

Міністерство освіти і науки України
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інститут: Навчально-науковий інститут комп'ютерної інженерії,
Автоматизації, робототехніки та програмування ім. П.М. Платонова
Кафедра автоматизація технологічних електромеханічних
і робототехнічних систем



**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ БАКАЛАВРА
на тему «Модернізація електроприводу штовхача металу в
прокатному стані»**

Здобувач Мазур В.А.

4 курсу АЕМ-40 групи

Керівник: Шейда Голбад К.А. д.ф.т.н., доцент

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від 16.05.2026р., протокол № 8.

В.о. завідувач кафедри АТЕіРС _____ Олексій ЖИГАЙЛО

Інститут: Навчально-науковий інститут комп'ютерної інженерії,
автоматизації, робототехніки та програмування ім. П.М. Платонова
Кафедра: автоматизація технологічних електромеханічних і робототехнічних
систем
Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр
Галузь знань: 141 Електрична інженерія

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Завідувач кафедри Е та М
д.т.н, проф. Петро ОСАДЧУК
«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА
здобувача Мазура Владислава Андрійовича

1. Тема роботи: «Модернізація електроприводу штовхача металу в прокатному стані»
Керівник роботи: Шейда Голбад Камбіз Ахмадович, д.ф.т.н., доцент.
2. Затверджено наказом ОНТУ № 58-03 від 30.01.26 р.
Строк подання студентом роботи 15.06.2026р.
3. Вихідні дані до роботи: Модернізація електроприводу штовхача металу в прокатному стані.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. Огляд літератури і порівняльний аналіз штовхачів в металургійному виробництві. Вибір штовхача для модернізації приводу. Огляд існуючої конструкції. Вибір електроприводу. Розрахункова частина. Підбір мотор-редуктора. Вибір і аналіз системи керування. Економічна частина. Охорона праці та довкілля.
5. Перелік демонстраційного матеріалу. Слайди презентації:
1.Актуальність теми. 2. Схема 3-х зонної методичної печі з штовхачем. 3. Різновиди штовхачів. 4. Механізм рейкового штовхача. 5. Результати силових розрахунків електроприводу рейкового штовхача. 6. Технічні характеристики електродвигуна. 7. Зовнішній вигляд обраного редуктора 1Ц2У-160. 8. Природна механічна характеристика двигуна. 9. Паспортні дані частотного перетворювача SINAMICS G120C. 10. Електрична схема перетворювача. 11. Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна та її параметри. 12. Схема моделювання електропривода з асинхронним електродвигуном зі фазним ротором у режимі прямого пуску. 13-15. Графіки зміни навантаження на електропривод. 16. Схема імітаційної моделі електроприводу штовхача прокатного стану з використанням частотного

перетворювача за векторним законом регулювання. 17. Графіки змін частоти обертання валу електроприводу без навантаження та при різних частотах.

6. Консультанти розділів дипломної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Аналіз літературних джерел	Шейда Голбад К. А. д.ф.т.н., доцент.	
2	Вибір електроприводу	Шейда Голбад К. А. д.ф.т.н, доцент.	
3	Визначення параметрів апаратури управління	Шейда Голбад К. А. д.ф.т.н, доцент.	
4	Економічна обґрунтованість		
5	Охорона праці		

7. Дата видачі завдання: «01» грудня 2025 р.

Керівник _____ Шейда Голбад К.А.

Завдання прийняв до виконання _____ Мазур В.А.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи магістра	Строк виконання етапів	Примітка
1	Вступ. Огляд літератури і аналіз існуючих систем.	10.02.2026	
2	Попередній розрахунок потужності електричного двигуна і вибір електроприводу та редуктора. Розрахунок механічних характеристик. Кінематична схема приводу. Розрахунок динамічного режиму електроприводу.	25.02.2026	
4	Дослідження процесів при частотному регулюванні в самому електродвигуні. Прямий пуск електродвигуна. Моделювання динамічних режимів електроприводу у середовищі MATLAB/ Simulink. Використання методів імітаційного моделювання.	18.03.2026	
5	Розрахунок економічної доцільності	30.04.2026	
6	Охорона праці та безпека життєдіяльності	25.05.2026	
7	Перевірка роботи на добротність	12.06.2026	
8	Попередній перегляд кваліфікаційної роботи бакалавра	15.06.2026	
9	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра	22.06.2026	

Здобувач-дипломник _____ Мазур В.А.

Керівник _____ Шейда Голбад К.А.

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних веб-ресурсах ОНТУ.

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.

Здобувач-дипломник _____ Мазур В.А.

РЕФЕРАТ

Дипломна робота присвячена модернізації електроприводу штовхача, який використовується в прокатному стані металургійного виробництва. Розглянуто призначення та принцип роботи штовхача. Проаналізовано існуючі конструкції штовхачів, визначено основні недоліки, які виникають під час експлуатації в умовах високих навантажень, температурних впливів та інтенсивного режиму роботи. Особливу увагу приділено питанням підвищення надійності, енергоефективності та покращення динамічних характеристик електроприводу. Розглянуто напрямки модернізації, які включають удосконалення системи керування, застосування сучасних електродвигунів та оптимізацію передавальних механізмів. Запропоновано технічні рішення, спрямовані на покращення роботи електроприводу штовхача, зменшення енергоспоживання та підвищення стабільності технологічного процесу в прокатному стані.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: електропривод, штовхач, прокатний стан, модернізація, автоматизація, енергоефективність.

ABSTRACT

The diploma thesis is devoted to the modernization of the electric drive of a pusher used in a rolling mill of metallurgical production. The purpose and operating principle of the pusher are considered. Existing pusher designs are analyzed, and the main disadvantages occurring during operation under conditions of high loads, thermal influences, and intensive operating режим are identified.

Special attention is paid to improving reliability, energy efficiency, and dynamic characteristics of the electric drive. Directions for modernization are considered, including improvements to the control system, the use of modern electric motors, and optimization of transmission mechanisms.

Technical solutions aimed at improving the performance of the pusher electric drive, reducing energy consumption, and increasing the stability of the technological process in the rolling mill are proposed.

KEYWORDS: electric drive, pusher, rolling mill, modernization, automation, energy efficiency.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	8
1.1 Загальна характеристика прокатного цеху	8
1.2 Призначення та загальна характеристика штовхача	10
1.3. Обґрунтування вибору рейкового штовхача.....	21
РОЗДІЛ 2. ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА.....	24
2.1 Статичні навантаження рейкових штовхачів.....	24
2.2 Дослідження силових навантажень на штовхач.....	26
2.3 Розрахунок потужності приводу прокатки	28
2.4 Розрахунок механічних і електромеханічних характеристик електропривода.....	32
2.5 Розрахунок механічної характеристики двигуна	33
2.6 Параметри схеми заміщення.....	35
2.6.1 Побудова природної механічної характеристики двигуна	38
2.6.2 Побудова сімейства електромеханічних характеристик двигуна	39
РОЗДІЛ 3. ВИБІР ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА	43
3.1 Визначення вихідних параметрів для вибору частотного перетворювача	43
3.2 Вибір частотного перетворювача та аналіз його характеристик.....	44
РОЗДІЛ 4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИВОДА В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB/Simulink	48

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.7			
Зм.	АРК.	№ документа	Підпис	Дата	Модернізація електроприводу штовхача металу в прокатному стані	Літера	Аркуш	Аркушів
Розробив		Мазур В.А.				у	5	70
Керівник		Шейда Голбад К.А.						
Реценз.								
Зав. кафедр		Жигайло О.М.						
						ОНТУ Гр, АЕМ4-10		

4.1 Комп'ютерне моделювання електромеханічної системи привода ...	48
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПРОЕКТУ	54
5.1 Визначення капітальних витрат	54
5.2 Експлуатаційні витрати.....	55
РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ	58
6.1 Загальні вимоги безпеки	58
6.2 Вимоги перед початком роботи	59
6.3 Вимоги під час роботи	60
6.4 Вимоги після закінчення роботи.....	61р
6.6 Шум і вібрація.....	62
6.7 Електробезпека	63
6.8 Пожежна безпека	64
6.9 Вентиляція виробничих приміщень.....	65
6.10 Охорона навколишнього середовища.....	66
ВИСНОВКИ	67
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	68

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.7			
Зм.	АРК.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробив		Мазур В.А.			Модернізація електроприводу штовхача металу в прокатному стані	Літера	Аркуш	Аркушів
Керівник		Шейда Голбад К.А.				у	5	70
Реценз.						ОНТУ Гр, АЕМ4-10		
Зав. кафедр		Жигайло О.М.						

ВСТУП

Сучасна металургійна промисловість є однією з базових галузей економіки, що визначає рівень розвитку машинобудування, будівництва та інфраструктури. Особливе місце в структурі металургійного виробництва займають прокатні стани, які забезпечують отримання готової продукції у вигляді листового, сортового та фасонного прокату. Ефективність роботи прокатних цехів значною мірою залежить не лише від основного обладнання, але й від допоміжних механізмів, що забезпечують безперервність технологічного процесу.

Одним із таких важливих елементів є штовхач металу, який використовується для переміщення заготовок між технологічними позиціями: нагрівальними печами, рольганговими лініями та прокатними станами. Штовхачі виконують функцію періодичної подачі металу та забезпечують узгоджену роботу всіх ділянок виробничої лінії. Від їх надійності та стабільності роботи залежить ритмічність усього технологічного процесу.

Електропривод штовхача є основним функціональним елементом, який забезпечує створення необхідного зусилля, регулювання швидкості переміщення та реверсування руху робочого органу. У процесі експлуатації обладнання прокатних станів електроприводи зазнають значних навантажень, що пов'язані з високими масами заготовок, ударними впливами, підвищеною температурою та агресивними умовами навколишнього середовища. Це призводить до зниження їхньої надійності, збільшення енергоспоживання та частих простоїв обладнання.

У зв'язку з цим виникає необхідність модернізації електроприводу штовхача, спрямованої на підвищення його енергоефективності, надійності, довговічності, та дозволить покращити динамічні характеристики приводу, зменшити пікові навантаження, підвищити точність позиціонування металевих заготовок та забезпечити більш плавний режим роботи механізму.

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.7	Арк
						6
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Актуальність теми обумовлена сучасним вимогам до металургійного виробництва, що передбачають підвищення продуктивності прокатних станів при одночасному зниженні енергетичних та експлуатаційних витрат. Використання застарілих систем електроприводу не дозволяє повною мірою реалізувати потенціал технологічного обладнання та відповісти сучасним вимогам автоматизації виробництва.

Метою роботи є розробка заходів з модернізації електроприводу штовхача в прокатному стані, що дозволить підвищити його техніко-економічні показники та покращити умови експлуатації обладнання.

Об'єктом дослідження є електропривод штовхача прокатного стану.

Предметом дослідження модернізація та підвищення ефективності роботи електроприводу штовхача прокатного стану

Методи дослідження. У роботі застосовано методи системного та порівняльного аналізу для дослідження конструкцій штовхачів і схем їх електроприводів. Використано аналіз науково-технічної літератури для визначення сучасного стану та напрямків удосконалення обладнання прокатних станів. Для обґрунтування технічних рішень використано методи інженерного розрахунку електромеханічних систем.

Наукова та практична новизна одержаних результатів. Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні підходів до аналізу та модернізації електроприводу штовхача прокатного стану з урахуванням сучасних вимог до енергоефективності, надійності та динамічних характеристик електромеханічних систем. Практична новизна полягає у запропонованих технічних рішеннях щодо модернізації електроприводу штовхача, які спрямовані на підвищення стабільності роботи обладнання, зменшення енергоспоживання та покращення умов експлуатації в прокатному цеху. Результати роботи можуть бути використані при модернізації існуючих систем допоміжного обладнання металургійних підприємств.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Загальна характеристика прокатного цеху

Прокатне виробництво у більшості випадків є завершальною стадією виробничого циклу на металургійних підприємствах. Саме прокат становить основну частку продукції металургійної галузі, при цьому понад 90% виплавленої сталі проходить подальшу обробку в прокатних цехах.

Споживачами прокатної продукції є практично всі ключові галузі промисловості України, зокрема машинобудування, будівництво, транспортна сфера, енергетика, авіакосмічна галузь та інші.

Сортамент прокатної продукції є надзвичайно різноманітним і включає круглі, квадратні та кутові профілі, швелери, двотаврові балки, рейки, товстолистовий і тонколистовий прокат, штаби та стрічки, безшовні й зварні труби, залізничні колеса, а також багато інших видів продукції. Загалом у промисловості виготовляються тисячі різних профілів прокату з використанням понад двох тисяч марок сталей і кольорових металів.

Листовий прокат є одним із найбільш економічно ефективних видів металопродукції. З нього виготовляють труби, гнуті профілі, різноманітні штамповані та зварні конструкції. Використання листової сталі дозволяє отримувати тонкостінні труби та легші профілі порівняно з гарячекатаними, що забезпечує зниження витрати металу на 10–15%.

У найбільш розвинених індустріальних країнах частка листового прокату становить близько 50–70% від загального обсягу виробництва прокатної продукції. Крім того, зі зростанням загального виробництва постійно збільшується випуск тонколистового прокату та металевих стрічок.

Прокатний цех є основним структурним підрозділом металургійного підприємства, у якому здійснюється пластична деформація нагрітих металевих заготовок з метою отримання готового прокату заданого профілю та розмірів. У процесі прокатки метал проходить через систему валків прокатного стану, де під дією значних зусиль змінюється його форма та переріз.

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.7	Арк
						8
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

У кожному прокатному цеху функціонує комплекс взаємопов'язаних виробничих процесів, спрямованих на виготовлення певної номенклатури металопродукції. Ці процеси реалізуються через послідовність технологічних дій, у ході яких вихідна заготовка поступово набуває заданих геометричних розмірів і необхідних фізико-механічних властивостей.

Окремі стадії обробки можуть виконуватися як у вигляді одиничних технологічних операцій, так і у вигляді серії однотипних переходів. Такі переходи зазвичай здійснюються на однотипному обладнанні, яке працює в різних режимах відповідно до технологічних налаштувань процесу.

Структура обладнання прокатного цеху формується залежно від типу продукції, що виготовляється, її розмірів, форми та технологічних особливостей обробки. Усі види прокатної продукції умовно поділяються на такі основні групи:

- довгомірний прокат, що включає арматуру, фасонні та прості профілі;
- плоский прокат, до якого належать листи різної товщини, штаби, стрічки та фольга;
- трубна продукція різних типів;
- спеціальні профілі складної конфігурації.

Сучасні прокатні цехи характеризуються високим рівнем механізації та автоматизації, що дозволяє забезпечити безперервність технологічного процесу. До складу прокатного цеху входять основні агрегати (прокатні стани) та допоміжне обладнання, яке забезпечує транспортування, нагрів, подачу та охолодження металу.

Для забезпечення виконання кожної операції в цеху використовується спеціалізоване технологічне обладнання. Водночас, важливим елементом виробничої системи є внутрішньоцехова транспортна інфраструктура, яка забезпечує переміщення заготовок між окремими агрегатами. Вона є невід'ємною складовою загального комплексу обладнання та безпосередньо впливає на ритмічність і безперервність виробництва.

Особливу роль у роботі прокатного цеху відіграють транспортні системи, такі як рольганги, штовхачі, маніпулятори та крани, які забезпечують узгоджену роботу всіх технологічних ділянок.

1.2 Призначення та загальна характеристика штовхача

Штовхач металу є допоміжним механізмом періодичної дії, який використовується для примусового переміщення металевих заготовок (блємів і слябів) між технологічними позиціями у прокатному та сталеплавильному виробництві на рольгангові лінії, у нагрівальні печі або безпосередньо в зону обробки прокатного стану.

Залежно від способу передачі зусилля розрізняють такі типи штовхачів: рейкові, гвинтові, важільно-кулачкові, ланцюгові та фрикційні.

Принцип роботи штовхача полягає у створенні поштовхового зусилля, яке передається на заготовку через робочий орган (штовхаючу балку, рейку або каретку). Рух здійснюється циклічно: робочий хід — переміщення заготовки, зворотний хід — повернення у вихідне положення.

Штовхачі є важливим елементом транспортної системи прокатного цеху, оскільки забезпечують узгодженість між окремими агрегатами та ритмічність виробничого процесу.

Штовхач виконує ряд важливих функцій у технологічному процесі прокатки:

- подача металевих заготовок у робочу зону;
- переміщення між нагрівальними печами та прокатними станами;
- синхронізація роботи рольгангових ліній;
- забезпечення безперервності технологічного потоку;
- зменшення ручної праці та підвищення рівня автоматизації виробництва.

Таким чином, штовхач є ключовим елементом допоміжного обладнання, який забезпечує ефективну роботу всього прокатного цеху.

У промисловості застосовуються різні типи штовхачів, які відрізняються конструкцією та принципом дії:

1. Рейкові штовхачі - найпоширеніший тип у прокатному виробництві. Переміщення здійснюється за рахунок рейково-шестеренної передачі. Відзначаються високою надійністю та здатністю працювати з великими навантаженнями.

