

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститут
Кафедра електромеханічних та комп'ютерних систем

До захисту допущено

Завідувач кафедри

_____ **Інна НЕФЬОДОВА**
(підпис) (ім'я, прізвище)

«___» _____ 2025 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА (ПРОЄКТ)

рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____

спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
освітньо-професійна програма Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

тема «Електромеханічна система регулювання швидкості із векторно-керуваним асинхронним двигуном»

Виконав(ла)

здобувач(ка) групи БД-Е21
(шифр групи)

Юрій КРИЩЕНКО
(ім'я, прізвище)

_____ (підпис)

Керівник роботи

д.т.н., проф. Тетяна НІКІТИНА
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

_____ (підпис)

Рецензент роботи

к.т.н., доц. Валерій КОЛОМІЄЦЬ
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

_____ (підпис)

Консультант

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

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій роботі
немає цитат та вилучень з
праць інших авторів без
відповідних посилань
здобувач (ка) _____
(підпис)

Харків – 2025

ЗМІСТ

	ВСТУП	7
1	АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.	9
2	ВИЗНАЧЕННЯ ДВИГУНА	30
3	СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	40
4	ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ	54
	Висновки	63
	Список використаних джерел	65
	Додатки	68

					ЕМКС 123004 000 ПЗ						
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Крищенко Ю.М.			Електромеханічна система регулювання швидкості із векторно- керуванним асинхронним двигуном.			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Нікітіна Т.Б.							6		
Т. контр.								БННПП ХНУ ім. В.Н. Каразіна БД-Е21			
Н. Контр.		Нікітіна Т.Б.									
Затверд.		Коломієць В.В.									

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку промисловості та енергетики особливої актуальності набуває завдання зниження рівня енергоспоживання обладнання без втрати його продуктивності. Ефективне енергокористування стає одним із ключових критеріїв при проектуванні, модернізації та експлуатації електромеханічних комплексів. У контексті цього завдання все частіше вдаються до використання систем підпорядкованого (каскадного) регулювання, які зарекомендували себе як технологічно зручні, прості у налаштуванні та достатньо гнучкі в адаптації до конкретних умов експлуатації [1].

Основною перевагою таких систем є їх здатність забезпечувати високі показники стабільності та динамічної точності, зберігаючи при цьому модульну структуру. Це дозволяє впроваджувати системи керування на базі типових, уніфікованих технічних засобів, без необхідності кардинальних змін в апаратній частині приводу, незалежно від його конструктивної реалізації чи номінальних параметрів. Завдяки цьому підпорядковані системи широко застосовуються в автоматизованих приводах промислового обладнання, електротехнологічних установках, транспортних комплексах та інших сферах, де потрібне точне, надійне й економічно ефективне регулювання.

Підпорядковані системи автоматичного регулювання являють собою багаторівневі або багатоконтурні структури керування, які будуються за принципом послідовного включення регуляторів, кожен з яких взаємодіє з певною динамічною ланкою об'єкта. Кількість регуляторів у такій системі безпосередньо залежить від кількості функціонально незалежних елементів (ланок), що формують модель керованого об'єкта. Кожному елементу об'єкта регулювання відповідає окремий контур зі своїм регулятором, який забезпечує необхідний рівень точності для підтримання заданої величини [1].

Сигналом для кожного наступного регулятора в ієрархії є вихід попереднього регулятора, який формує проміжну керуючу дію, а також сигнал

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						7
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зворотного зв'язку, який надходить від відповідної вихідної координати певної динамічної ланки. Таким чином, регулятори функціонують у режимі каскадної взаємодії, забезпечуючи розподілений вплив на усі рівні об'єкта регулювання. Внаслідок такої архітектури, яка забезпечує узгоджене функціонування внутрішніх контурів, подібні системи отримали назву систем підпорядкованого (ієрархічного) керування [2].

Особливе значення у межах сучасних систем електроприводу набуває дослідження підпорядкованих схем регулювання, реалізованих на базі векторного керування асинхронними електродвигунами. Актуальність цього напрямку зумовлена широким впровадженням асинхронних двигунів у склад різноманітних електромеханічних систем, а також їх придатністю до роботи у складних умовах із динамічними змінами навантаження, які вимагають точного контролю як швидкості, так і моменту.

У зв'язку з цим, дипломна робота присвячена розробці математичної моделі та проведенню розрахунків для електромеханічної системи керування швидкістю, що функціонує на основі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у системі векторного керування. Особлива увага приділяється побудові структури підпорядкованого регулювання, підбору параметрів регуляторів, а також аналізу динамічних характеристик системи у різних режимах роботи [2].

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						8
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Металообробні верстати являють собою технічні засоби, призначені для здійснення механічної обробки виробів, переважно з металів. Основною функцією таких машин є зміна геометричних параметрів заготовки - форми, розмірів, шорсткості поверхні - шляхом різання, шліфування, свердління, токарної чи фрезерної обробки. Завдяки широкому спектру технологічних можливостей, ці верстати застосовуються не лише для обробки металів, але й ефективно використовуються для обробки низки неметалевих матеріалів [2]. Зокрема, на універсальних або спеціалізованих металообробних верстатах можуть виконуватись операції різання деревини, полімерних матеріалів, капрону, текстоліту, а також деяких видів пластмас. У виробничих умовах широко застосовуються модифіковані верстати, які здатні працювати з більш твердими або крихкими матеріалами, такими як скло, технічна кераміка, композитні сполуки тощо. Подібна універсальність і адаптивність забезпечується завдяки змінним інструментам, використанню сучасних систем керування та різноманіттю технологічних налаштувань, що дозволяють підлаштовувати режим роботи обладнання під конкретний вид матеріалу. Таким чином, металообробні верстати є універсальними машинами, які застосовуються у багатьох галузях промисловості - від машинобудування до електроніки, і залишаються ключовим елементом у сучасному виробництві деталей і конструкцій з широкого спектру матеріалів [3].

