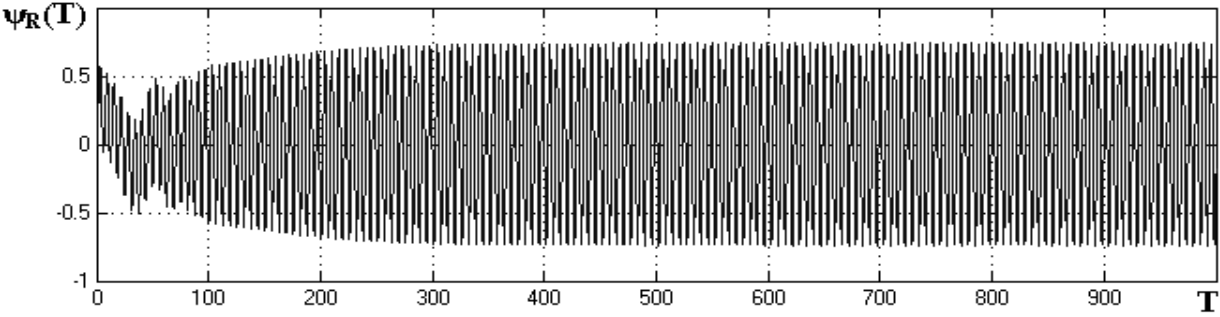
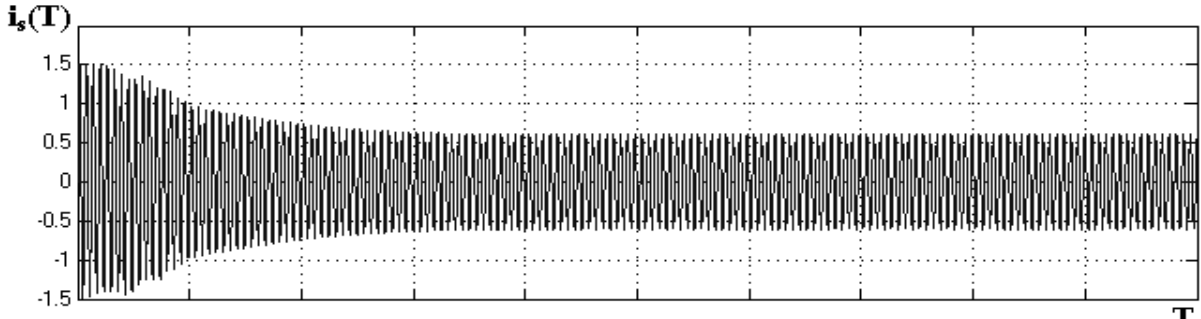