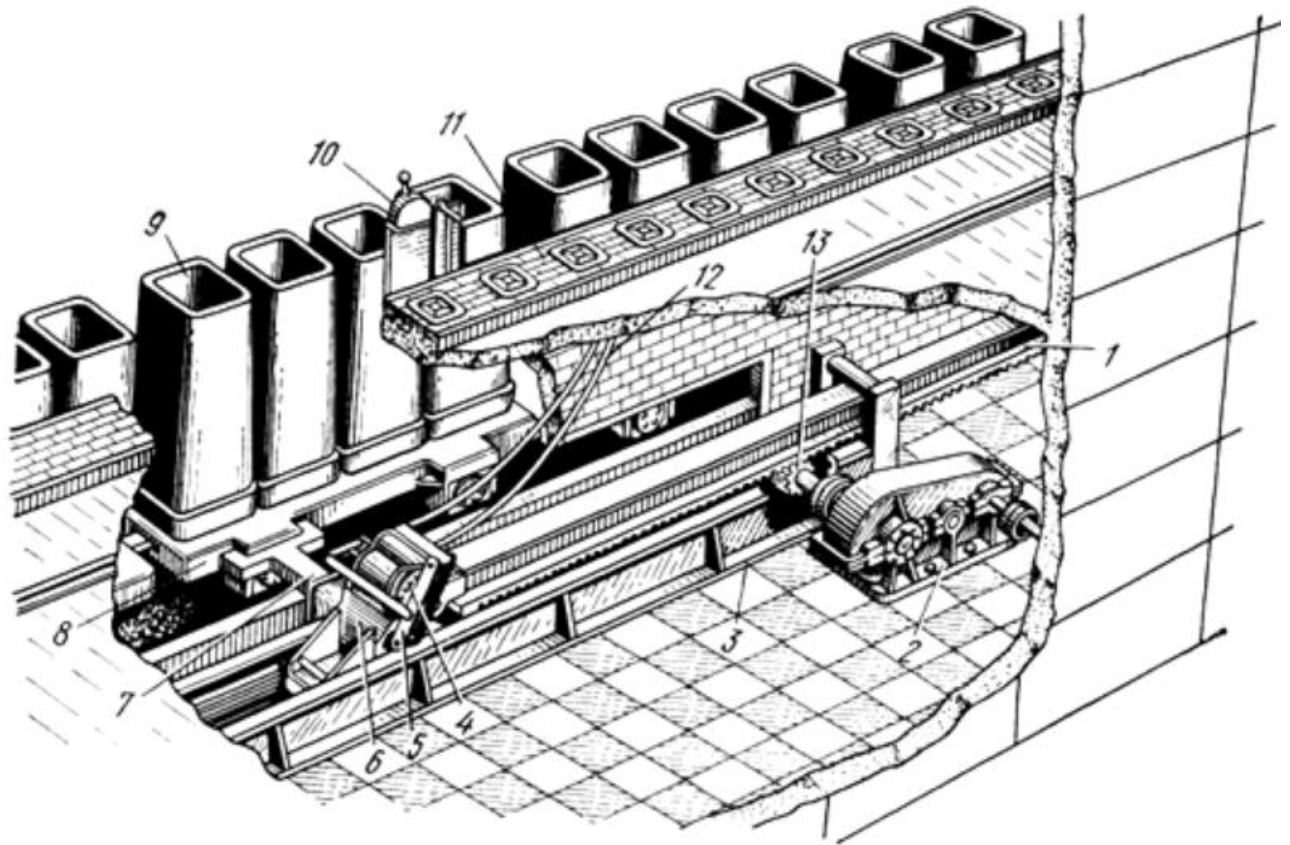


Рис. 1.1 Рейковий штовхач сталеплавильного цеху

Рейковий штовхач складається з таких основних вузлів: станини, каретки із захватом, механізму висування захвата й механізму переміщення каретки. Станина 3 служить для напрямку переміщення каретки; у її состав входять дві зварені балки, установлені на фундаменті паралельно залізничній колії, по якому пересувається состав візків 8 з виливницями 9.

Каретка 6 переміщається на роликах по направляючих станини. У каретці перпендикулярно її руху в направляючих установлений вилкоподібний захват 7, за допомогою якого каретка зчіплюється з візком 8.

Механізм висування захвата встановлений на каретці й складається із пневмоциліндра 4 і важелів 5, з'єднаних із захватом. Стиснене повітря до пневмоциліндра подається по гнучких шлангах 12. У механізм переміщення каретки входить електродвигун (на рисунку не показаний), редуктор 2, з вихідним валом якого з'єднана вал-шестірня 13, і рейка 1. Рейка з'єднується з кареткою віссю й переміщається по встановленим на станині опорним і обмежувальним роликам, які втримують неї від перекосів. Роботою штовхача управляють із пульта управління 10, розташованого на ливарній майданчику 11. Робота штовхача проходить у наступному порядку. При подачі стисненого повітря в пневматичний циліндр, шток пневмоциліндра, впливаючи на важелі, висуває в поперечному напрямку захват 5, що входить у зачеплення із припливом на платформі візка для виливниць. Після включення електродвигуна каретка рейкою пересувається в напрямні рами й за допомогою захвата штовхає состав візків, встановлюючи наступну виливницю під зливний отвір сталеливарного ковша. При досягненні кареткою крайнього положення по напрямку пересування составу захват виводиться із зачеплення, каретка переміщається в інше крайнє положення й захвата знову вводиться в зачеплення із припливом на наступному візку. У такий спосіб послідовними переміщеннями захвата й каретки весь состав з виливницями пересувається під сталеливарним ковшем.

2. Гідравлічні штовхачі — Гідравлічні штовхачі широко застосовуються в металургійній промисловості для переміщення металевих заготовок, слябів, блюмів та металобрухту в технологічних лініях. Найчастіше вони використовуються в нагрівальних і термічних печах, прокатних станах, а також у транспортних системах металургійних підприємств.

Принцип роботи гідравлічного штовхача базується на передачі енергії робочої рідини під тиском до гідроциліндра. Насосна станція створює необхідний тиск масла, яке подається в порожнину гідроциліндра. Під дією тиску поршень переміщується та передає зусилля на штовхаючий механізм, що

забезпечує переміщення металу. Після завершення робочого ходу відбувається зворотнє переміщення поршня.



Рис. 1.2 Гідравлічний штовхач



Рис.1.3 Гідравлічний штовхач для печі для повторного нагріву

Основною перевагою гідравлічних штовхачів є можливість створення

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.7

Арк

13

значних зусиль при відносно компактних розмірах приводу. Крім того, гідравлічні системи забезпечують плавність руху, точність позиціонування та стійкість до перевантажень, що особливо важливо в умовах металургійного виробництва. Такі системи добре працюють при великих динамічних навантаженнях і можуть застосовуватися для переміщення важких металевих заготовок.

До недоліків гідравлічних штовхачів належать складність обслуговування гідросистеми, необхідність контролю стану робочої рідини, можливість витоків масла та залежність ефективності роботи від температурних умов експлуатації.

3. Гвинтові штовхачі застосовуються в металургійній промисловості для переміщення металевих заготовок, деталей та допоміжних механізмів у технологічних лініях. Основною сферою їх використання є нагрівальні печі, транспортні системи та механізми подачі металу, де необхідне точне та плавне переміщення вантажів.

Принцип роботи гвинтового штовхача базується на перетворенні обертального руху електродвигуна в поступальний рух за допомогою гвинтової передачі «гвинт–гайка». Під час обертання гвинта гайка або каретка переміщується вздовж осі, створюючи необхідне штовхаюче зусилля для переміщення металу.

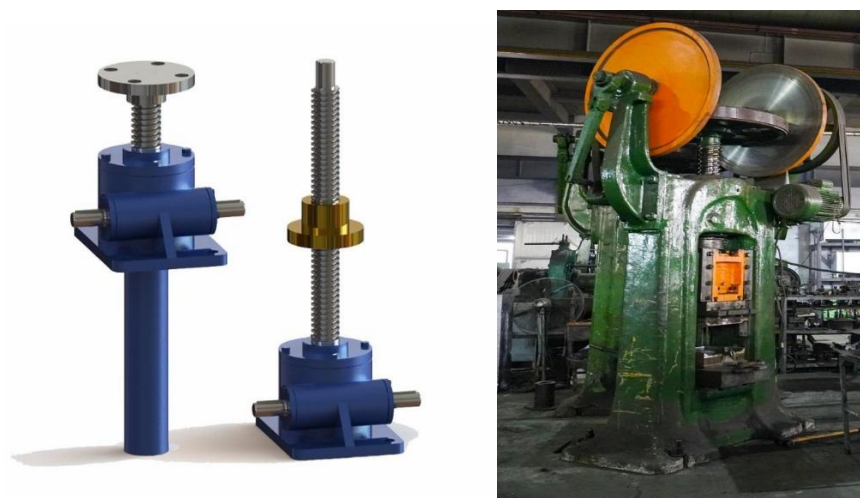


Рис. 1.4 Промисловий гвинтовий штовхач

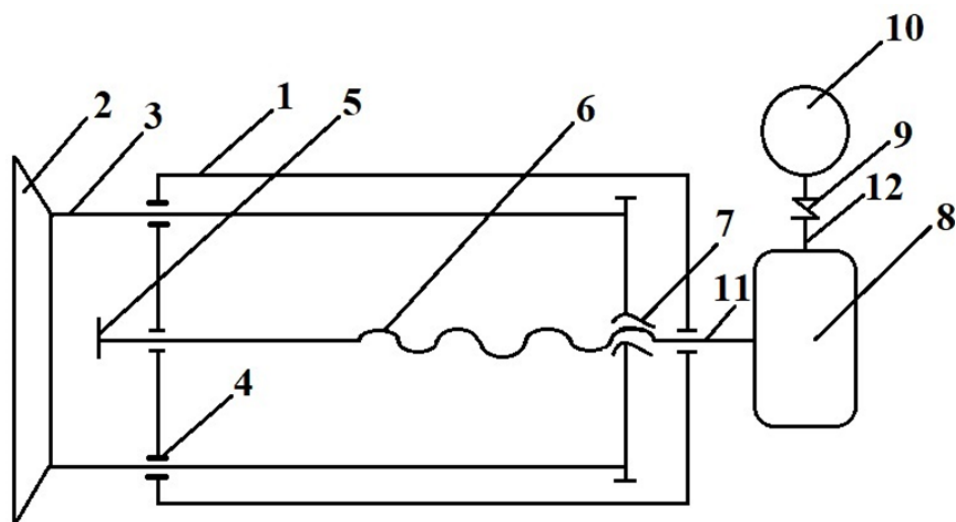


Рис. 1.5 Кінематична схема гвинтового штовхача

Основною перевагою гвинтових штовхачів є висока точність позиціонування та плавність роботи. Такі механізми забезпечують стабільне переміщення металу з можливістю точного регулювання швидкості руху. Крім того, конструкція гвинтового механізму є відносно простою та зручною для автоматизації й модернізації електропривода.

До переваг також належать компактність конструкції, можливість роботи з частотно-регульованими електроприводами та достатньо високий коефіцієнт корисної дії при правильному обслуговуванні механізму.

Недоліками гвинтових штовхачів є обмеження по навантаженню порівняно з гідравлічними системами, підвищений знос різьбових елементів при значних навантаженнях, а також необхідність регулярного змащування та технічного обслуговування.

4. Ланцюгові штовхачі широко застосовуються в металургійній промисловості застосовуються рідше, переважно для допоміжних операцій або легких заготовок та інших виробів у технологічних лініях. Такі механізми використовуються в нагрівальних печах, транспортних системах, прокатних станах та автоматизованих виробничих комплексах.

Принцип роботи ланцюгового штовхача полягає у передачі руху від електродвигуна через редуктор на приводний вал із зірочками, які

переміщують тяговий ланцюг. До ланцюга кріпиться штовхаючий елемент або каретка, що забезпечує поступальне переміщення металевих заготовок уздовж технологічної лінії.



Рис. 1.6 Ланцюговий штовхач для переміщення заготовок

Основною перевагою ланцюгових штовхачів є можливість транспортування важких вантажів на значні відстані при відносно простій конструкції механізму. Такі системи характеризуються високою надійністю, стійкістю до ударних навантажень та можливістю роботи в складних умовах металургійного виробництва.

До переваг також належать простота технічного обслуговування, можливість роботи в умовах підвищених температур та зручність модернізації електропривода шляхом застосування частотних перетворювачів.

Недоліками ланцюгових штовхачів є поступове розтягування ланцюга в процесі експлуатації, підвищений рівень шуму, а також необхідність регулярного змащування та контролю натягу ланцюгової передачі. -

Для приводу штовхачів у більшості випадків застосовуються електричні приводи, однак у окремих конструкціях можуть використовуватися також гідравлічні або пневматичні системи приводу.

5. Важільні штовхачі застосовуються в металургійній промисловості для переміщення металевих заготовок у нагрівальних печах, транспортних системах та механізмах подачі металу. Робота таких механізмів базується на використанні системи важелів, які забезпечують передачу та збільшення механічного зусилля від приводу до робочого органу штовхача.

Принцип роботи важільного штовхача полягає у передачі обертального або поступального руху від електродвигуна через редуктор і систему важелів на штовхаючий елемент. Завдяки зміні плечей важелів створюється необхідне зусилля для переміщення металевих заготовок у технологічному процесі.

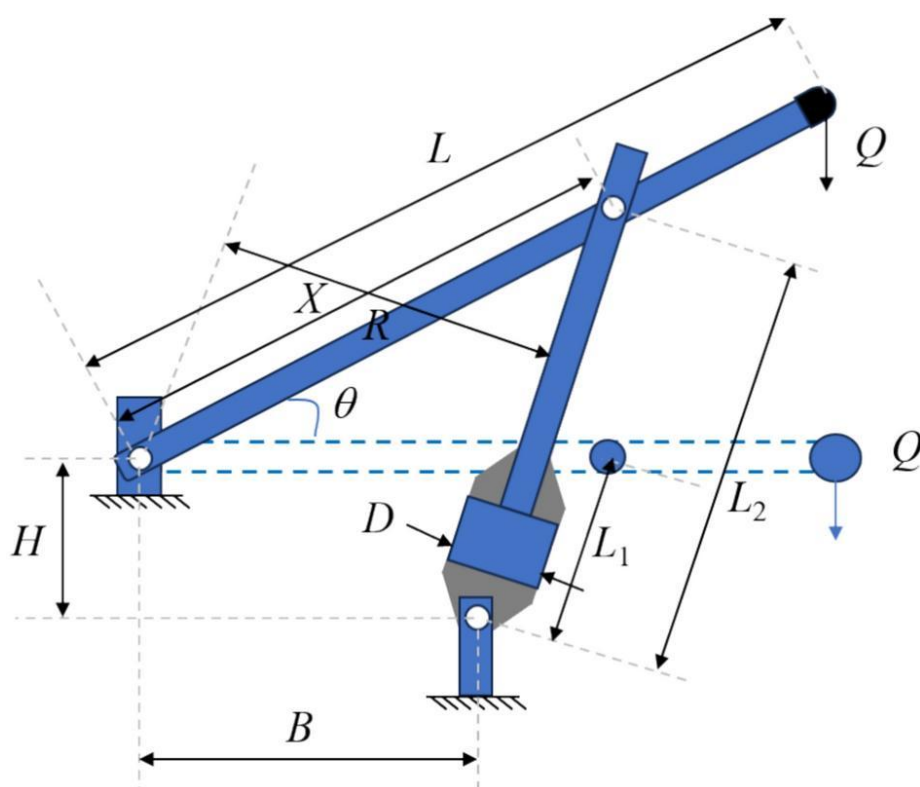


Рис. 1.7 Важільний механізм із гідроциліндром

L — довжина основного важеля; Q — навантаження або сила ваги вантажу, що прикладена до кінця важеля; θ (тета) — кут нахилу важеля відносно горизонталі; R — відстань від осі обертання до точки прикладання сили гідроциліндра; X — переміщення або робочий хід механізму; D — гідроциліндр, який створює зусилля для руху важеля; L_1 — довжина гідроциліндра або його робочого плеча; L_2 — траєкторія або зона переміщення

робочого органу; B — горизонтальна відстань між опорами механізму; H — висота встановлення осі важеля.

Під час подачі робочої рідини в гідроциліндр D його шток висувається та діє на важіль. Важіль повертається навколо нерухомої осі опори та створює переміщення робочого органу. На кінці важеля виникає сила Q , яка використовується для переміщення або підйому вантажу.

Завдяки використанню важеля механізм дозволяє: збільшити прикладене зусилля; змінити напрямок руху; забезпечити плавне переміщення вантажу.

На відміну від конструкцій штовхачів, у яких штанга з великим ходом і рухається зворотно-поступально в результаті реверсивного руху електродвигуна, у важеля штовхача зі зворотно-поступальним рухом штовхаючій пристрої відбувається при безперервному обертанні електродвигуна в одному напрямку. Зазвичай важільні штовхачі розраховані на малі і середні штовхають зусилля зі швидкостями руху $2 \dots 3$ м / хв і ходом штовхача в межах $200 \dots 600$ мм. Перетворення обертального руху двигуна в зворотно-поступальний рух штовхає пристрої в важільному штовхачі відбувається наступним чином. Електродвигун обертає вхідний вал редуктора, на вихідному валу якого розташований кривошип. Кривошип з'єднаний шатуном з важелем, закріпленим на валу.

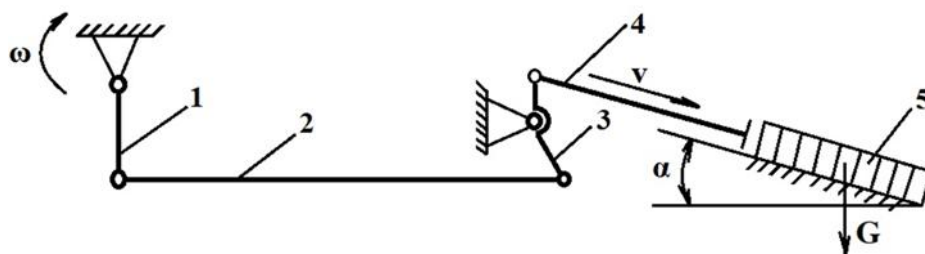


Рисунок 1.8 – Загальна схема важільного штовхача:

1–вал; 2–шатун; 3–важіль; 4–штанга; 5–редуктор; 6–вихідний вал редуктора

На цей же вал насаджені кілька коротких важелів, до яких одним кінцем шарнірно приєднані штовхають штанги. Штанги проходять через вікна печі і іншим кінцем ковзають по направляючій плиті всередині печі. При русі вперед штанги проштовхують через піч весь ряд довгих заготовок на величину ходу. При зворотному русі штанг між ними і кінцем ряду заготовок подається наступна заготівля, після чого цикл повторюється. Штанга розташована під кутом, який приблизно дорівнює куту нахилу печі. Хід штанги становить 500–550 мм. Тривалість робочого і холостого ходу 10 с.

На даний момент часу на стані 390 Макіївської філії ПАТ ЄМЗ встановлено важільний штовхувач заготовок, конструкція якого показана на рис. 1.9. За конструкцією цей штовхувач аналогічний конструкції вище описаного типу важеля штовхача. Відмінності полягають у тому, що штовхувач стану 390 має гідравлічний привід замість електромеханічного, і штанга 1 рухається в напрямних роликах 5, закріплених на рамі 4. Цей штовхувач проштовхує в піч одну заготовку, яка надходить на крокуючі водоохолоджувані балки печі.

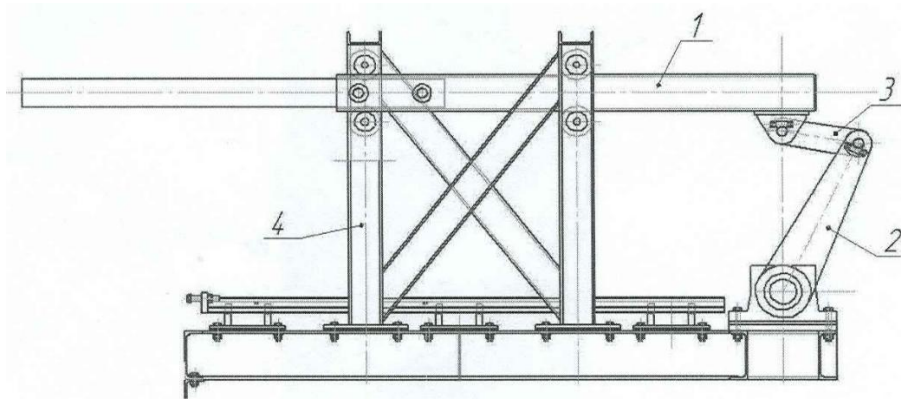


Рис. 1.9 Конструкція важільного штовхача стану 390

1—що штовхає штанга; 2—важіль; 3—тяга; 4—рама; 5—напрямні ролики; 6—вал

В процесі експлуатації цього штовхача був виявлений наступний недолік: при проштовхуванні заготовки в піч штовхають штанги 1 неодноразово вступають в роботу. Це викликано похибками при виготовленні елементів

штовхача. В результаті цього, навантаження від зусилля зіштовхування заготовки не перерозподіляється рівномірно між штовхають штангами і, відповідно, валами 6. Це призводить до скручування валів і зрізу пальців тяг 6.

Для усунення даного недоліку пропонується жорсткі тяги 3 замінити на регульовані (рис.1.10). Це рішення дозволить шляхом зміни довжини тяг відрегулювати положення штовхають штанг, щоб останні одночасно вступали в роботу. Регульована тяга складається з двох вушок, з'єднаних між собою різьбовим стрижнем. На одній стороні стрижня нарізана права різьба, на другий—ліва. Відповідно, одна проушина має праву різьбу, інша ліву. При обертанні нарізного стрижня він буде або укручуватися, або викручуватися з вушок. Таким чином, буде змінюватися довжина тяги. Для запобігання мимовільного вкручування або викручування нарізного стрижня в процесі роботи, передбачені дві стопорні гайки.

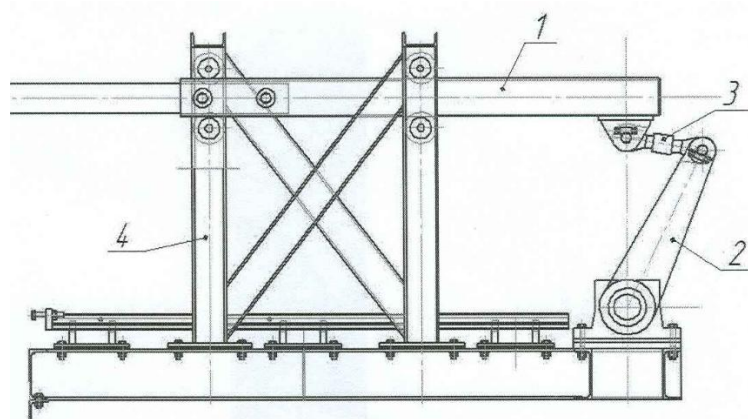


Рис. 1.10 Вдосконалена конструкція штовхача стану 390:

1—що штовхає штанга; 2—важіль; 3—регульована тяга; 4—рама; 5 – напрямні ролики; 6—вал

Основною перевагою важільних штовхачів є простота конструкції, надійність роботи та можливість створення значного механічного зусилля без складних гідравлічних систем. Такі механізми можуть працювати в умовах високих температур, запиленості та ударних навантажень, характерних для металургійного виробництва. До переваг також належать відносно невисока

вартість виготовлення та ремонту, простота технічного обслуговування і можливість використання різних типів електроприводів.

Недоліками важільних штовхачів є нерівномірність швидкості руху робочого органу, підвищені динамічні навантаження в шарнірних з'єднаннях, а також обмеження щодо точності позиціонування металевих заготовок.

1.3. Обґрунтування вибору рейкового штовхача

Широкого застосування набули рейкові штовхачі (рейково-зубчастий механізм), які здатні розвивати значні зусилля переміщення заготовок. Їх кінематична схема відзначається високою ефективністю роботи. Основною перевагою рейкових механізмів є високий коефіцієнт корисної дії ($\eta = 0,85-0,9$), а також відсутність ходової гайки, яка у гвинтових передачах піддається інтенсивному зношуванню.

Рейкові штовхачі здатні працювати в умовах високих механічних навантажень, що є характерним для прокатного виробництва. Вони забезпечують надійне переміщення важких металевих заготовок, таких як сляби та блюми. Дана конструкція відрізняється високою простотою, ремонтпридатністю та довговічністю, що є важливим фактором при безперервному виробничому процесі.

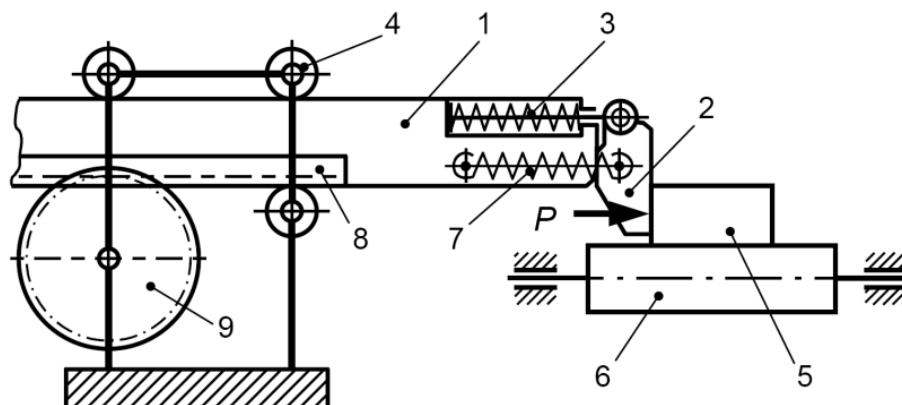


Рис. 1.1 - Схема рейкового штовхача:

1 – штовхальна штанга; 2 – штовхальні пальці; 3 – пружинні амортизатори; 4 – опорні катки; 5 – блюм; 6 – рольганг; 7 – замикальна пружина; 8 – зубчаста рейка; 9 – приводна шестерня.

Під час руху штанги вперед штовхальні пальці, розміщені в опорних катках 4, впираються у торець штанги та передають зусилля на блям 5, переміщуючи його вперед. При зворотному ході штанги, за наявності наступної заготовки на рольгангу 6, пальці відхиляються вгору, що забезпечує вільне повернення головки штанги у вихідне положення. Після цього під дією замикальної пружини 7 штовхальні пальці знову притискаються до торця штанги. З нижньої частини штанги закріплена зубчаста рейка 8, через яку передається зусилля від приводу за допомогою приводної шестерні 9.

Рейковий штовхач добре інтегрується у системи автоматизації прокатних станів та може бути ефективно поєднаний з рольганговими лініями.



Рис. 1.7 Промисловий рейковий штовхач

Штанги штовхачів виконують кованими, звареними, а для штовхачів розрахованих на мале зусилля - з катаних заготовок круглого перетину. Ковані і зварні штанги більш складні у виготовленні, складніше виходить і конструкція направляючих.

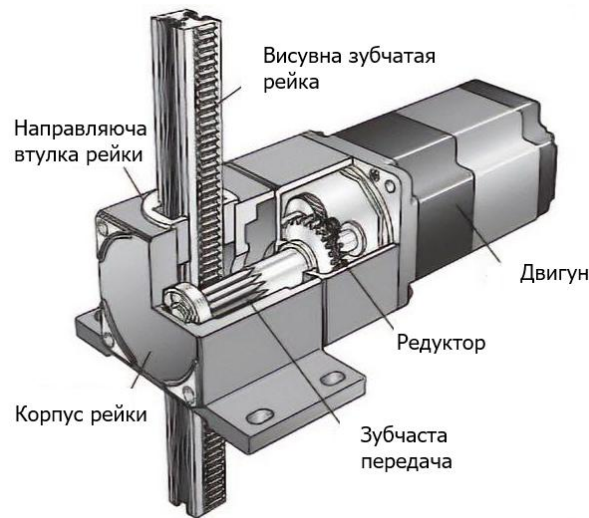


Рис. 1.10 Конструктивна схема рейкового штовхача

Штанги штовхачів круглого перетину простіше у виготовленні, але в цьому випадку зуби доводиться нарізати на них. В цьому випадку у разі спрацювання зубів штанги повинні замінюватися цілком.

Однак, застосування штанг прямокутного перетину, для рейкових штовхачів, дозволяє виконати зубчасті рейки у вигляді окремих деталей, виготовляючи їх з більш міцною і зносостійкого сталі (40Х, 40ХН), і у разі спрацювання зубів замінювати, зберігаючи важкі і дорогі штанги.

Гвинтові штовхачі, хоча і забезпечують високу точність переміщення, не є доцільними для важких умов прокатного цеху через обмежену вантажопідйомність і швидкий знос.

Гідравлічні системи, у свою чергу, потребують складнішого обслуговування та дорожчі в експлуатації.

Таким чином, рейковий штовхач є найбільш раціональним вибором для умов прокатного виробництва.

РОЗДІЛ 2. ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА

2.1 Статичні навантаження рейкових штовхачів

Електрообладнання рейкового штовхача повинно гарантувати надійну роботу в умовах повторно-короткочасного режиму, при значній кількості вмикань, а також за підвищеної запиленості, вологості та високих температур навколишнього середовища.

Робочий цикл рейкового штовхача включає два основні етапи: прямий (робочий) та зворотний ходи.

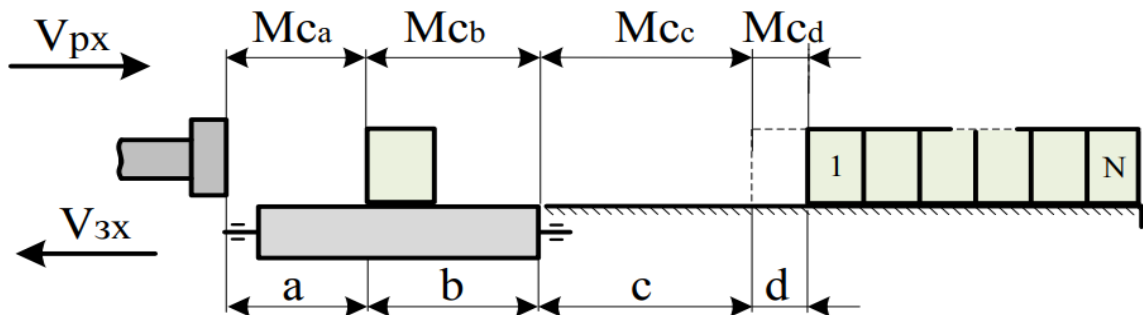


Рис. 2.1 Схема роботи рейкового штовхача

Робочий хід умовно поділяється на кілька характерних ділянок. На першій ділянці (a) штовхач здійснює підхід до заготовки, виконуючи холостий хід без навантаження. На другій ділянці (b) відбувається переміщення заготовки по рольгангу.

На ділянці (c) заготовка просувається по настилу печі до моменту її контакту з іншими заготовками, що вже знаходяться в печі. Завершальна ділянка (d) характеризується переміщенням усього ряду заготовок по настилу печі на відстань, що відповідає ширині однієї заготовки.

На ділянках робочого ходу на механізм діють навантажувальні моменти, зумовлені силами тертя в елементах системи.

Зокрема, на ділянці (a), що відповідає холостому ходу штовхача, навантаження визначається переважно силами тертя в напрямних, опорних

елементах та механічних передачах, оскільки взаємодія із заготовкою на цьому етапі відсутня.

Ділянка а:

$$M_{c_a} = \frac{G_0 \cdot \left(\mu \cdot \frac{d_{\text{ц}}}{2} + f \right)}{i_{\text{мп}} \cdot \eta_{\text{мп0}}} \quad (2.1)$$

де G_0 – вага штанги з рейкою, Н;

μ – коефіцієнт тертя кочення в підшипниках;

$d_{\text{ц}}$ – діаметри цапф напрямних роликів в підшипниках кочення, м;

f – коефіцієнт тертя кочення штанги по роликах, м;

$i_{\text{мп}}$ – передаточне число механічної передачі;

$\eta_{\text{мп0}}$ – ККД механічної передачі в режимі холостого ходу.

Ділянка б:

$$M_{c_b} = M_{c_a} \frac{G_{\text{зл}} \cdot \mu_{\text{р}} \cdot D_{\text{рш}}}{2 \cdot i_{\text{мп}} \cdot \eta_{\text{мп}}} \quad (2.2)$$

де $G_{\text{зл}}$ – вага одного злитка, Н;

$\mu_{\text{р}}$ – коефіцієнт тертя ковзання злитка по рольгангу;

$D_{\text{рш}}$ – діаметр рейкової шестерні, м;

$\eta_{\text{мп}}$ – ККД механічної передачі при номінальному навантаженні.

Ділянка с:

$$M_{c_c} = M_{c_a} \frac{G_{\text{зл}} \cdot \mu_{\text{с}} \cdot D_{\text{рш}}}{2 \cdot i_{\text{мп}} \cdot \eta_{\text{мп}}} \quad (2.3)$$

де $\mu_{\text{с}}$ – коефіцієнт тертя ковзання злитка по настилу печі.

Ділянка d:

$$M_{c_d} = M_{c_a} \frac{(N_z + 1) \cdot G_{\text{зл}} \cdot \mu_{\text{с}} \cdot D_{\text{рш}}}{2 \cdot i_{\text{мп}} \cdot \eta_{\text{мп}}} \quad (2.4)$$

де N_z – число заготовок в печі.

ККД механізму при холостому ході беруть:

$$\eta_0 = 0,5 \cdot \eta_{\text{мп}} \quad (2.5)$$

2.2 Дослідження силових навантажень на штовхач

Під час роботи на штовхач діють сили, що формують загальне навантаження привода. До основних з них належать сили інерції, сили тертя в рухомих з'єднаннях та сили опору переміщенню, які необхідно враховувати при подальшому розрахунку та виборі електродвигуна.

1. Сила тертя. Виникає між заготівлею та рольгангом:

$$F_{\text{тр}} = \mu \cdot N \quad (2.6)$$

де: $F_{\text{тр}}$ - сила тертя;

μ – коефіцієнт тертя, приймаємо 0,3

N — це нормальна реакція опори, тобто сила, з якою рольганг (ролики) діє на заготовку перпендикулярно до поверхні контакту.

Іншими словами, N дорівнює вазі заготовки (або її частині), що сприймається роликами, і визначається як:

$$N = mg \quad (2.7)$$

де m — маса заготовки,

g — прискорення вільного падіння.

Саме ця сила створює притискання заготовки до роликів і є основою для виникнення сили тертя.

Для виконання розрахунків приймаємо як вихідний матеріал гарячекатану заготовку перетином 150×150 мм. марки сталі 3сп/сп для виробництва арматури.

Кількість заготовок визначаємо з урахуванням довжини печі та кроку їх розташування. Для цього загальна довжина печі ділиться на крок між заготовками

$$n = \frac{l_{\text{печ}}}{l_{\text{шаг}}} = \frac{20}{1,3} \approx 15 \quad 2.8$$

де n – кількість заготовок, шт

$l_{\text{печ}}$ - довжина печі, м

$l_{\text{шаг}}$ - крок між заготовками, м.

Отримане значення округлюється до цілого числа, оскільки кількість заготовок є дискретною величиною.

Маса одного погонного метра ≈ 176 кг

$$m_{\text{заг}} = 3432 \text{ кг}$$

$$F_{\text{тр}} = \mu \cdot N = 0,3 \cdot 3432 \cdot 9,8 \approx 10,1 \text{ кН}$$

2. Сила інерції виникає під час розгону заготовки та протидіє зміні її швидкості. При прискореному русі вона визначається як:

$$F_{\text{ін}} = m \cdot \alpha \quad (2.9)$$

де $F_{\text{ін}}$ — сила інерції;

m — маса заготовки;

α — прискорення руху заготовки, типові значення для рольгангів і штовхачів у промисловості $0,2 \text{ м/с}^2$.

Тобто, якщо заготовка розганяється, сила інерції напрямлена протилежно прискоренню і враховується як додаткове навантаження на привід штовхача.

$$F_{\text{ін}} = m \cdot \alpha \approx 0,7 \text{ кН}$$

3. Опір деформації виникає у випадку, коли заготовка входить у зону захвату валків і зазнає пластичної деформації. У цей момент додатково до сил тертя та інерції з'являється сила, що витрачається на зміну форми металу:

$$F_{\text{прокатки}} = k \cdot b \cdot h = 100 \cdot 10^6 \cdot 0,15 \cdot 0,05 = 750 \text{ кН} \quad (2.10)$$

де k - опір деформації металу, дорівнює 100 МПа ;

b - ширина заготівлі;

h - товщина (або висота контакту), за заводськими даними $h = 0,05 \text{ м}$;

4. Сила входу у валки це зусилля, необхідне для захоплення заготовки валками та її втягування в зону пластичної деформації.

$$F_{\text{вх}} \approx (0,3 \text{ до } 0,6) \cdot F_{\text{прокатки}} = 0,3 \cdot 750000 = 225 \text{ кН} \quad (2.11)$$

5. Додаткові опори: перекося заготівлі, нерівності шляху удар при контакті з валками зазвичай враховуються коефіцієнтом запасу:

$$F_{\text{дод}} = k_{\text{зап}} \cdot (F_{\text{тр}} + F_{\text{ін}} + F_{\text{вх}}) = 10,1 + 0,7 + 225 = 235,8 \text{ кН} \quad (2.12)$$

Підсумкова сила штовхання без прокатки (тільки подача):

$$F_{\text{під}} = \mu \cdot m \cdot g + m \cdot \alpha + (k \cdot b \cdot h)$$

$$F_{\text{під}} = 986 \text{ кН}$$

2.3 Розрахунок потужності приводу прокатки

Розрахунок потужності приводу прокатки виконується на основі найбільш навантаженого режиму роботи, яким є момент входу заготовки у валки та її пластична деформація. Потужність приводу визначається як:

$$P_{\text{прокатки}} = \frac{F \cdot v}{\eta} = \frac{986 \cdot 0,5}{0,85} \approx 585 \text{ кВт} \quad (2.13)$$

де P — потужність приводу, Вт;

F — сумарна сила прокатки (сила входу у валки), Н;

v — швидкість подачі (або швидкість руху заготовки в зоні валків), м/с;

η — ККД привода (зазвичай $0,75 \div 0,9$).

Сила порядку $\approx 0,7$ МН відповідає опору прокатці і не може бути забезпечена штовхачем. Захоплення заготовки здійснюється валками, а штовхач виконує лише подачу металу.