Модель АД з короткозамкненим ротором у нерухомій системі координат

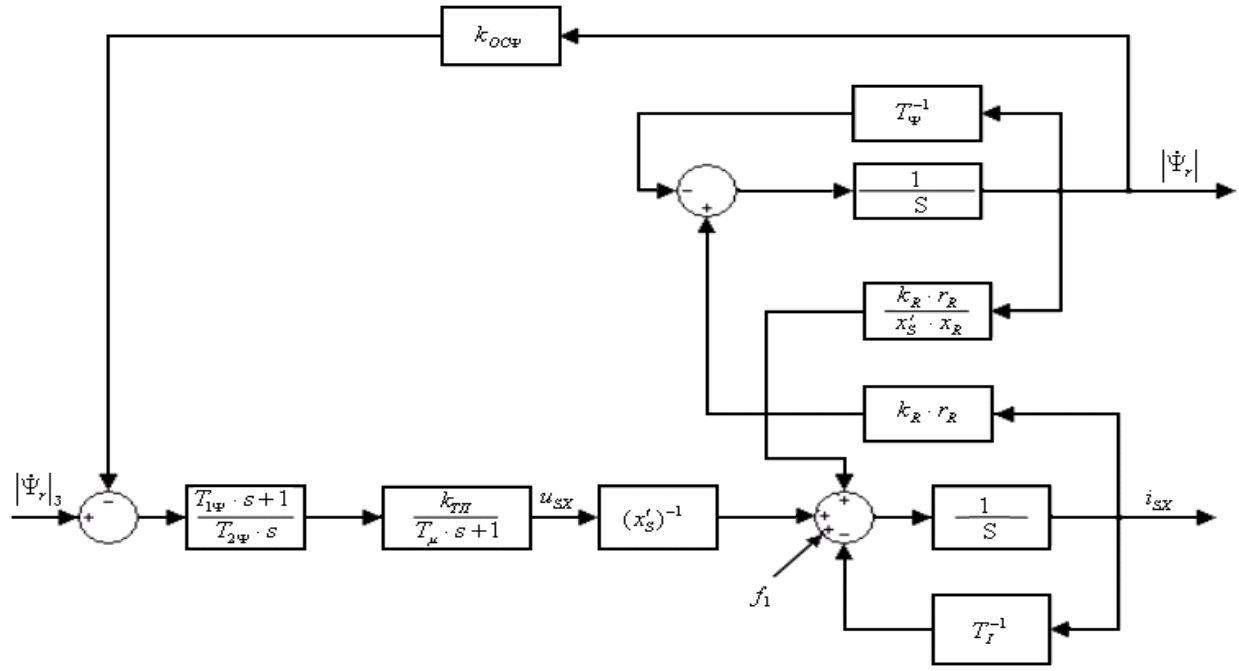


Графіки зміни швидкості й моменту в часі

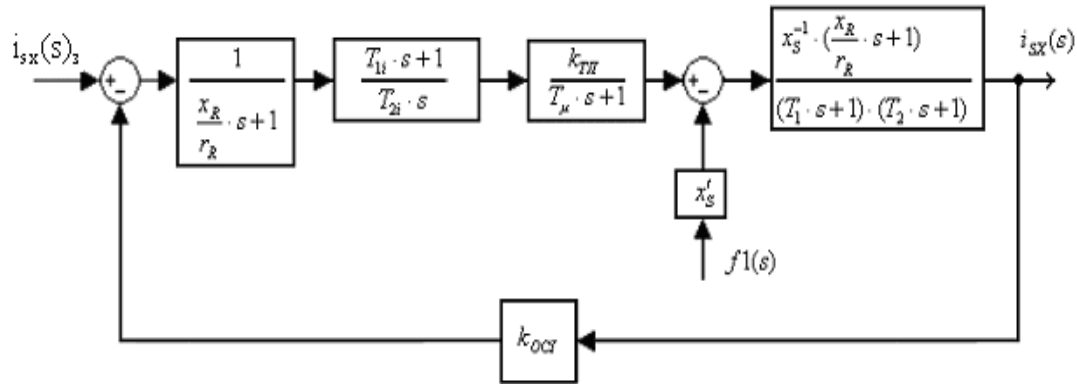




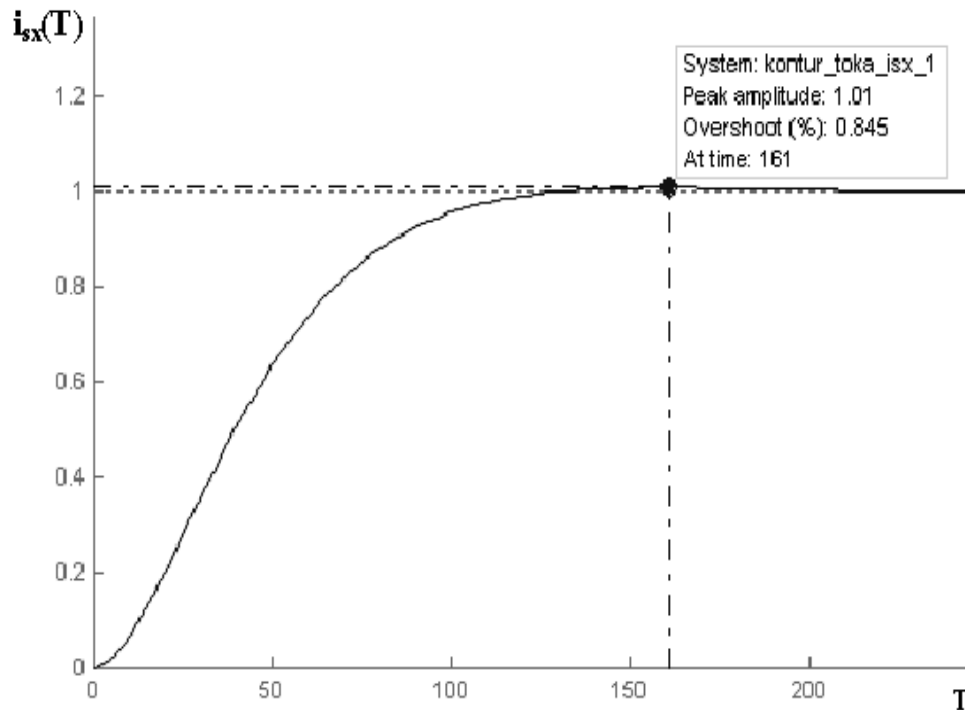
Графіки зміни струму статора й потокозчеплення ротора в часі