Наведемо правильний та логічний розрахунок, де чітко розділені:

- штовхач (піч/подача)
- прокатний стан (валки)

маса заготівля у печі:

$$m = 3432 \text{ кг}$$

коефіцієнт тертя:

$$\mu = 0.3$$

Сила тертя:

$$F_{\text{тр}} = \mu \cdot N = 0,3 \cdot 3432 \cdot 9,8 \approx 10,1 \text{ кН}$$

З урахуванням запасу

$$F_{\text{штов}} = 1,5 \cdot 10,1 \approx 15,2 \text{ кН}$$

де:

v - швидкість подачі, $0,5 \text{ м/с}$

η - ККД механізму (0,7-0,9)

Довжина методичної нагрівальної печі у нашому випадку = 20 м.

Кількість заворотів у печі: 15

Загальна маса заготівлі: 3432 кг.

Маса одного погонного метра приблизно 175кг.

$$\mu=0.3$$

прискорення $\alpha = 0,2 \text{ м/с}^2$

Тоді потужність штовхача:

$$P_{\text{раз.}} = \frac{F \cdot v}{\mu} = \frac{15,2 \cdot 0,5}{0,85} \approx 9 \text{ кВт}$$

Розрахункова потужність, необхідна для виконання роботи:

$$P_{\text{раз.}} \approx 9 \text{ кВт}$$

З урахуванням коефіцієнта запасу $k_{\text{зап.}} = 1,1 \sim 1,3$

$$P_{\text{раз.}} \approx 10,8 \text{ кВт}$$

Обираємо загальнопромисловий асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором серії АІР 180 М8 - ІМ 2081 потужністю 15 кВт.



Рис. 2.2 Загальний вигляд AIR 180 M8 - IM 2081

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики електродвигуна AIR 180 M8

Потужність	15 кВт
Частота обертання поля статора n_c	750
Швидкість обертання валу n_H	730
Ковзання S_H	0,026 чи (2,6%)
Коефіцієнт потужности	0,76
Тип	Асинхронний
Напруга живлення	Трифазна, 220/380, 380/660 В
Монтажне виконання	Лапи
Номинальний струм	34,1 А
ККД η	88 %
Співвідношення моментів струму	Мп/Мн 2,0
Співвідношення моменту сили	Мmax/Мн 2,0
Відношення струму	Іп/Ін 6,6
Момент інерції	0,1 кг·м ²
Вага 86,0 кг	187,0 кг
Ізоляція класу нагріве-стійкість F	(155°C)

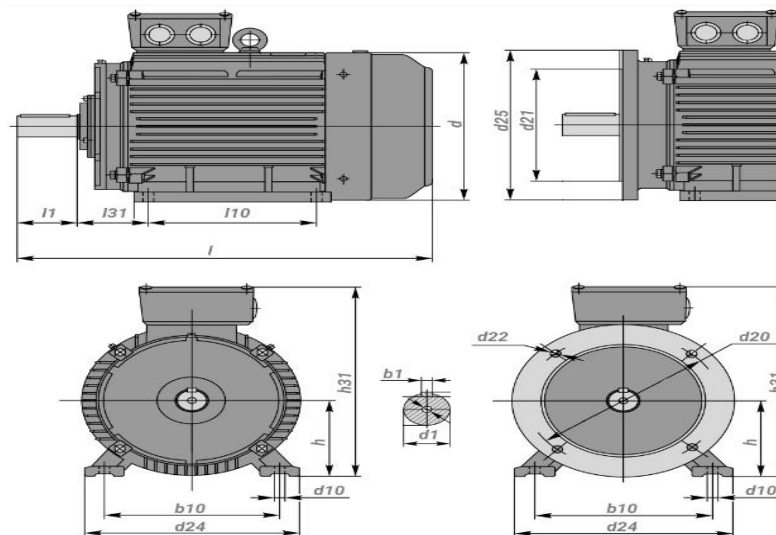


Рисунок 2.3 - Габаритні та приєднувальні розміри API 180 M8

Після виконання розрахунку необхідної потужності приводу та вибору електродвигуна, наступним етапом є підбір редуктора, який забезпечить необхідне зниження частоти обертання та передачу крутного моменту на робочий орган штовхача.

З урахуванням умов роботи приводу, необхідного передаточного числа та експлуатаційних навантажень, для привідної системи приймаємо циліндричний редуктор типу 1Ц2У-160, який забезпечує надійну роботу в умовах ударних та змінних навантажень, характерних для прокатного обладнання.



Рис. 2.4 – Зовнішній вигляд Циліндричного редуктора 1Ц2У-160

Циліндричний редуктор – це циліндричний горизонтальний двоступінчастий редуктор з міжосьовою відстанню тихохідного ступеня 160. Стандартне виконання валів - конічне, циліндричне та у вигляді частини зубчастої муфти на замовлення. Застосовується для приводу лебідок, кранів, елеваторів (норій), конвейєрів, грануляторів, дробарок, верстатів, інших машин та механізмів у межах допустимого моменту, що крутить. Призначений для експлуатації у тривалих чи повторно-короткочасних режимах роботи з постійними чи змінними навантаженнями. При роботі в реверсивному режимі, навантаження по моменту, що крутить, знижується на 30%. Передавальні числа - від 2 до 200. Мають високий ККД, стійкість до режимів роботи з частими пусками, здатні передавати велику потужність і витримувати високі навантаження.

Таблиця 2.2 - Технічні характеристики редуктора 1Ц2У-160

Параметр	Значення
Типорозмір редуктора	1Ц2У-160
Номінальне передатне число	8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40
Номінальне радіальне навантаження	9000 Н
Номінальний крутний момент на тихохідному валу	1250 Н·м
ККД	0,97
Об'єм мастила	4,5 л
Маса редуктора	95 кг

2.4 Розрахунок механічних і електромеханічних характеристик електропривода

Вихідні каталожні дані асинхронного двигуна АІР 180 М8

Потужність:

$$P_{\text{дв}} = 15 \text{ кВт}$$

Номінальна напруга:

$$U_{1\text{н}} = 380 \text{ В}$$

Динамічний момент інерції двигуна

$$j_{\text{дв}} = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Частота напруги живлення

$$f_{1\text{н}} = 50 \text{ Гц}$$

Синхронна частота обертання

$$n_0 = 750 \text{ об/хв}$$

Номінальні оберти двигуна

$$n_1 = 730 \text{ об/хв}$$

Відносний пусковий момент

$$M_{\text{п}} = 2,0$$

Відносний критичний момент

$$M_{\text{к}} = 2,0$$

Відносний пусковий струм

$$k_i = 6,6$$

$$\cos \varphi = 0,87$$

$$\sin \varphi = \sin(a \cos(\cos \varphi)) = 0,49305 \quad (2.14)$$

Коефіцієнт корисної дії електродвигуна:

$$\eta = 0,88$$

Номінальний струм двигуна

$$I_{\text{ном}} = 34,1 \text{ А}$$

Часткове навантаження

$$p' = 0,59$$

$$\beta = 1,5$$

$$\cos \varphi_{p'} = 0,99 \cdot \cos \varphi = 0,8613 \quad (2.15)$$

$$\eta_{p'} = 0,86$$

2.5 Розрахунок механічної характеристики двигуна

Синхронна кутова частота обертання двигуна

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 750}{30} = 78,54 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (2.16)$$

Номінальна кутова частота обертання

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_{\text{ном}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 730}{30} = 76,445 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (2.17)$$

Номінальне ковзання

$$S = \frac{n_0 - n_1}{n_0} = \frac{3000 - 2930}{3000} \cdot 100\% = 0,02667 \quad (2.18)$$

Номінальний момент двигуна

$$M_H = \frac{P_{\text{дв.н}}}{\omega_H} = \frac{15000}{76,445} = 196,22 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.19)$$

Номінальні фазна напруга і номінальний фазний та лінійний струми статора

$$U_{1\text{фн}} = \frac{U_{1\text{лн}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219,393 \text{ В} \quad (2.20)$$

$$I_{1\text{фн}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{15000}{3 \cdot 219,393 \cdot 0,87 \cdot 0,88} = 29,768 \text{ А} \quad (2.21)$$

$$I_{1\text{лн}} = I_{1\text{фн}} = 29,768 \text{ А}$$

Струм фази статора при частковому завантаженні

$$I_{1p'} = \frac{p' \cdot P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos \varphi_{p'} \cdot \eta_{p'}} = \frac{15000}{3 \cdot 219,393 \cdot 0,8613 \cdot 0,86} = 18,153 \text{ А} \quad (2.22)$$

Критичне ковзання

$$S_K = S_H \frac{[m_K + \sqrt{m_K^2 - [1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (m_K - 1)]}]}{1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (m_K - 1)} =$$

$$0,02667 \frac{2,0 + \sqrt{2,0^2 - [1 - 2,0 \cdot 0,02667 \cdot 1,5 \cdot (2,0 - 1)]}}{1 - 2,0 \cdot 0,02667 \cdot 1,5 \cdot (2,0 - 1)} = 0,1089 \quad (2.23)$$

$$S_K = 0,1089$$

Струм холостого ходу

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1p'}^2 - \left[\frac{p' \cdot (1 - S_H)}{1 - p' \cdot S_H} I_{1\text{фн}} \right]^2}{1 - \left[\frac{p' \cdot (1 - S_H)}{1 - p' \cdot S_H} \right]^2}} = \sqrt{\frac{21,354^2 - \left[\frac{0,59 \cdot (1 - 0,02667)}{1 - 0,59 \cdot 0,02667} \cdot 28,967 \right]^2}{1 - \left[\frac{0,59 \cdot (1 - 0,02667)}{1 - 0,59 \cdot 0,02667} \right]^2}} = 6,5019 \text{ А} \quad (2.24)$$

де чисельник

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.7	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		34

$$I_1 p'^2 - \left[\frac{p' \cdot (1 - S_H)}{1 - p' \cdot S_H} \cdot I_{1\Phi H} \right]^2 \rightarrow 18,153^2 - \left[\frac{0,59 \cdot (1 - 0,02667)}{1 - 0,59 \cdot 0,02667} \cdot 29,768 \right]^2 = 27,884 \quad (2.25)$$

знаменник

$$1 - \left[\frac{p' \cdot (1 - S_H)}{1 - p' \cdot S_H} \right]^2 = 1 - \left[\frac{0,59 \cdot (1 - 0,02667)}{1 - 0,59 \cdot 0,02667} \right]^2 = 0,21222 \quad (2.26)$$

2.6 Параметри схеми заміщення

Активний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора

$$C_1 = 1 + \left(\frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1\Phi H}} \right) = 1 + \frac{6,5019}{2 \cdot 6,6 \cdot 29,768} = 1,0165 \quad (2.27)$$

$$R'_2 = \frac{3 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot (1 - S_H)}{2 \cdot M_K \cdot P_{дв.н} \cdot C_1 \cdot \left(\beta + \frac{1}{S_K} \right)} = \frac{3 \cdot 219,393^2 \cdot (1 - 0,02667)}{2 \cdot 2,0 \cdot 15000 \cdot 1,0165 \cdot \left(1,5 + \frac{1}{0,1089} \right)} = 0,21222 \text{ Ом} \quad (2.28)$$

Активний опір статора в номінальному режимі

$$R_1 = R'_2 \cdot \beta \cdot C_1 = 0,21222 \cdot 1,5 \cdot 1,0165 = 0,32358 \text{ Ом} \quad (2.29)$$

Індуктивний опір короткого замикання в номінальному режимі

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{S_K} \right)^2 - \beta^2} = \left(\frac{1}{0,02667} \right)^2 - 1,5^2 = 9,0594 \quad (2.30)$$

$$X_{KH} = R'_2 \cdot \gamma \cdot C_1 = 0,21222 \cdot 9,0594 \cdot 1,0165 = 1,9543 \text{ Ом} \quad (2.31)$$

Індуктивний опір розсіяння обмотки статора в номінальному режимі

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{KH} = 0,42 \cdot 1,9543 = 0,82081 \text{ Ом} \quad (2.32)$$

Індуктивність обмотки статора, обумовлена потоком розсіяння в номінальному режимі

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,82081}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0026127 \text{ Гн} \quad (2.33)$$

Приведений до обмотки статора індуктивний опір розсіяння обмотки ротора в номінальному режимі

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.7	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		35

$$X'_{2\sigma} = 0,58 \cdot \frac{X_{\text{кн}}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{1,9543}{1,0165} = 1,1151 \text{ Ом} \quad (2.34)$$

Приведена індуктивність обмотки ротора, обумовлена потоком розсіяння в номінальному режимі

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{1,1151}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0035495 \text{ Гн} \quad (2.35)$$

$$E_1 = \sqrt{(U_{1\text{фн}} \cdot \cos \varphi - I_{1\text{фн}} \cdot R_1)^2 + (U_{1\text{фн}} \cdot \sin \varphi - I_{1\text{фн}} \cdot X_{1\sigma})^2} \rightarrow$$

$$\sqrt{(219,393 \cdot 0,87 - 29,768 \cdot 0,32358)^2 + (219,393 \cdot 0,49305 - 29,768 \cdot 0,82081)^2} =$$

$$= 199,65 \quad (2.36)$$

Індуктивний опір контура намагнічування

$$X_\mu = \frac{E_1}{I_0} = \frac{199,65}{6,5019} = 30,706 \text{ Ом} \quad (2.37)$$

Результуюча індуктивність

$$L_m = \frac{X_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{30,706}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,09774 \text{ Гн} \quad (2.38)$$

Результуюче потокозчеплення

$$\psi_{2\text{н}} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m = \sqrt{2} \cdot 6,5019 \cdot 0,09774 = 0,89873 \quad (2.39)$$

Результуюча індуктивність обмотки статора

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 0,0026127 + 0,09774 = 0,100353 \text{ Гн} \quad (2.40)$$

$$L'_2 = L'_{2\sigma} + L_m = 0,0035495 + 0,09774 = 0,101289 \text{ Гн} \quad (2.41)$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 + L'_2} = 1 - \frac{0,09774^2}{0,100353 + 0,101289} = 0,952623 \quad (2.42)$$

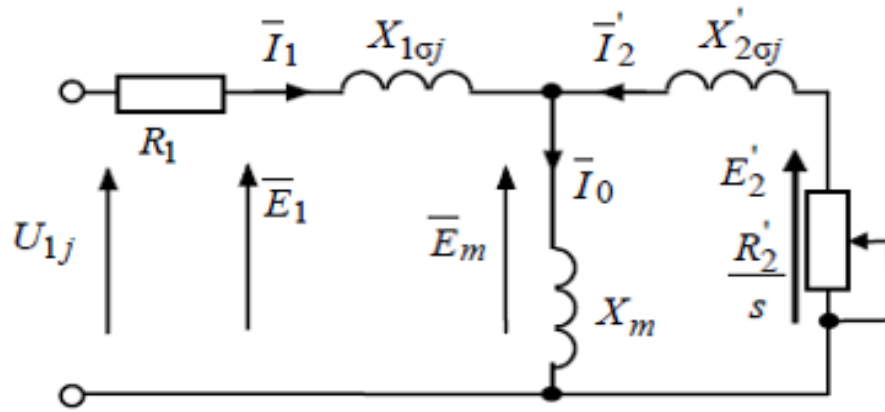


Рис. 2.6 Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

$$X_{1\sigma} = 0.82081$$

$$L_m = 0.09774$$

$$L_{1\sigma} = 0.002143$$

$$R_1 = 0.32358$$

$$L'_{2\sigma} = 0.003550$$

$$X_{KH} = 1.9543$$

$$X_\mu = 30.706$$

$$R'_2 = 0.212220$$

$$\eta = \frac{22}{25} = 0.88$$

$$n_{\text{НОМ}} = 730 \text{ об/хв}$$

Номінальний електромагнітний момент на валу двигуна

$$M' = \frac{3 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot S_H \left[X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{S_H} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{S_H \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} \rightarrow$$

$$\frac{3 \cdot 219.393^2 \cdot 0.212220}{78.54 \cdot 0.02667 \left[1.9543^2 + \left(0.32358 + \frac{0.212220}{0.02667} \right)^2 + \left(\frac{0.32358 \cdot 0.212220}{0.02667 \cdot 30.706} \right)^2 \right]} = 202.073 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.43)$$

$$M'' = \left(\frac{3}{2} \right) \cdot 4 \cdot \left(\frac{L_m}{L_m + L'_{2\sigma}} \right) \cdot \psi \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1\Phi H}^2 - I_0^2} \rightarrow M'' = 213.766 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.44)$$

2.6.1 Побудова природної механічної характеристики двигуна

Задаємо діапазон та крок зміни ковзання

$$S = 0.00001, 0.01..1$$

$$M_{em}(s) = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot S_H \left[X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{S_H} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{S_H \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} \rightarrow$$

$$n(s) = n_0 \cdot (1 - s) \quad (2.45)$$

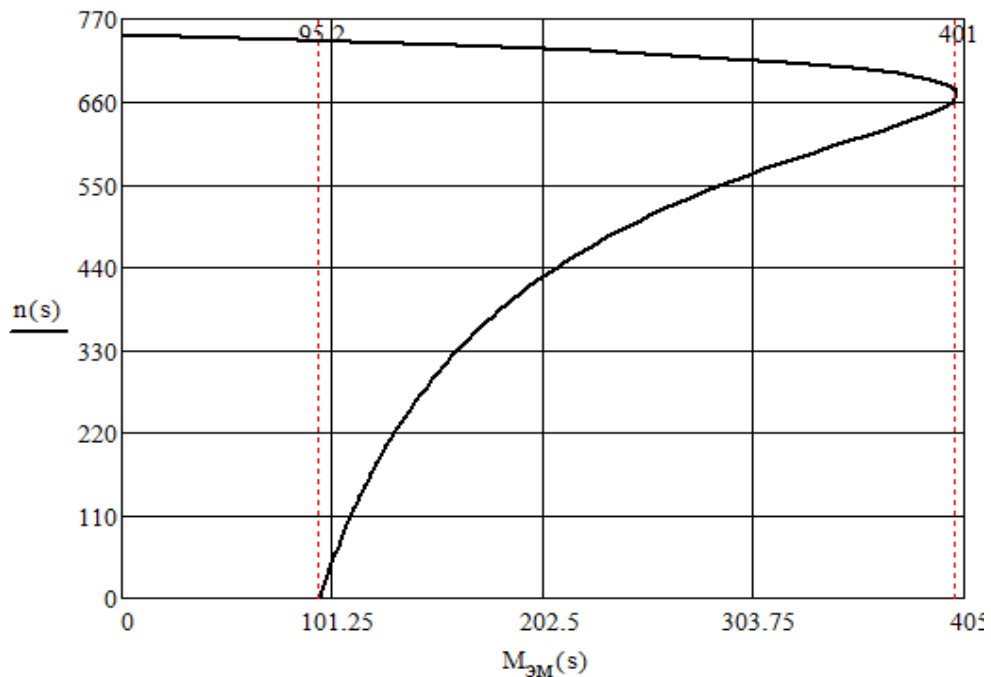


Рис. 2.7 – природна механічна характеристика двигуна

Порівняння розрахункових і паспортних даних двигуна

$$\omega_H = 76,445 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$M_{HP} = \frac{P_{дв.н}}{\omega_H} = \frac{15000}{76.445} = 196,22 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.46)$$

$$M_{к.пас} = m_k \cdot M_{нп} = 2,0 \cdot 196.22 = 392,44 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.47)$$

$$M_{п.пас} = m_{п} \cdot M_{нп} = 2,0 \cdot 196.22 \text{ Н} \cdot \text{м} = 392,44 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.48)$$

$$M_k = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_1 \cdot \sqrt{(R_1 + R_1'^2 + X_{кH}^2)}} \rightarrow$$

$$\frac{3 \cdot 219,393^2}{2 \cdot 78.54 \cdot 1.0165 \cdot (0.32358 + \sqrt{(0.32358^2 + 1.9543^2)})} = 392,43 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.49)$$

$$A = \frac{R_1}{R_1'} = \frac{0.32358}{0.21222} = 1,5247 \quad (2.50)$$

$$M_{ном} = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + A \cdot S_k)}{\frac{S_k}{S_H} + \frac{S_H}{S_k} + 2 \cdot A \cdot S_k} = \frac{2 \cdot 392.43 \cdot (1 + 1.5247 \cdot 0.1089)}{\frac{0.1089}{0.02667} + \frac{0.02667}{0.1089} + 2 \cdot 1.5247 \cdot 0.1089} = 196.381 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.51)$$

$$S_{п} = 1$$

$$M_{пуск} = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + A \cdot S_k)}{\frac{S_k}{S_{п}} + \frac{S_{п}}{S_k} + 2 \cdot A \cdot S_k} = \frac{2 \cdot 117,33 \cdot (1 + 1,5303 \cdot 0,1191)}{\frac{0,1089}{1} + \frac{1}{0,1089} + 2 \cdot 1,5247 \cdot 0,1089} = 95.096 \quad (2.52)$$

Розрахунок коефіцієнтів для рівняння навантажувальної компресорної характеристики

$$a = \frac{0.8 M_{нп}}{n_{ном}^2} \rightarrow \frac{0.8 \cdot 196.22}{730^2} = 0,00029457 \quad (2.53)$$

$$c = 0,2 \cdot M_{нп} \rightarrow 0.2 \cdot 196.22 = 39,244$$

Залежність моменту від швидкості для компресорного типу навантаження

$$M(n) = a \cdot n^2 + c \rightarrow 0,00029456933758678926 \cdot n^2 + 39,244$$

Задаємо діапазон та крок зміни швидкості $n = 0,100 \dots 760$

2.6.2 Побудова сімейства електромеханічних характеристик

двигуна

Залежність швидкості двигуна від частоти та ковзання

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.7	Арк
						39
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$n_1(s, f_1) = n_0 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right) \cdot (1 - s) \quad (2.54)$$

Механічний електромагнітний момент двигуна

$$M_{em}(s, f_1) = \frac{3 \cdot \left(U_{1\phi H} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2 \cdot R'_{l2}}{\omega_0 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right) \cdot S \left[\left(X_{KH} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2 + \left(R_1 + \frac{R'_{l2}}{S}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_{l2} \cdot f_{1H}}{S_H \cdot X_{\mu} \cdot f_1}\right)^2 \right]} \quad (2.55)$$

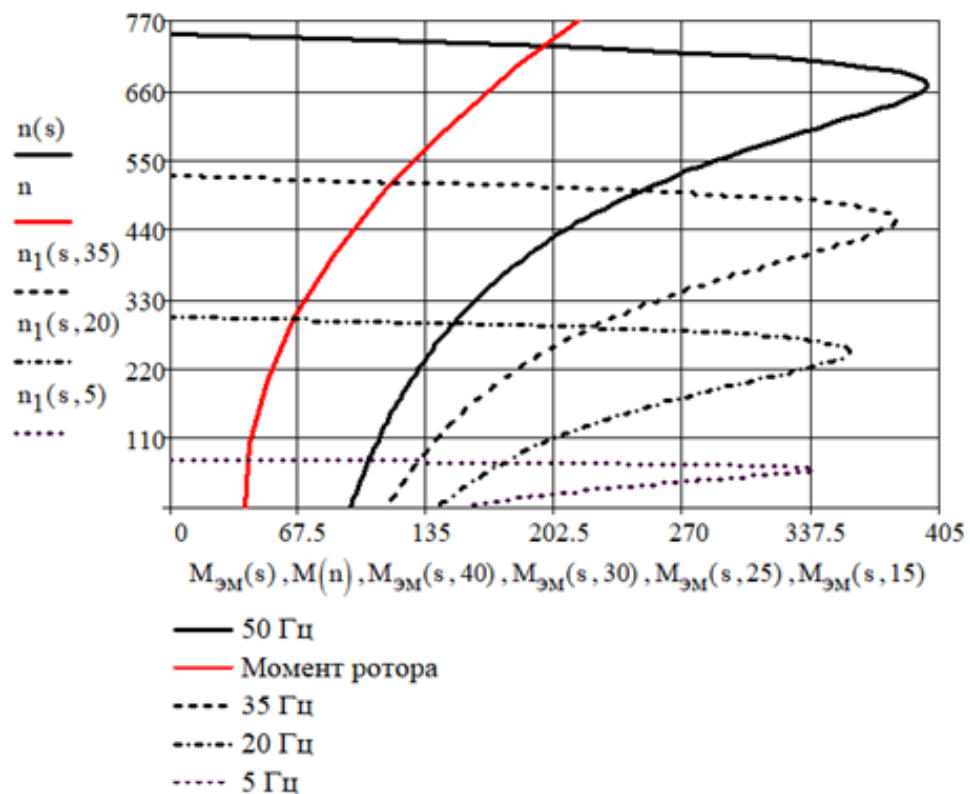


Рис. 2.8 - Графіки механічних характеристик двигуна і штовхача при регулюванні за векторним законом та різними частотами.

Побудова електромеханічної характеристики двигуна

$$S = 0.00001, 0.01..1$$

$$n(s) = n_0 \cdot (1 - s)$$

$$I'_2(s) = \frac{U_{1\phi H}}{\sqrt{X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_{l2}}{S_H}\right)^2}} \quad (2.56)$$

$$\sin \varphi (s) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{S_H}\right)^2}} \quad (2.57)$$

$$I_0 = \frac{65019}{10000} = 6.5019 \text{ A}$$

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I'_2(s)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I'_2(s) \cdot \sin \varphi (s)} \quad (2.58)$$

$$I_{HOM} = 34.1 \text{ A}$$

$$I_{H1}(s) = I_{HOM}$$

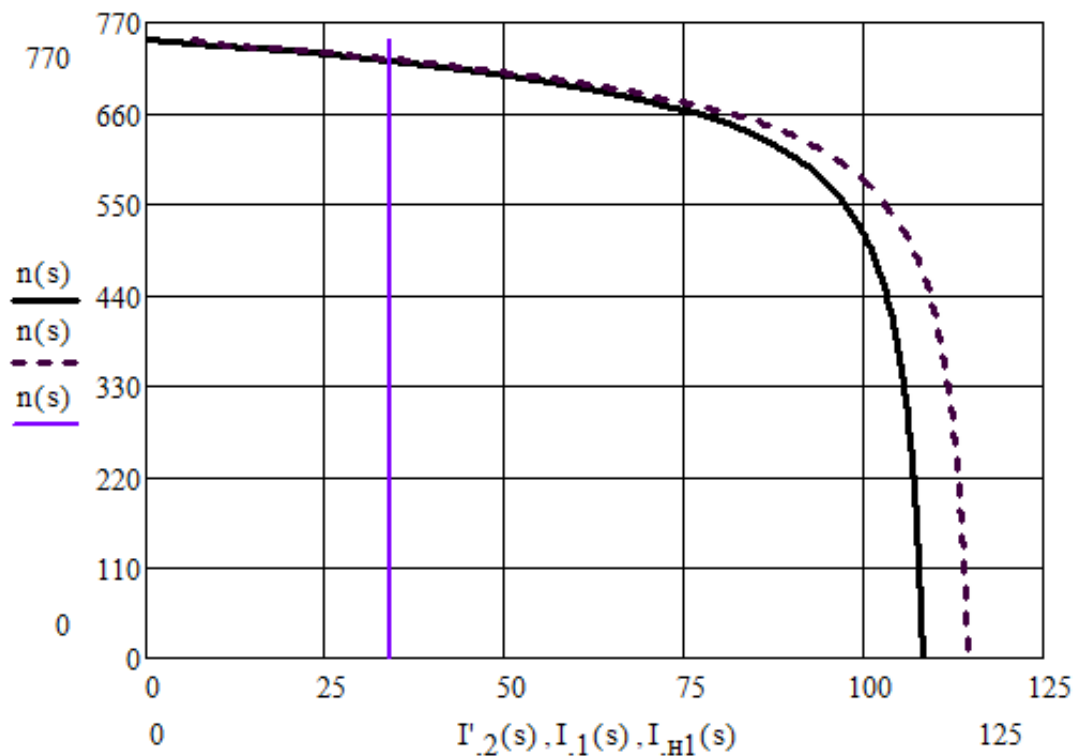


Рис. 2.9 - Залежність струмів статора та частот обертання двигуна та механізму штовхача прокатного стану.

Розрахунок номінального струму статора

$$I'_2 = \frac{U_{1\phi H}}{\sqrt{X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{S_H}\right)^2}} = \frac{219,393}{\sqrt{1.9543^2 + \left(0.32358 + \frac{0.21222}{0.02667}\right)^2}} = 25,786 \text{ A} \quad (2.59)$$

$$\sin \varphi (s) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{S_H}\right)^2}} = \frac{1.9543}{\sqrt{1.9543^2 + \left(0.32358 + \frac{0.21222}{0.02667}\right)^2}} = 0,18652 \quad (2.60)$$

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2' \cdot \sin \varphi} \rightarrow$$

$$\sqrt{6.5019^2 + 25.786^2 + 2 \cdot 6.5019 \cdot 25.786 \cdot 0,18652}$$

$$I_1(s) = 28.004 \text{ A} \quad (2.61)$$

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.7	Арк
						42
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. ВИБІР ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

3.1 Визначення вихідних параметрів для вибору частотного перетворювача

У сучасних електроприводах прокатного та транспортного обладнання широкого застосування набули частотні перетворювачі, які забезпечують плавне регулювання швидкості електродвигуна, зниження пускових струмів, а також покращення динамічних характеристик привода.

Використання частотного регулювання є особливо доцільним у приводі штовхача, оскільки робота системи характеризується змінними навантаженнями, ударами при вході заготовки у валки та необхідністю плавного розгону й гальмування. Це дозволяє зменшити динамічні навантаження на механічні елементи привода, підвищити його надійність та зменшити енергоспоживання.

Вибір частотного перетворювача виконується на основі номінальних параметрів електродвигуна АІР 180М8, з урахуванням його потужності, номінального струму та умов експлуатації. Також враховується необхідність забезпечення достатнього пускового моменту та стійкої роботи при ударних навантаженнях.

Для даного привода доцільно застосувати частотний перетворювач промислового типу з векторним керуванням, який забезпечує високий пусковий момент і точне регулювання швидкості в широкому діапазоні.

Штовхач є важким механізмом циклічної дії, для якого характерні специфічні умови експлуатації. Зокрема, під час роботи виникають значні ударні навантаження, система працює переважно на малих швидкостях, а також потребує високого пускового моменту для забезпечення надійного переміщення заготовки. Крім того, привід повинен забезпечувати можливість реверсивного руху та витримувати часті пуски і зупинки, що суттєво впливає на вибір електрообладнання.

Застосування частотного перетворювача (ЧП) у даній системі є необхідним не лише для регулювання швидкості двигуна, але й для підвищення загальної надійності та ефективності роботи привода. ЧП забезпечує плавний пуск і зупинку електродвигуна, що дозволяє зменшити динамічні навантаження на редуктор і механічні елементи штовхача. Крім того, він забезпечує обмеження пускового струму, що знижує навантаження на електромережу та підвищує енергоефективність системи.

Також використання частотного перетворювача дозволяє реалізувати точне регулювання швидкості та моменту в широкому діапазоні, що особливо важливо при роботі в умовах змінного навантаження та можливих технологічних відхилень.

Векторне керування дозволяє незалежно регулювати магнітний потік і момент електродвигуна, що забезпечує стабільну роботу при різких змінах навантаження та покращує якість перехідних процесів. На відміну від скалярного керування, воно забезпечує точніше підтримання моменту навіть на низьких обертах, що є критично важливим для штовхача.

3.2 Вибір частотного перетворювача та аналіз його характеристик

Для даного привода обґрунтовано вибір частотного перетворювача від компанії SIEMENS серії SINAMICS G120X потужністю 22 кВт.

Керування перетворювачем здійснюється через вбудовану панель оператора (пульт), яка дозволяє задавати режим роботи, контролювати параметри двигуна та виконувати пуск/зупинку привода.

Силова схема підключення включає підведення трифазної напруги до входу перетворювача та з'єднання його виходу з електродвигуном через захисні апарати. Система керування забезпечує також сигнали дозволу роботи, реверсу та аварійного відключення.



Рис.3.1 Перетворювач частоти SINAMICS G120X та пульт керування

Таблиця 3.1 Технічні характеристики SINAMICS G120X

Параметр	Значення
Напруга вхідна	3 AC 380 ... 480 V -20%+10 %
ext	24 V DC (18...30V DC)
Частота вхідна	47...63 Hz
Частота вихідна	0...550 Hz (U/f); 0...200 Hz (Вектор)
Потужність	3AC 400V 22kW
Номінальний струм (нормальний режим роботи)	43 A
Режим керування	U/f, FCC, Vector (encoder less)
Аналоговий вхід	1 AI :-10...+10 V, 0/4...20 mA, 10-bit дискретність. Може використовуватись як цифровий вхід
Аналоговий вихід	1 AO: 0...10 V; 0/4 ... 20 mA Дискретні входу 6 оптично розв'язаних DI
Дискретні виходу	1 релейний DC 30 V, 5 A 1 транзисторний DC 30 V, 0.5 A
РТС/КТУ датчик температури	1 датчик температури, РТС, КТУ

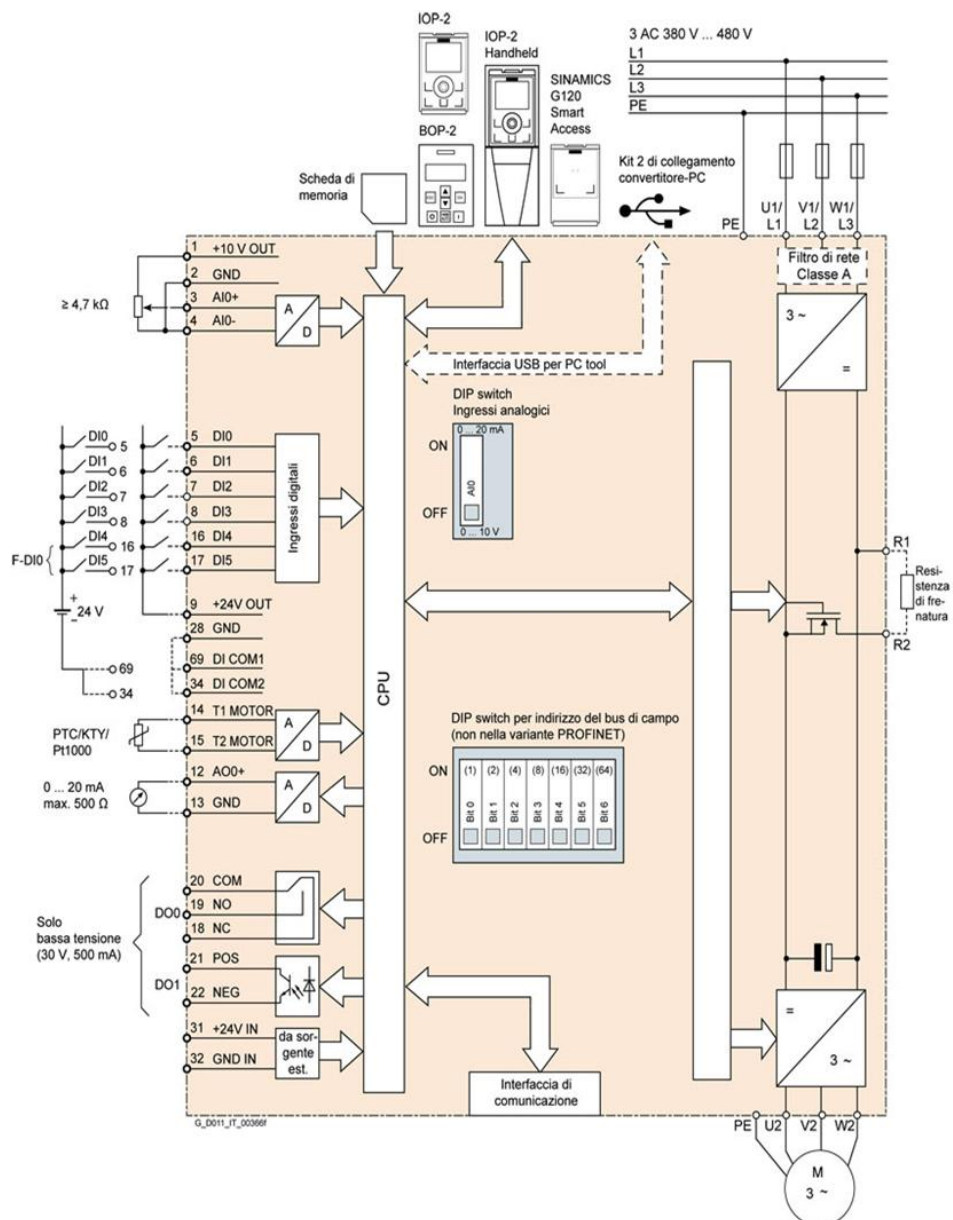


Рис. 3.2 Електрична схема підключення simatic SINAMICS G120X



Рис. 3.3 Графік зміни швидкості привода $n = f(t)$

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата



Рис. 3.4 Графік зміни електромагнітного моменту $M = f(t)$

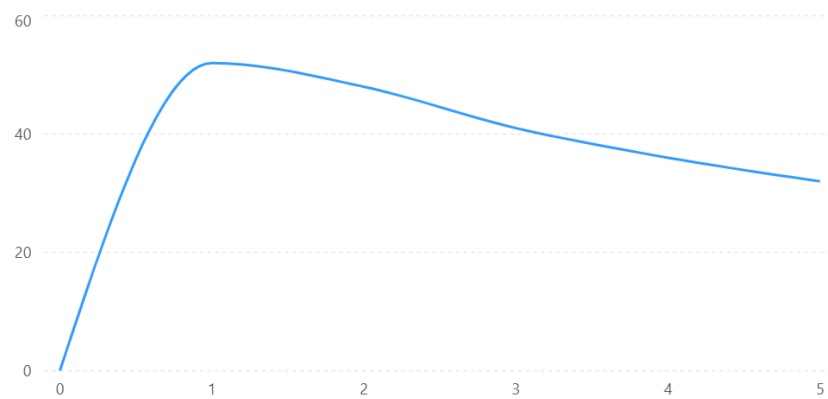


Рис. 3.5 Графік зміни струму двигуна $I = f(t)$

РОЗДІЛ 4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИВОДА В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB/Simulink

4.1 Комп'ютерне моделювання електромеханічної системи привода

Для дослідження роботи привода штовхача та перевірки правильності виконаних розрахунків було виконано математичне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink.