Структурна схема АД з контурами регулювання змінних $|\psi_r|$, i_{SX} і контуром керування u_{SX}

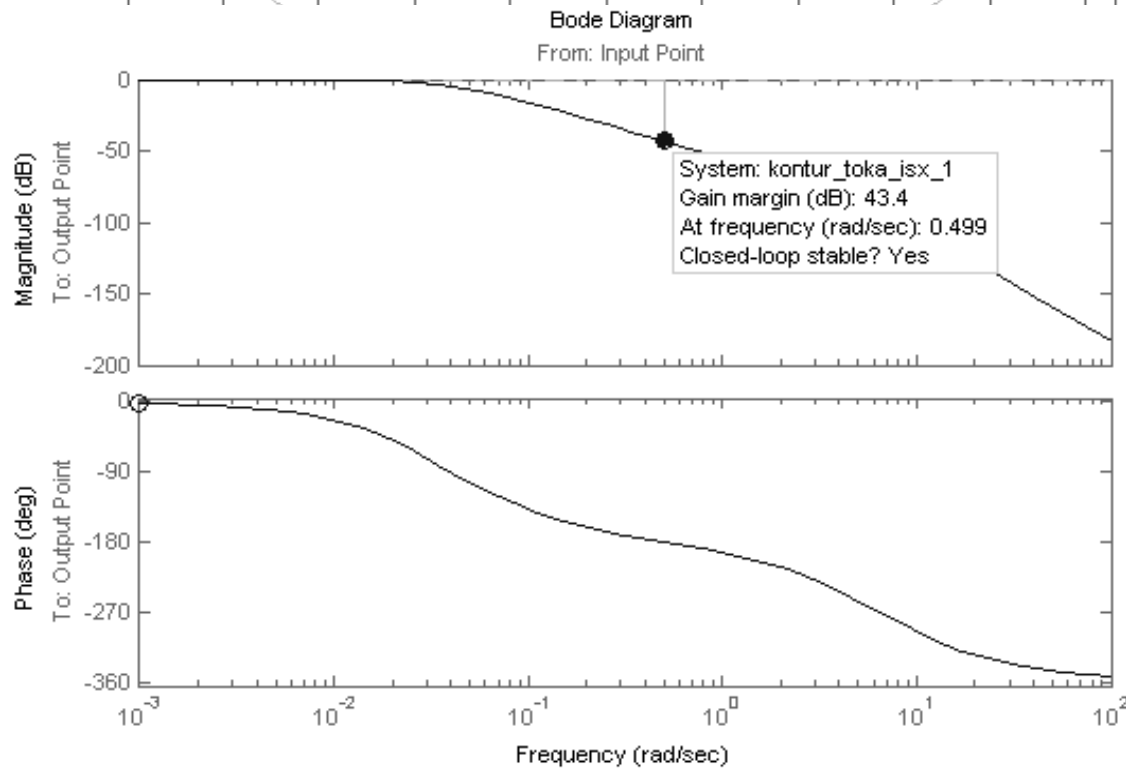
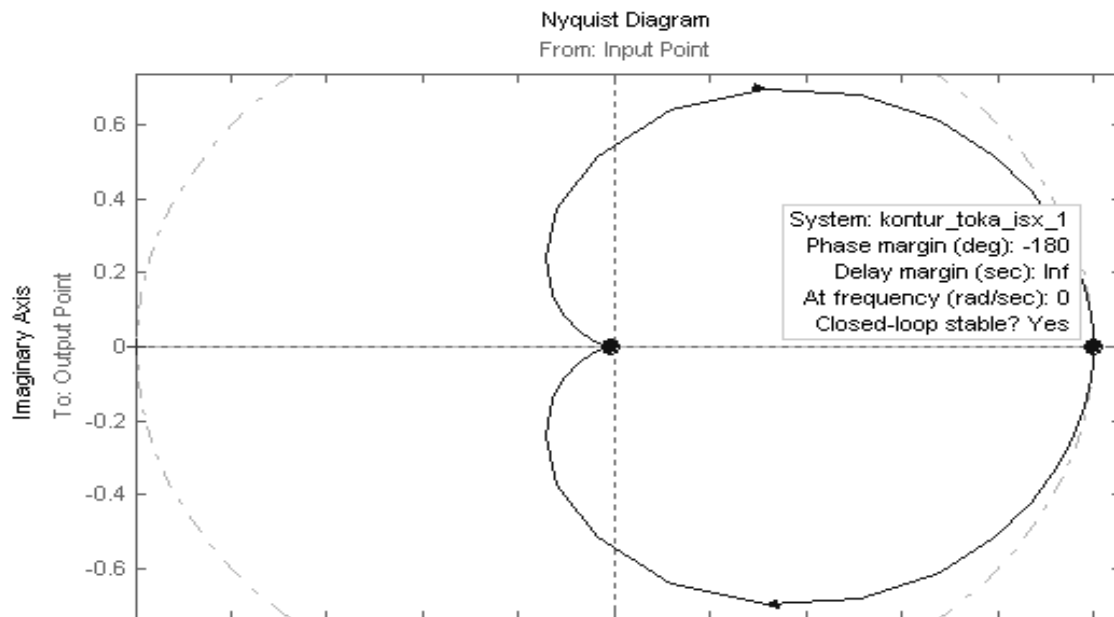