Отримані результати дозволяють проаналізувати динамічні процеси системи, зокрема перехідні режими, зміни швидкості та навантаження на елементи привода. Нижче наведено графіки, що характеризують основні параметри роботи привода в різних режимах навантаження.

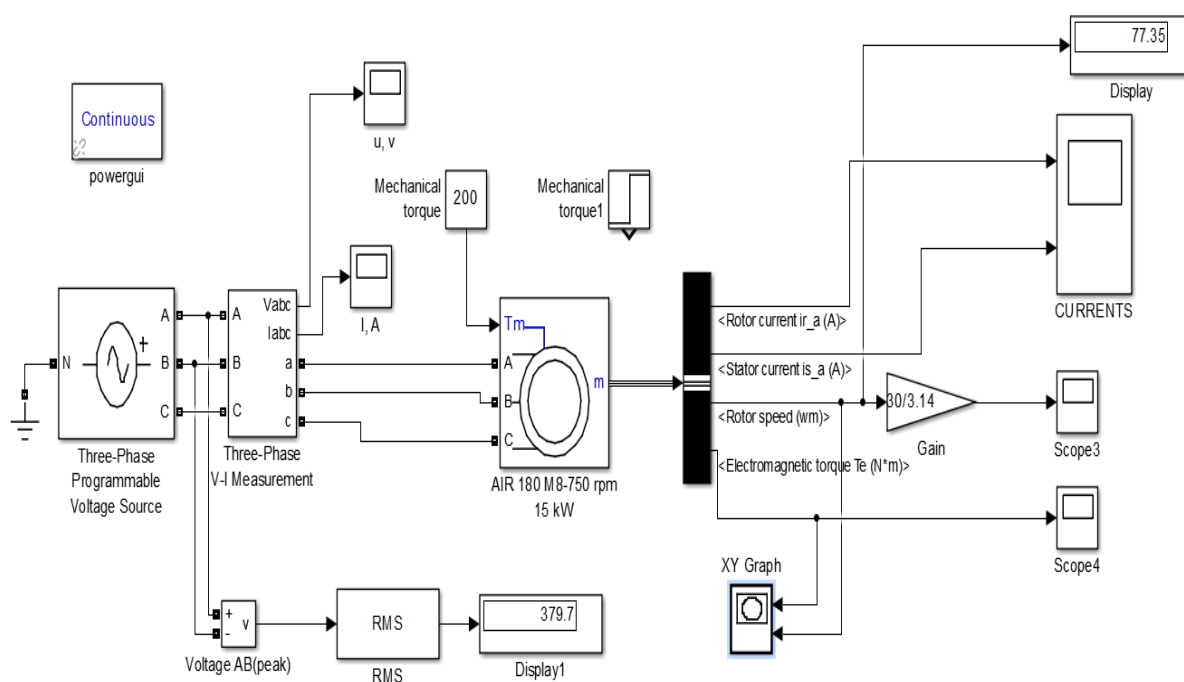


Рис. 4.1 - Схема моделювання електропривода з асинхронним електродвигуном зі фазним ротором у режимі прямого пуску

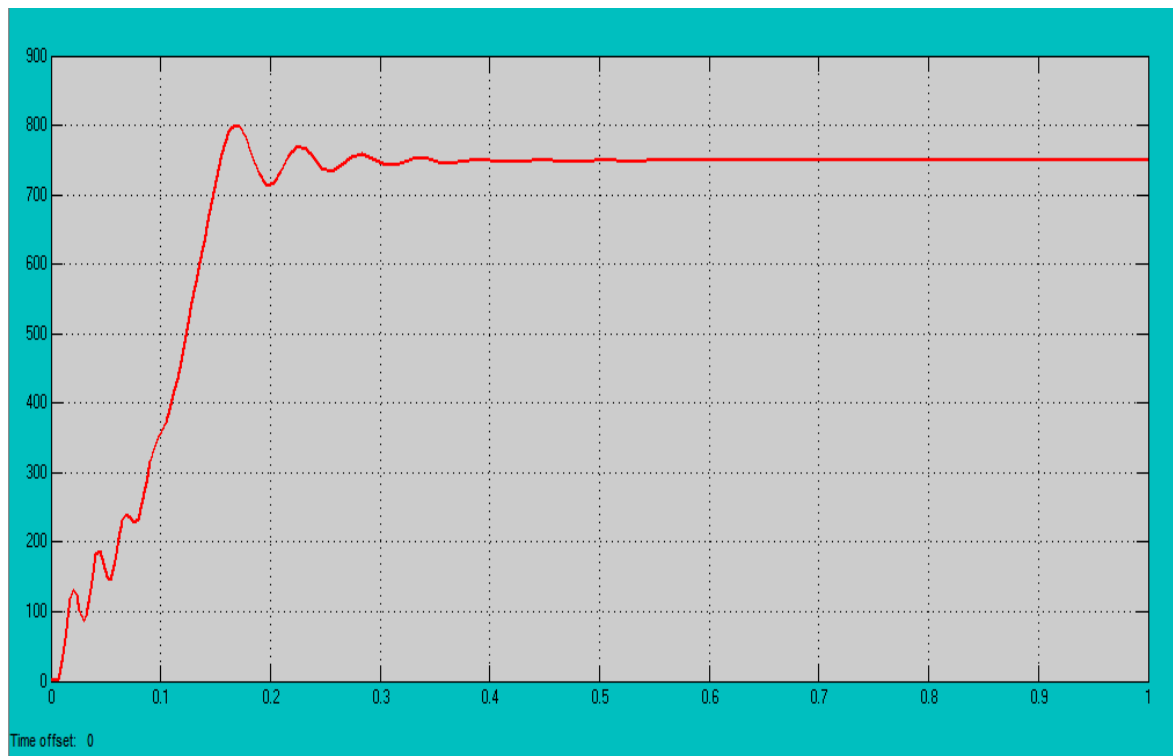


Рис. 4.2 - Графік зміни швидкості електропривода коли механічне навантаження на електропривод $M_{\text{мех}} = 0$

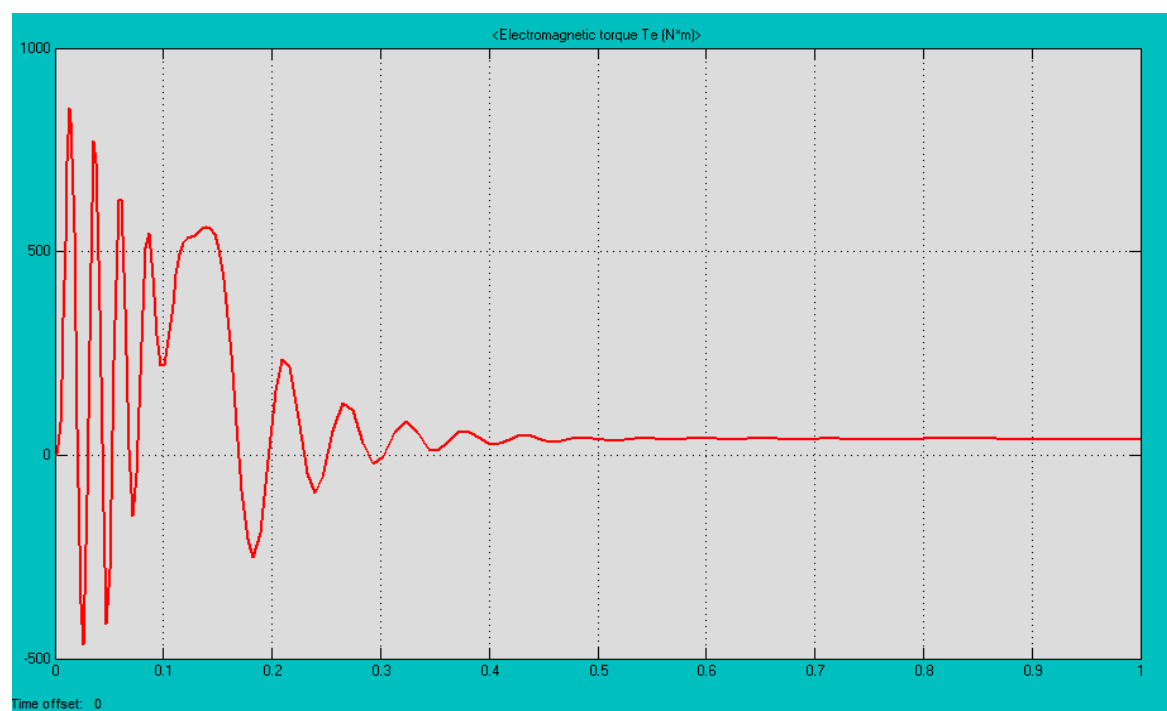


Рис. 4.3 - Графік зміни швидкості електропривода коли механічне навантаження на електропривод $M_{\text{мех}} = 0$

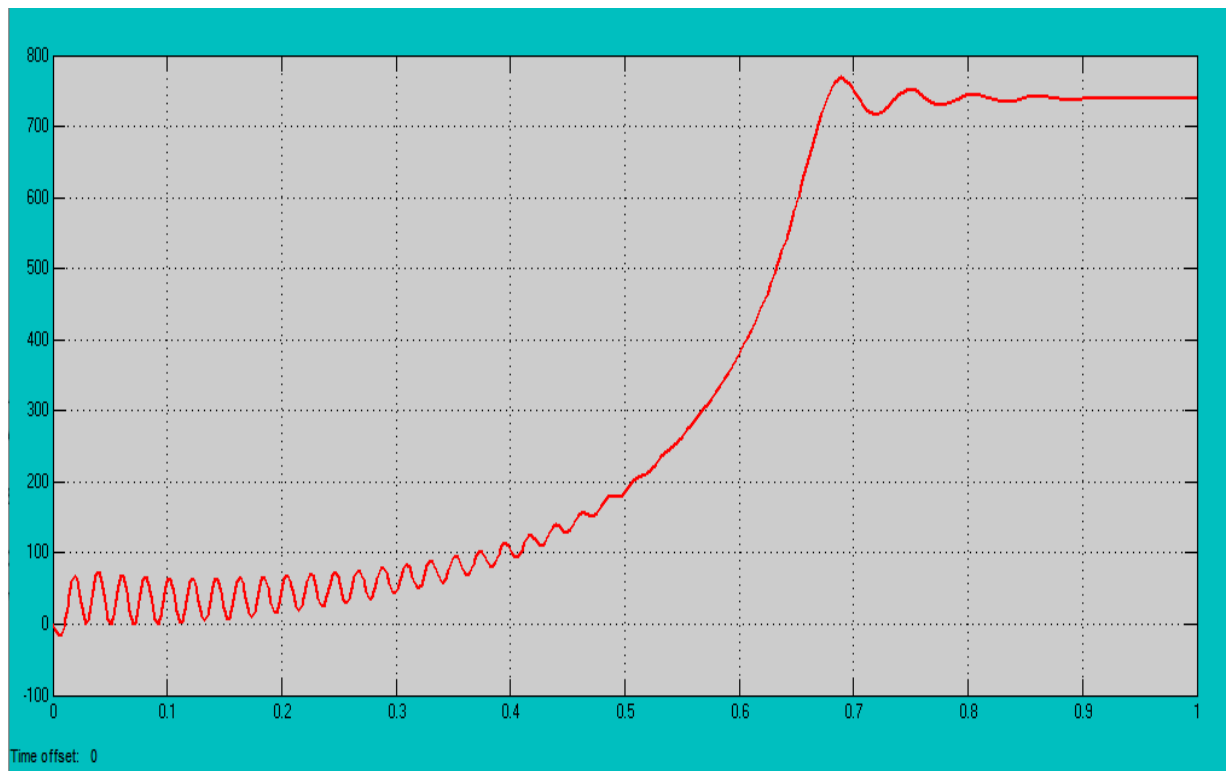


Рис. 4.4 -Графік зміни швидкості електропривода коли механічне навантаження на електропривод $M_{\text{мех}} = 200 \text{ Н} \cdot \text{М}$

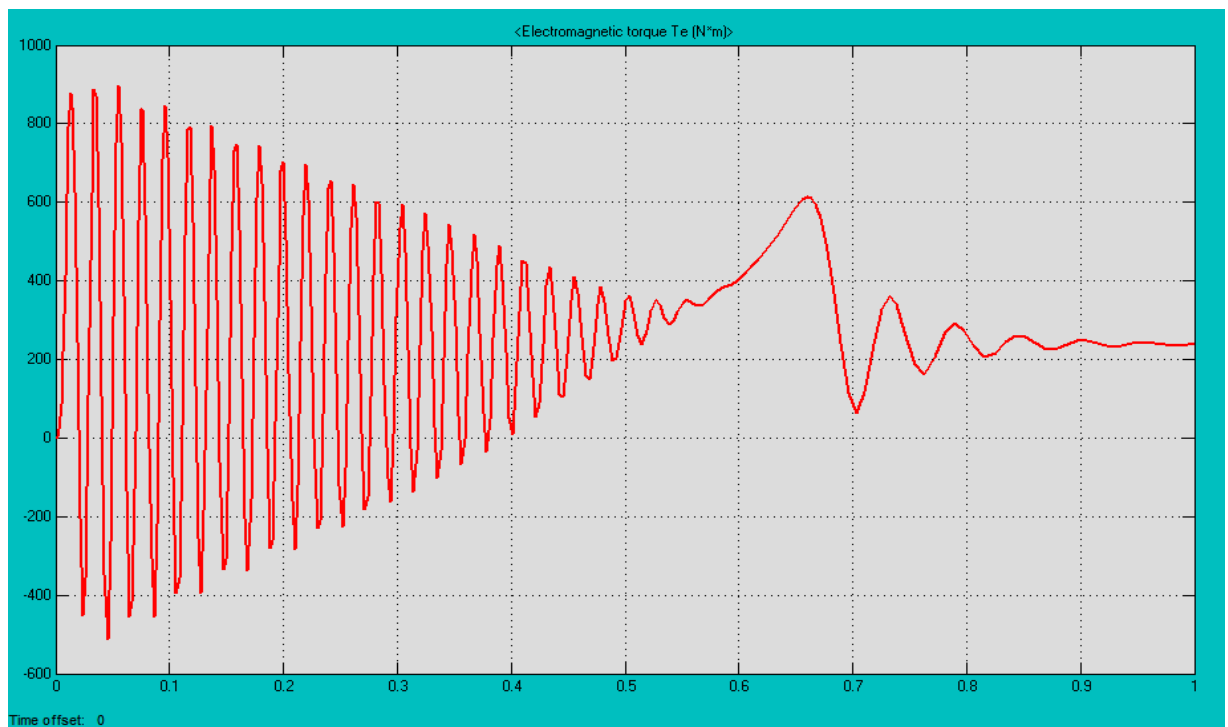


Рис. 4.5 - графік зміни електромагнітного моменту, при навантаженні:

$$M_{\text{мех}} = 200 \text{ Н} \cdot \text{М}$$

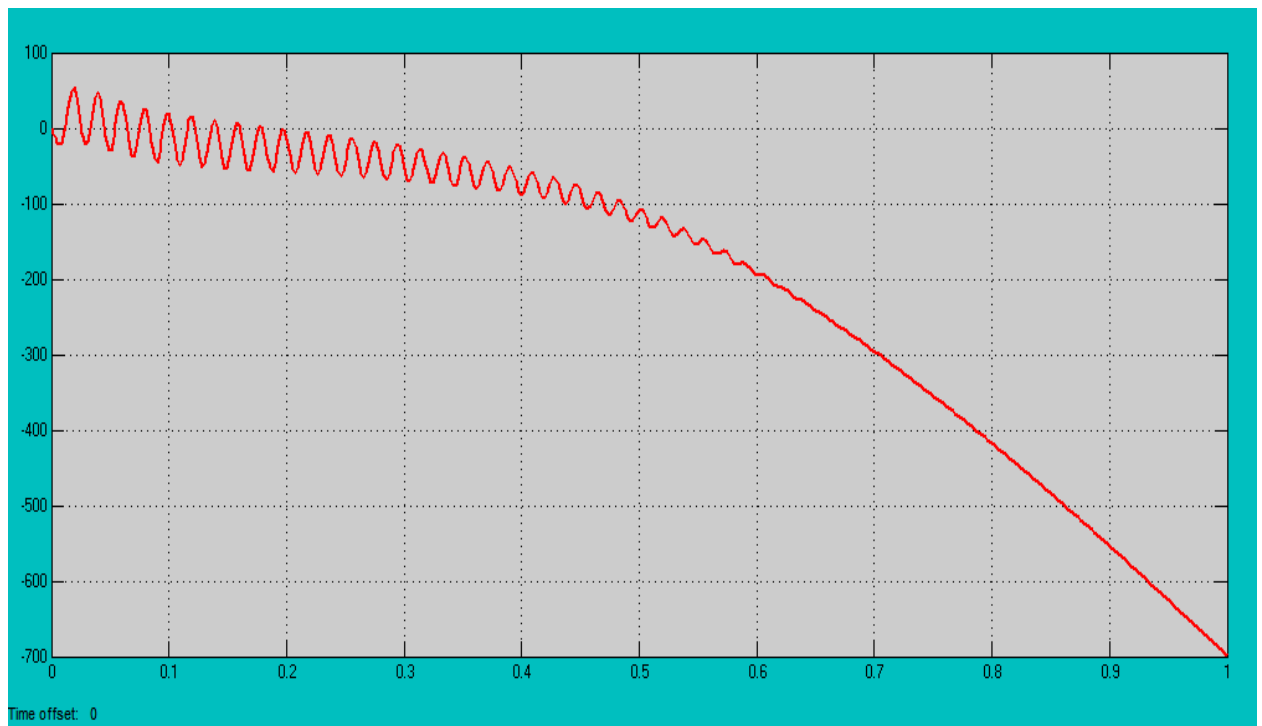


Рисунок 4.6 - Графік зміни швидкості електропривода коли механічне навантаження на електропривод $M_{\text{мех}} = 250 \text{ Н} \cdot \text{М}$ тобто перевантажувальний режим коли наш електропривод не працездатний

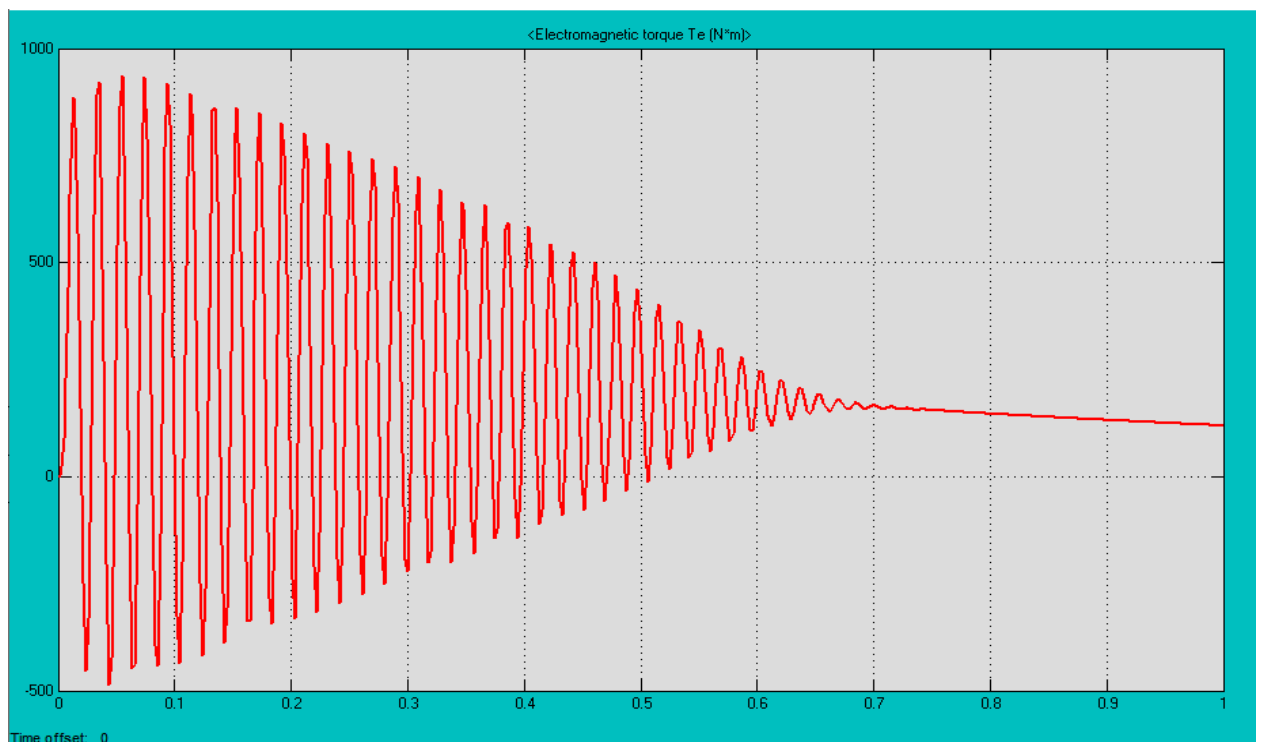


Рисунок 4.7 - графік зміни електромагнітного моменту, при великому навантаженні

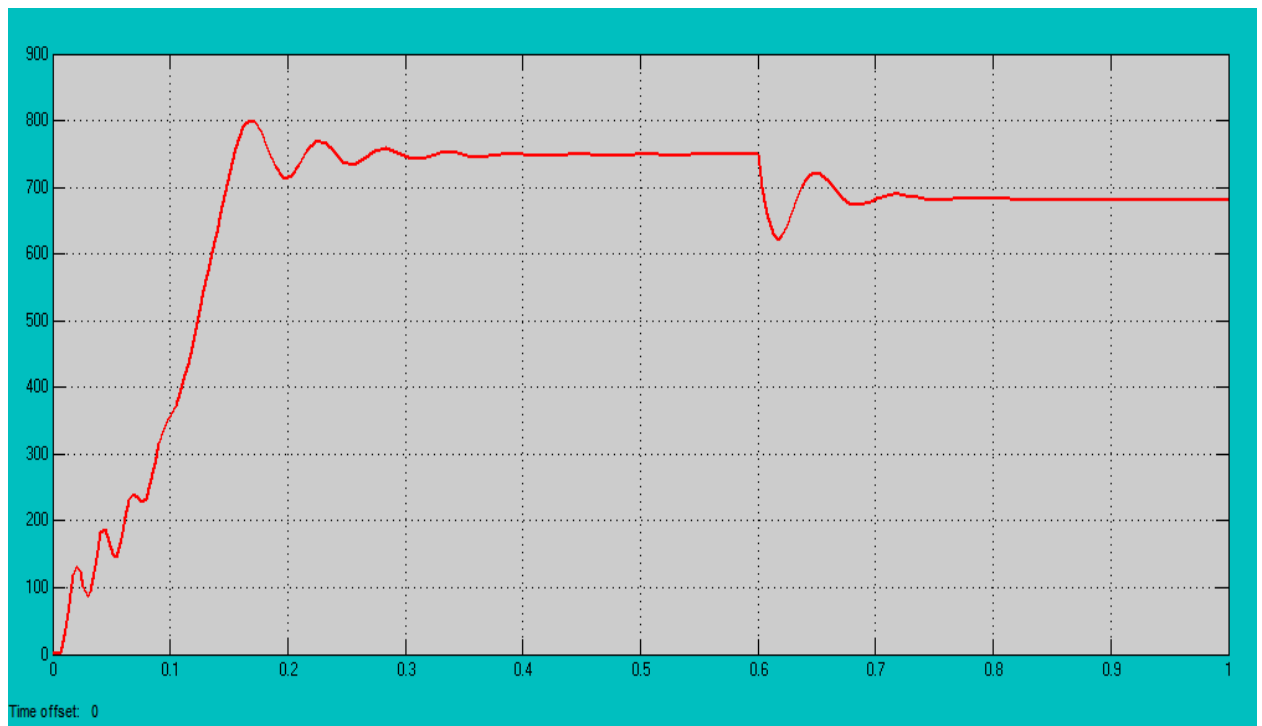


Рисунок 4.8 - Графік зміни швидкості електропривода коли механічне навантаження на електропривод не константа а як одиничного ступінчастого впливу $M_{\text{мех}} =$ від 100 до 800 Н · М, при цьому незважаючи на велике механічне навантаження система повністю працездатна.

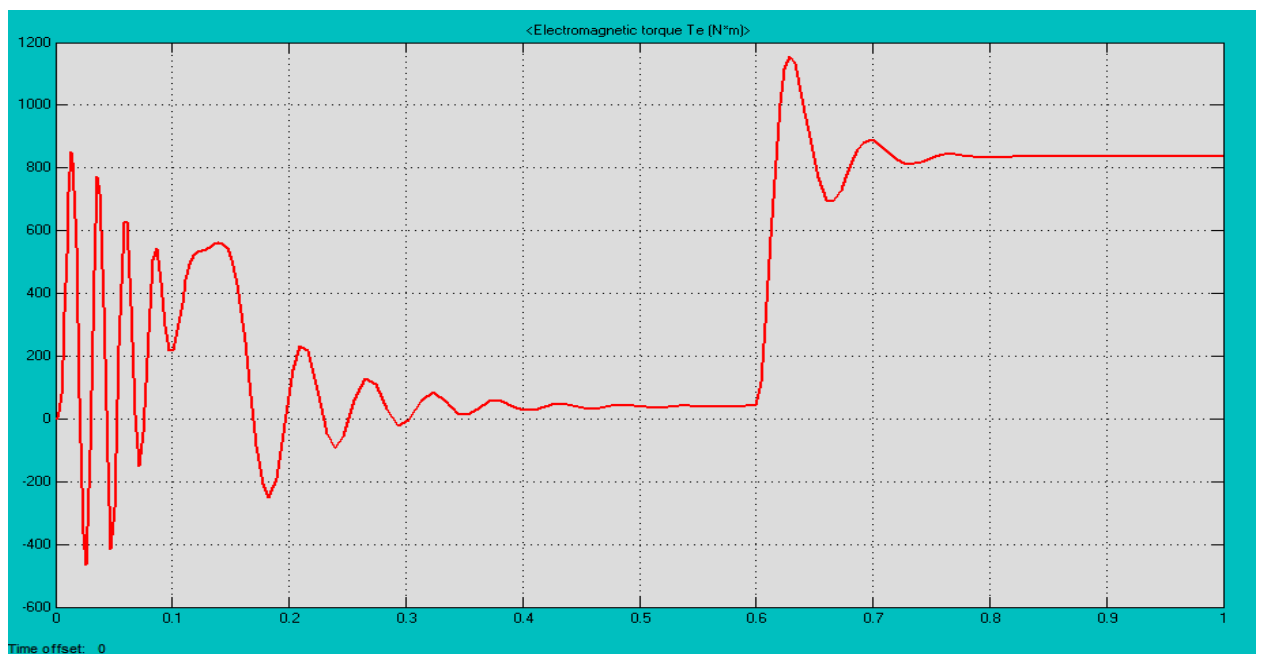


Рисунок 4.9 - графік зміни електромагнітного моменту, при входному ступінчастому впливі.

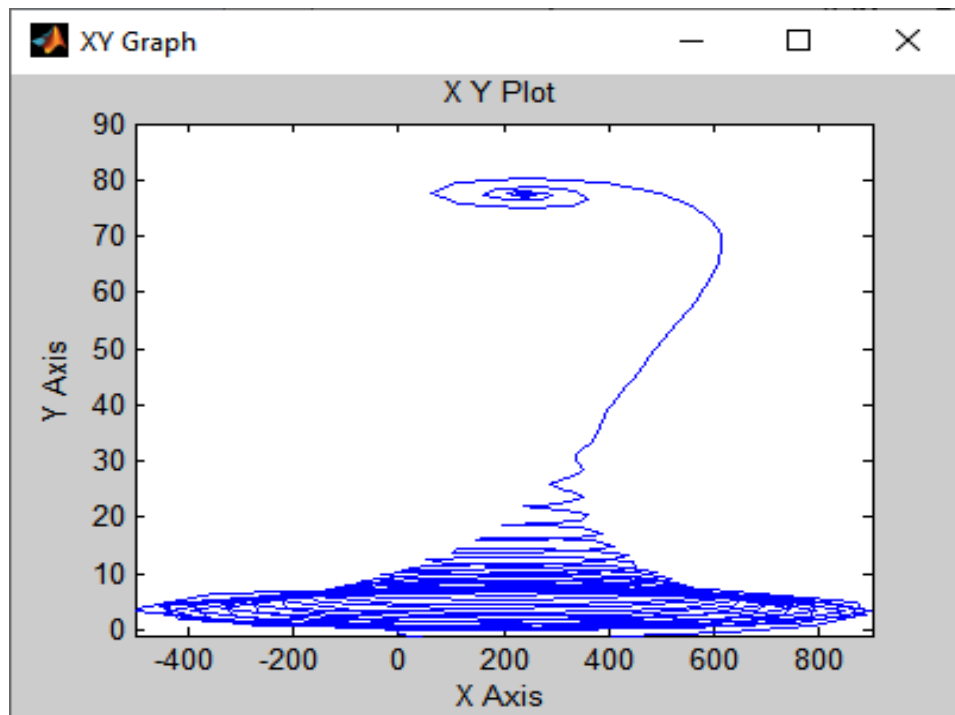


Рисунок 4.10 -Графік механічної характеристики роботи системи

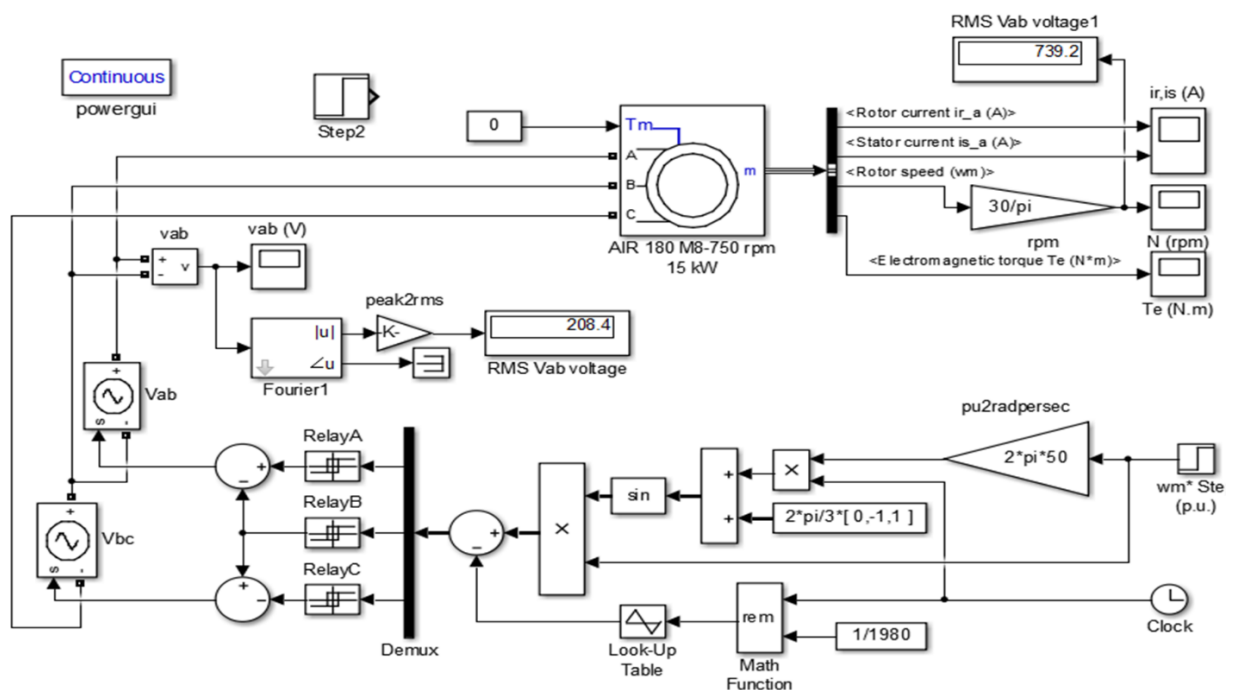


Рис. 4.11 Схема імітаційної моделі електроприводу штовхача прокатного стану з використанням частотного перетворювача за векторним законом регулювання.

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПРОЕКТУ

5.1 Визначення капітальних витрат

Для обчислення запропонованої у дипломному проекті модернізації необхідно провести розрахунок витрат, якій складається з:

1. Капітальні витрати.
2. Експлуатаційні витрати: визначення річних витрат на технічне обслуговування і поточний ремонт;
3. Вартість спожитої електроенергії.

Капітальні інвестиції – кошти, призначені для створення і придбання основних фондів і нематеріальних активів включають наступні витрати:

- придбання обладнання;
- виконанням монтажних робіт, демонтаж застарілого обладнання;
- налагоджувальні роботи;
- транспортні і складські витрати.

Розрахунок вартості технічного обладнання:

Асинхронний електродвигун АІР 180М8– 28800 грн.

Редуктор 1Ц2У-160 – 11400 грн.

Перетворювач частоти SINAMICS G120X – 45000 грн.

Величина проектних капіталовкладень ($K_{пр}$) визначається за формулою:

$$K_{пр} = K_{об} + K_{т} + K_{дм} + K_{н} + K_{пк} \quad (4.1)$$

де $K_{об}$ - сумарна вартість придбання обладнання, необхідного для реалізації проекту;

$K_{т}$ – транспортні витрати;

$K_{дм}$ – витрати на демонтажні, монтажні роботи;

$K_{н}$ - витрати на налагоджувальні роботи;

$K_{пк}$ – інші одноразові вкладення на придбання комплектуючих елементів, становлять приблизно 10% від вартості обладнання.

$$K_{об} = 28800 + 11400 + 45000 = 85200 \text{ грн}$$

Витрати на транспортування, монтаж і наладку розраховуються за допомогою цін, прейскурантів, тарифів підприємств-перевізників та підприємств, які займаються монтажними і пусконаладжувальними роботами. Визначаємо ці витрати на рівні 10% від вартості обладнання.

$$K_{\text{пр}} = 85200 + 8520 + 8520 = \mathbf{102240 \text{ грн.}}$$

5.2 Експлуатаційні витрати

Експлуатаційні витрати складаються з річних витрат на ремонт, обслуговування та витрати на електроенергію і розраховуються за формулою:

$$V_{\text{ек}} = V_{\text{р}} + V_{\text{обс}} + V_{\text{е}} \quad (4.2)$$

де $V_{\text{р}}$ - витрати на поточний ремонт і обслуговування приводу штовхача, до яких входять річна вартість матеріалів, необхідних для ремонту і експлуатації;

$V_{\text{обс}}$ - заробітна плата за рік ремонтного і обслуговуючого персоналу;

$V_{\text{е}}$ – вартість річних витрат на активну и реактивну електроенергію.

За відсутності конкретних даних витрати на поточний ремонт і технічне обслуговування можуть визначатися методом укрупнених розрахунків у відсотках від капітальних витрат для варіантів, що порівнюються:

- для електричних машин (генераторів, двигунів, трансформаторів) – 2-3%;
- для електричних кабелів – 1,5-2%;
- для систем електропривода – 1-8%.

Після модернізації

$$V_{\text{р}} = 2045 + 1534 + 1022 = 4601 \text{ грн.}$$

До модернізації

$$V'_{\text{р}} = 3068 + 2045 + 8180 = 21840 \text{ грн}$$

Економія річних витрат на поточний ремонт обладнання – **8692** грн.