Контур регулювання
складової струму статора
(i_{sx})

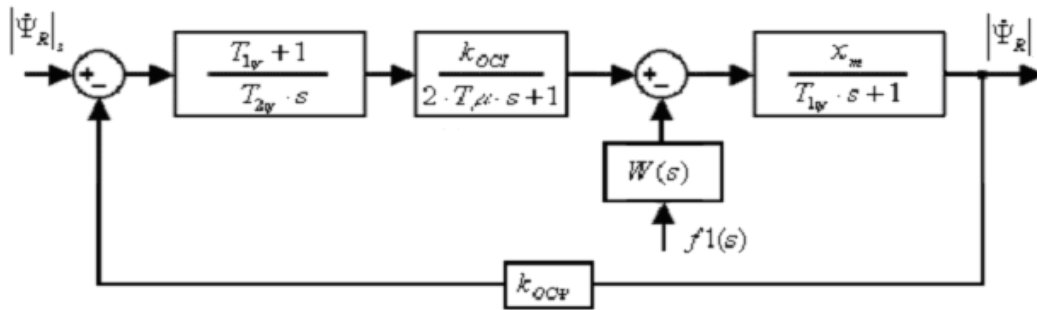


Перехідний процес
складової струму статора
(i_{sx})

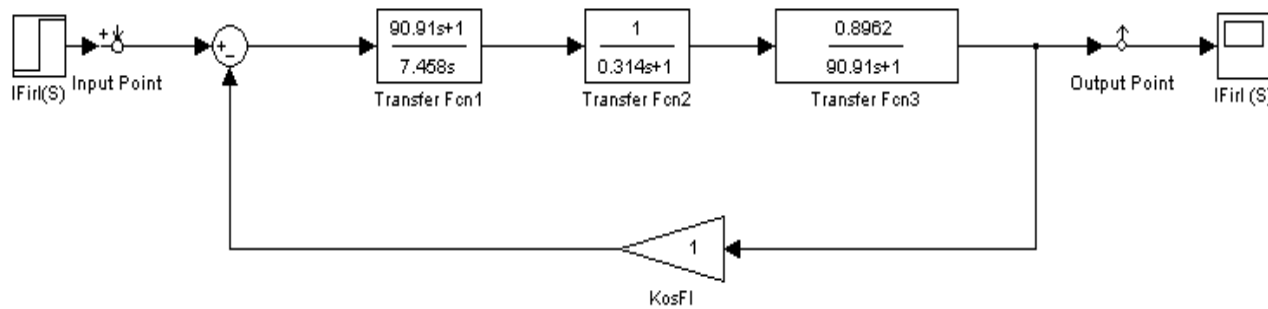