Річні витрати на обслуговування обладнання

$$V_{\text{обс}} = \Pi_{\text{обс}} \cdot \Phi_{\text{ср}} \cdot \frac{t_i}{t_p} \quad (4.3)$$

де $\Pi_{\text{обс}}$ - кількість обслуговуючого персоналу, (осіб);

$\Phi_{\text{ср}}$ - середньорічний фонд заробітної плати одного працівника, (грн./рік);

t_i - середній час роботи одного працівника по обслуговуванню устаткування, 80-120 год/рік (нормальне середнє для важкого привода);

t_p - дійсний річний фонд часу одного працюючого, (годин); приймається в розмірі 1775 -1780 годин/рік.

За даними Держкомстату середня заробітна плата в Україні в 2026 році становила 30350 грн. на місяць, обов'язковий платіж ЕСВ 22%. Визначаєм річні витрати на заробітну плату одного працівника

$$(30350 + 6677) \cdot 12 = 444324 \text{ грн/рік.}$$

Витрати на обслуговування після модернізації

$$B_{\text{обс}} = 2 \cdot 444324 \cdot \frac{80}{1780} = 39940 \text{ грн.}$$

Витрати на обслуговування без модернізації

$$B'_{\text{обс}} = 2 \cdot 444324 \cdot \frac{120}{1780} = 59908 \text{ грн.}$$

Витрати на обслуговування зменшилися на **19968** грн. на рік

Вартість втрат електроенергії для електродвигунів, генераторів:

$$B_e = \Psi_e \cdot h \cdot \kappa_3 \cdot P_{\text{ном}} \cdot \frac{(1-\eta+\alpha)}{\eta} \quad (4.4)$$

де Ψ_e - середній тариф за 1 кВт·час, за індексом Минфіна становить 15,20грн.

h - кількість годин роботи двигуна протягом року, для цього показника рекомендовані такі значення: 2080 годин/рік – при однозмінній роботі 5/2 (п'ятиденний робочий тиждень)

κ_3 – середній коефіцієнт завантаження двигуна, за відсутністю даних про середньорічну потужність, значення може бути прийнято в розмірі 0,7-0,9

$P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність двигуна, кВт.

η - к.к.д. електродвигуна;

α - відносна величина втрат в розподільчих мережах споживача, віднесена до

спожитої потужності двигуна (приймається в розмірі 1-4%).

$$B_e = 15,2 \cdot 2080 \cdot 0,8 \cdot 15 \cdot \frac{(1 - 0,96 + 0,3)}{0,96} = 134368 \text{ грн}$$

Без модернізації

$$B'_e = 15,2 \cdot 2080 \cdot 0,8 \cdot 15 \cdot \frac{(1 - 0,85 + 0,3)}{0,85} = 200854 \text{ грн}$$

Річна економія на електроенергію складає **66486** грн.

Проведячи порівняльний аналіз роботи штовхача метала до модернізації і після встановлення трифазного асинхронного двигуна і частотного перетворювача, економічна ефективність становить:

- споживання електроенергії зменшилося на **66486** грн. на рік.
- збільшення ефективності роботи двигуна до 96%;
- збільшився термін служби механічних частин двигуна;
- суттєво знизилися витрати на капітальний ремонт.

Термін окупності капіталовкладень:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{пр}}}{E} = \frac{102240}{8692 + 19968 + 66486} = 1,1 \text{ року}$$

Результати розрахунків показують, що термін окупності модернізації електропривода становить приблизно 1,1 року, що свідчить про високу економічну ефективність запропонованого технічного рішення та доцільність його впровадження в умовах промислової експлуатації.

РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1 Загальні вимоги безпеки

Експлуатація штовхача та електропривода в умовах металургійного виробництва пов'язана з дією комплексу небезпечних та шкідливих виробничих факторів. До роботи допускаються працівники не молодше 18 років, які пройшли обов'язковий медичний огляд, вступний та первинний інструктаж з охорони праці, стажування на робочому місці та перевірку знань. Працівники повинні мати відповідну професійну підготовку та групу з електробезпеки не нижче III для роботи з електроустановками напругою до 1000 В. До виконання робіт не допускаються особи у стані алкогольного, наркотичного або токсичного сп'яніння, а також працівники, які не пройшли інструктаж або мають медичні протипоказання. Роботи виконуються відповідно до:

НПАОП 0.00-1.21-98 – електробезпека;

НПАОП 0.00-1.28-10 – охорона праці в металургії;

ДСТУ EN 60204-1:2015 – безпека машин;

ДБН В.2.5-28:2018 – освітлення.

Основні небезпечні та шкідливі фактори:

- рухомі частини механізмів (штовхач, рольганги, валки);
- високі температури нагрітих заготовок (до 1000–1200 °С);
- можливість затягування у валки;
- електрична напруга до 0,4 кВ;
- ударні та інерційні навантаження;
- підвищений рівень шуму (до 90–110 дБ);
- вібрація від механічних передач;
- запиленість металевою окалиною;
- теплове випромінювання;
- можливі аварійні викиди розплавленого металу або окалини.

До небезпечних виробничих факторів належить можливість термічного ураження працівників відкритим полум'ям, розпеченими поверхнями обладнання та розжареним металом (заготовками), температура яких може досягати 1000–1200 °С. Це може призвести до опіків різного ступеня тяжкості при контакті або наближенні до небезпечної зони.

Також існує ризик розбризкування окалини та частинок металу, що додатково підвищує ймовірність травмування працівників.

Заходи безпеки:

- огороження небезпечної зони захисними кожухами та бар'єрами;
- світлова або звукова сигналізація перед пуском;
- блокування роботи привода при відкритих огороженнях;
- аварійна зупинка (Emergency Stop) у межах робочої зони;
- допуск персоналу тільки при повній зупинці обладнання.

6.2 Вимоги перед початком роботи

Перед запуском обладнання необхідно:

- перевірити справність штовхача, редуктора та електродвигуна;
- перевірити справність частотного перетворювача;
- перевірити заземлення всіх металевих частин;
- оглянути кабельні лінії на відсутність пошкоджень;
- перевірити справність аварійної зупинки;
- переконатися у відсутності персоналу в небезпечній зоні;
- перевірити стан огорожень та блокувань.

Запуск дозволяється лише після сигналу готовності та перевірки всієї системи керування.

Працівники зобов'язані працювати у спеціальному захисному одязі та засобах індивідуального захисту (ЗІЗ). До них належать: робочий костюм з

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.7	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		59

вогнестійкої тканини, захисне взуття з металевим носком, захисні рукавиці, каска, захисні окуляри або щиток. За необхідності застосовуються також засоби захисту органів слуху (беруші або навушники).

Використання захисного одягу є обов'язковим протягом усього часу перебування у виробничій зоні.

Перед запуском обладнання необхідно:

- перевірити справність штовхача, редуктора та електродвигуна;
- перевірити справність частотного перетворювача;
- перевірити заземлення всіх металевих частин;
- оглянути кабельні лінії на відсутність пошкоджень;
- перевірити справність аварійної зупинки;
- переконатися у відсутності персоналу в небезпечній зоні;
- перевірити стан огорожень та блокувань.

Запуск дозволяється лише після сигналу готовності та перевірки всієї системи керування.

6.3 Вимоги під час роботи

Під час роботи забороняється:

- перебувати в зоні руху штовхача та рольгангів;
- втручатися в роботу механізмів;
- відкривати електрошкафи під напругою;
- виконувати ремонт або очищення під час руху;
- перевищувати допустиме навантаження на механізм;
- перебувати перед валками під час подачі заготовки.

Працівник зобов'язаний:

- контролювати стабільність роботи привода;
- стежити за струмом двигуна та температурою;
- негайно зупинити систему у разі аварійної ситуації.

6.4 Вимоги після закінчення роботи

Після завершення роботи необхідно:

- зупинити електродвигун через ЧП у штатному режимі;
- відключити живлення;
- прибрати робочу зону від окалини та металевих часток;
- провести огляд механічних вузлів;
- повідомити зміну про технічний стан обладнання.

6.5 Освітленість робочої зони

Освітлення виробничих приміщень повинно відповідати ДБН В.2.5-28:2018. Розрахунок природної освітленості виконується за формулою:

$$E = \frac{S_{\text{вікон}}}{S_{\text{підлоги}}} \cdot 100\%$$

де:

E — коефіцієнт природної освітленості;

$S_{\text{вікон}}$ — площа світлових прорізів;

$S_{\text{підлоги}}$ — площа приміщення.

Для робочих зон з механічним обладнанням мінімальна освітленість становить:

- 200–300 лк (загальне освітлення);
- до 500 лк у зоні обслуговування.
- ділянки підвищеної небезпеки: до 750 лк.

6.6 Шум і вібрація

Рівень шуму в металургійному виробництві може досягати 90–110 дБ, що перевищує допустимі значення (80 дБ згідно з санітарними нормами).

Зниження шуму досягається:

- застосуванням редуктора з високим ККД;
- використанням частотного перетворювача (зменшення ударних режимів);
- балансуванням обертових частин;
- шумоізоляцією огорожень.

Рівень шуму регламентується ДСТУ ISO 9612 та не повинен перевищувати для постійних робочих місць 80 дБ.

Рівень шуму оцінюється:

$$L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

де L — рівень звуку (шуму), дБ (децибел);

I — інтенсивність звуку у даній точці, Вт/м²;

I_0 — поріг чутності людини (еталонна інтенсивність),

$$I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$$

Вібрація визначається середньоквадратичним значенням:

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt}$$

де a_{rms} — середньоквадратичне значення прискорення вібрації, м/с²;

$a(t)$ — миттєве значення прискорення вібрації в момент часу t ;

T — період спостереження або вимірювання, с;

$\int_0^T$ — інтеграл, який показує усереднення значень за час.

Допустимі значення згідно з ДСТУ ISO 5349: загальна вібрація до 1.1 м/с² за зміну (8 год зміна).

6.7 Електробезпека

Електробезпека забезпечується відповідно до НПАОП 0.00-1.21-98.

Ураження електричним струмом може виникнути при контакті з струмоведучими частинами обладнання, пошкодженні ізоляції або порушенні правил експлуатації електроустановок. Дії при ураженні струмом:

- негайно припинити дію електричного струму;
- вимкнути живлення рубильником або автоматичним вимикачем;
- при неможливості вимкнення — звільнити потерпілого за допомогою ізованих предметів (суха деревина, діелектричні рукавички).

Звільнити постраждалого від дії струму, дотримуючись правил електробезпеки.

Надати першу допомогу до прибуття лікарів:

- штучна вентиляція легень;
- непрямий масаж серця;
- обробка опіків стерильними матеріалами.

Важливо:

1. Забороняється торкатися потерпілого голими руками до моменту зняття напруги.
2. Не можна використовувати металеві або вологі предмети.
3. Навіть при відсутності видимих ушкоджень потерпілого необхідно направити до медичного закладу.

Ураження електричним струмом є одним із найбільш небезпечних виробничих факторів, тому дотримання правил електробезпеки та своєчасне надання першої допомоги є критично важливими для збереження життя та здоров'я працівників.

Основні заходи:

- захисне заземлення всіх металевих частин;
- автоматичне вимкнення при аваріях;
- використання ПЗВ;
- блокування доступу до електрошаф;

- маркування небезпечних зон.

Опір заземлення:

$$R_z \leq 4 \Omega$$

Небезпечна напруга дотику:

$$U_{\text{дот}} > 50 \text{ В}$$

6.8 Пожежна безпека

Пожежна безпека при експлуатації електропривода штовхача в умовах металургійного виробництва забезпечується відповідно до вимог ДСТУ EN 2:2014, НАПБ А.01.001-2014 та НПАОП 0.00-1.01-07. Приміщення відноситься до категорії: В (горючі тверді та рідкі матеріали у виробничому процесі).

Виробнича дільниця належить до категорії підвищеної пожежної небезпеки у зв'язку з наявністю:

- електрообладнання під напругою;
- мастильних матеріалів у редукторі;
- високих температур нагрітого металу;
- можливого утворення іскор та перегріву обладнання;
- запиленості металевою окалиною.

Для запобігання виникненню пожежі передбачено:

- автоматичне відключення електроживлення при аварійних режимах;
- контроль температури двигуна та ЧП;
- використання кабелів з негорючою ізоляцією;
- заземлення всього електрообладнання;
- встановлення пожежної сигналізації;
- використання вогнегасників типу:
- порошкові (АВС) — для електроустановок;
- вуглекислотні (CO₂) — для електрообладнання під напругою.

Кількість вогнегасників визначається за площею приміщення:

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.7	Арк
						64
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$N = \frac{S}{S_n}$$

де N — кількість вогнегасників;

S — площа приміщення, m^2 ;

S_n — нормативна площа на один вогнегасник (зазвичай 200–300 m^2).

Організаційні заходи:

- регулярний інструктаж персоналу;
- заборона використання відкритого вогню;
- контроль стану електрообладнання;
- очищення обладнання від пилу та мастил;
- вільний доступ до аварійних виходів;
- наявність плану евакуації.

6.9 Вентиляція виробничих приміщень

Умови роботи штовхача в складі металургійного виробництва супроводжуються виділенням значної кількості тепла, пилу (окалина), продуктів термічного випромінювання та можливих газових домішок. У зв'язку з цим ефективна система вентиляції є обов'язковою складовою забезпечення безпечних і санітарно-гігієнічних умов праці.

Вентиляція виробничих приміщень повинна відповідати вимогам ДБН В.2.5-67:2013 “Опалення, вентиляція та кондиціонування”.

У виробничих приміщеннях застосовується:

- загальнообмінна вентиляція — для розбавлення шкідливих домішок у повітрі;
- місцева витяжна вентиляція — для видалення пилу та гарячого повітря безпосередньо із зони його утворення;
- аварійна вентиляція — для швидкого видалення небезпечних концентрацій газів у разі аварійної ситуації.

Необхідна витрата повітря визначається за формулою:

$$L = \frac{Q}{c_{out} - c_{in}}$$

де L — необхідна витрата повітря, м³/год;

Q — кількість шкідливих виділень (тепло, пил), Вт або мг/год;

c_{out} — допустима концентрація шкідливої речовини;

c_{in} — концентрація у припливному повітрі.

При роботі з розжареним металом основним фактором є тепловиділення, яке оцінюється як:

$$Q = Q_{obl} + Q_{met} + Q_{son}$$

де Q_{obl} — тепло від обладнання;

Q_{met} — тепло від розігрітого металу;

Q_{son} — теплове випромінювання.

Для гарячих виробничих цехів металургійного типу рекомендується:

- кратність повітрообміну: 10–20 разів/год;
- температура робочої зони: не вище 28–30 °С;
- ефективне видалення окалини та пилу.

6.10 Охорона навколишнього середовища

Основні фактори впливу:

споживання електроенергії;

шумове забруднення;

вібрація;

утворення металевої окалини.

Зменшення впливу забезпечується:

використанням енергоефективного електропривода;

застосуванням частотного регулювання швидкості;

зменшенням втрат електроенергії;

оптимізацією режимів роботи обладнання.

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті було виконано розрахунок та обґрунтування модернізації електропривода штовхача в умовах металургійного виробництва.

Проведено аналіз конструкції та режимів роботи штовхача, визначено основні навантаження, що діють на механізм, зокрема інерційні, силові та ударні навантаження, а також сили тертя та опору деформації при переміщенні заготовки. Виконано вибір електродвигуна та механічної частини привода. Обґрунтовано застосування асинхронного двигуна у поєднанні з циліндричним редуктором, що забезпечує необхідні тягові та динамічні характеристики механізму. Обґрунтовано вибір частотного перетворювача з векторним керуванням, який забезпечує плавний пуск, стабільний момент на малих швидкостях, зменшення пускових струмів та підвищення надійності роботи привода в умовах змінних навантажень.

У ході виконання математичного моделювання електропривода штовхача було досліджено його роботу в різних режимах навантаження, зокрема при пуску, номінальному русі та змінних технологічних навантаженнях, характерних для процесів переміщення гарячих металевих заготовок. Отримані результати моделювання в середовищі MATLAB/Simulink показали, що без застосування частотного регулювання електропривод характеризується значними пусковими струмами та різкими змінами електромагнітного моменту, що призводить до підвищених динамічних навантажень на механічні елементи системи. Результати моделювання підтверджують доцільність використання частотного перетворювача.

Економічний розрахунок модернізації свідчить про високу економічну ефективність запропонованого рішення.

Розглянуто питання охорони праці. Розроблено вимоги до безпечної експлуатації обладнання, заходи електро- та пожежної безпеки, а також вимоги до вентиляції, освітлення та захисту персоналу.

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.7	Арк
						67
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Жук А.Я., Желябіна Н.К. Механічне устаткування цехів по виробництву металів та сплавів: Навчальний посібник. / Запоріжжя: Видавництво ЗДІА, 1998, — 216 с.

2. Іванченко Ф.К. Розрахунок машин і механізмів прокатних цехів НП / Ф.К. Іванченко, В.М. Гребеник, В.І. Ширяев – Київ: Вища школа, 1995 - 456с.

3. Седуш В.Я. Надійність, ремонт і монтаж металургійних машин. Підручник. - 4-е вид., перероб. І доп. — Донецьк, 2008. —379 с.

4. Методичні вказівки до розрахунку потужності електродвигунів металургійних машин при самостійній роботі, курсовому та дипломному проектуванні для студентів. Дніпродзержинськ, ДДТУ, 2010-45 с.

5. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – К.: Либідь, 1997. – 544 с.

6. Піцан Р., Бардачевский В., Бойчук Б. Збірник задач до курсу «Електропривод» – Львів, Видавництво «Львівська політехніка», 1999. – 426 с.

7. Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода: навчальний посібник /М. В. Загірняк та ін. 2-ге вид., перероблено і доповнено. Харків: Точка, 2017. 206 с.

8. Квітка С. О., Безменнікова Л. М., Вовк О. Ю., Квітка О. С. /Методи управління та апаратна реалізація сучасних перетворювачів частоти. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь, 2013. Вип. 3, т. 2. С. 164-171.

9. Моделювання електроприводів: Навч. посібник / Л.Д. Костинюк, В.І. Мороз, Я.С. Паранчук. - Львів: Видавництво Національного Університету «Львівська політехніка», 2004.- 404 с.

9. Економіка і організація виробництва: Навч. посібник / За заг. Ред. В.Г. Герасимчука, А.Е.Розенплентера, В.І. Кривди. – К.: Політехніка, 2007р.

10. <https://dnaop.com/html/57568/doc-instrukcija-po-ohrane-truda-dlya-raboty-s-elektrotelyferom>

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.7	Арк
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		68

11. Довідник нормативних документів у сфері охорони праці, пожежної безпеки, гігієни праці та соціального страхування від нещасних випадків. – К., Вектор 2009. – 244 с.

					КРБ.АТЕіРС.1.641-03.1.7	Арк
						69
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		