Годограф Найквіста



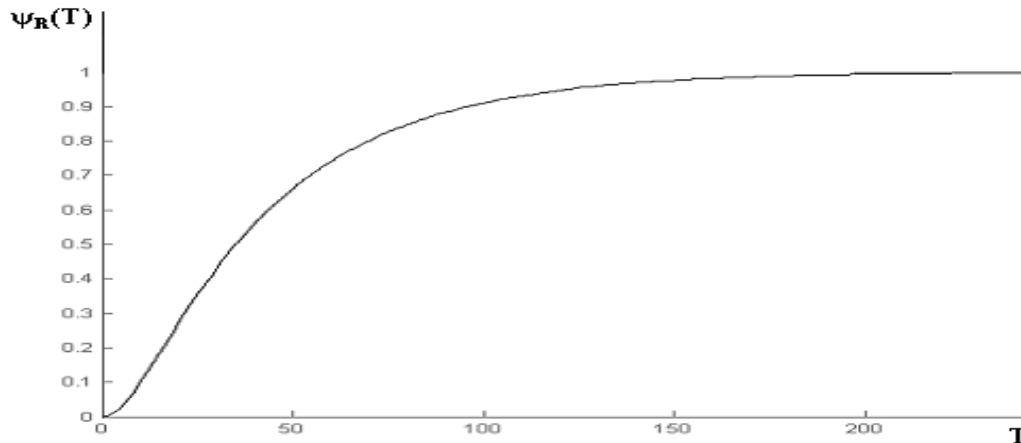
Діаграми Бодє



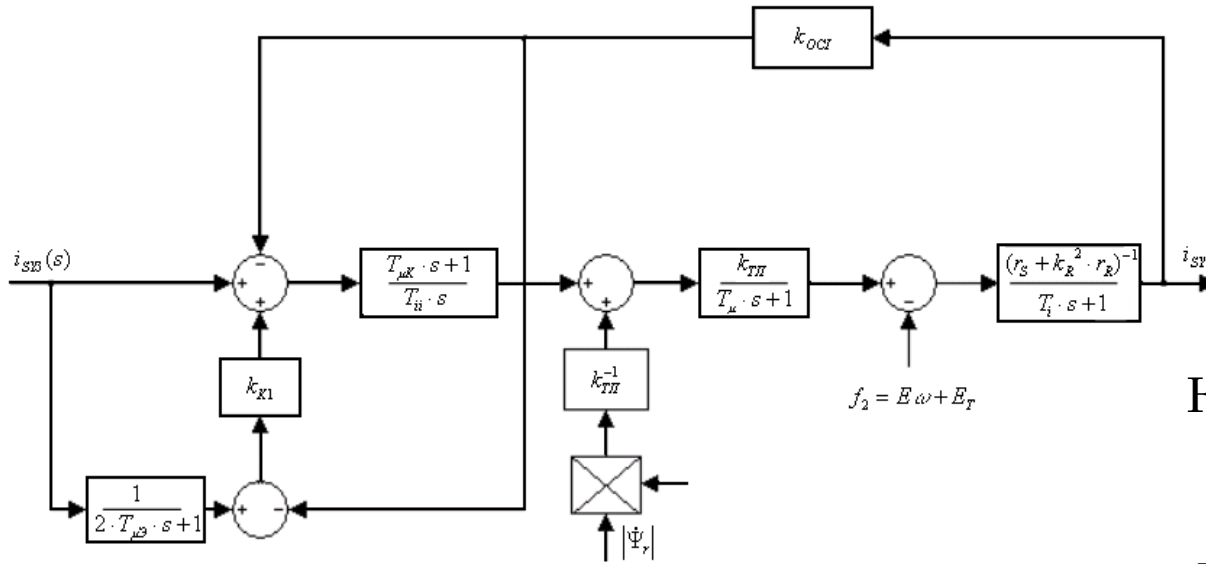
Зовнішній контур
керування модулем
потокосцеплення
ротора



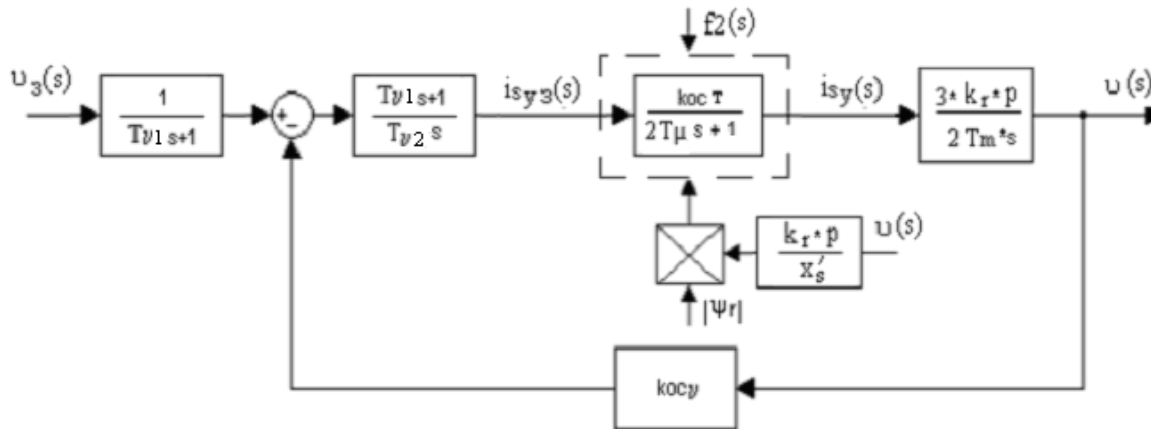
Модель зовнішнього
контру керування
модулем
потокосцеплення
ротора



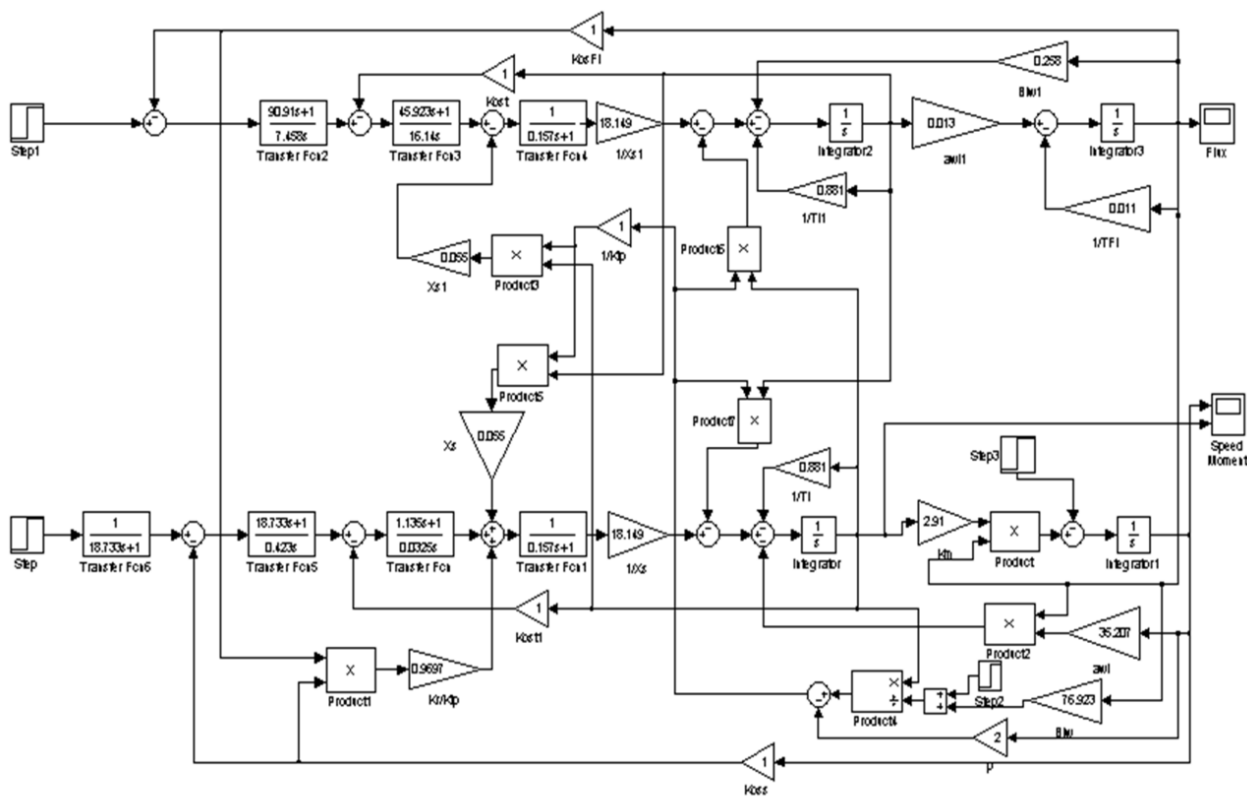
Перехідний процес
потокосцеплення
ротора



Контур складової з Пі-регулятором в основному каналі й контуром з еталонною моделлю

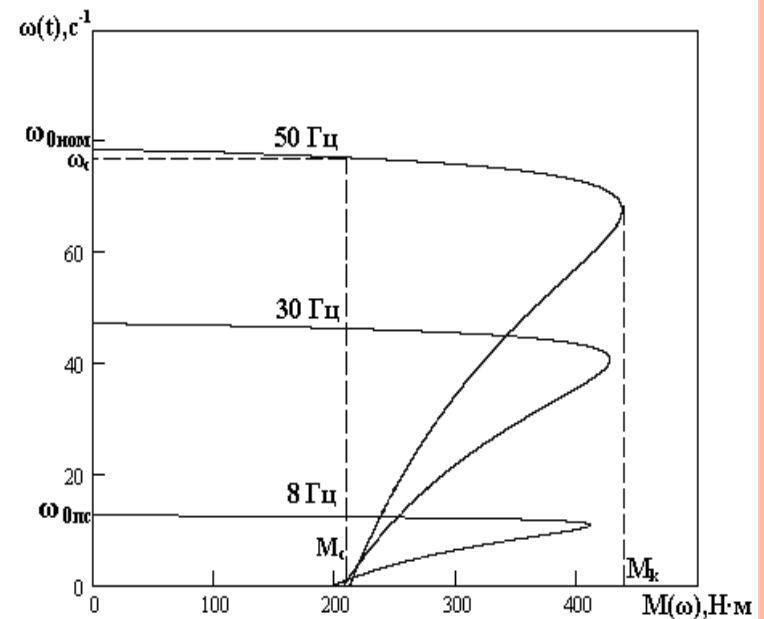


Структурна схема контуру регулювання швидкості



Математична модель асинхронного електропривода

Механічні
характеристики АД
при частотному
регулюванні швидкості



ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!