У сучасному машинобудуванні та інших галузях промисловості широко застосовуються металорізальні верстати, які класифікуються за типом обробки, конструкцією та призначенням. До основних видів цього обладнання належать [2]:

- Токарні верстати - призначені для обробки зовнішніх і внутрішніх поверхонь тіл обертання шляхом різання;

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						9
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Свердлильні верстати - використовуються для виконання отворів шляхом свердління, зенкування або розгортання;
- Розточувальні верстати - забезпечують високоточну обробку отворів великого діаметра або їх доопрацювання після попереднього свердління;
- Фрезерні верстати - дозволяють виконувати плоскі, фасонні, спіральні поверхні та інші складні контури за допомогою фрез;
- Стругальні верстати - забезпечують обробку плоских поверхонь зворотно-поступальним рухом різця;
- Комбіновані верстати - поєднують функції кількох окремих типів устаткування, що підвищує продуктивність і гнучкість виробничих процесів.

Ці види металорізального обладнання складають основу технічного парку більшості підприємств, що займаються обробкою матеріалів. Вони можуть бути як універсальними, так і спеціалізованими, залежно від потреб виробництва. Металообробні верстати виготовляються різними виробниками, як вітчизняними підприємствами, так і зарубіжними компаніями, при цьому в конструкції та експлуатаційних характеристиках враховуються вимоги відповідних стандартів. Найбільш поширеними є державні стандарти України (ДСТУ), міжнародні стандарти ISO, а також нормативи ГОСТ, які досі застосовуються на пострадянському просторі. Відповідність цим стандартам гарантує точність, надійність та безпечну експлуатацію обладнання у різних умовах виробництва [3].

Універсальні верстати, також відомі як машини загального призначення, відіграють ключову роль у гнучкому виробництві, де обробка деталей здійснюється у змінних умовах або за відсутності масовості. Вони призначені для виготовлення великої кількості різноманітних за конструкцією виробів у невеликих або середніх партіях. Такий тип обладнання є основою дрібносерійного та серійного виробництва, оскільки дозволяє ефективно обробляти деталі різної геометричної складності без потреби в складній переналаштуванні верстата для кожної нової операції [3].

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						10
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

До універсального типу належать, зокрема, фрезерні верстати, в яких основне різання здійснюється за допомогою фрези - багатолезового інструменту, що обертається навколо власної осі, забезпечуючи головний рух. Заготівка зазвичай здійснює поступальний рух подачі, який може відбуватись як у горизонтальній, так і у вертикальній площині, залежно від конструкції верстата. Висока гнучкість та простота в керуванні робить фрезерні універсальні верстати незамінними у цехах, орієнтованих на виготовлення одиничних або змінюваних серій виробів.

Фасонне шліфування - це спеціалізований вид обробки, за якого застосовується шліфувальний круг із попередньо сформованим складним профілем. Такий профіль може бути сферичним, ступінчастим чи мати інші фасонні контури, які необхідно точно передати поверхні заготовки. Для забезпечення постійної відповідності форми круга вимогам креслення деталі застосовується процедура алмазного правлення (або "алмазування"), що передбачає періодичне відновлення профілю інструмента за допомогою спеціального алмазного інструменту. Такий метод забезпечує високу точність та повторюваність при обробці відповідальних поверхонь [4].

Крім того, у виробничій практиці широко використовуються листозгинальні верстати, які призначені для пластичної деформації металевих листів з метою надання їм бажаної геометричної форми (згинання під різним кутом). Процес згинання виконується в кілька етапів: спочатку заготовку встановлюють на робочому столі між спеціальною притискною траверсою та основною опорою; далі її фіксують механічним або гідравлічним затиском. Після цього згинальний інструмент (або балка) переміщується, здійснюючи контрольовану деформацію по заданій траєкторії. Таке обладнання є надзвичайно ефективним у виробництві корпусних конструкцій, вентиляційних каналів, елементів фасадних систем та інших тонколистових деталей [3].

Одним із ключових типів металообробного обладнання є токарний верстат, головною ознакою якого є те, що основний (головний) рух забезпечується

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						11
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обертанням оброблюваної заготовки навколо власної осі. У той же час різальний інструмент (різець) залишається нерухомим відносно обертання і переміщується поступально по напрямних станини для реалізації подачі [4].

Заготівка може бути надійно зафіксована в патроні шпинделя або між центрами передньої і задньої бабки, в залежності від її геометрії, довжини та маси. Сам шпиндель, що забезпечує обертання, приводиться в рух через систему механічної трансмісії, що включає клиноремінні або зубчасті передачі, а також може бути оснащений електроприводом із регульованою швидкістю обертання [5].

Швидкість подачі різця, яка забезпечує знімання матеріалу, реалізується шляхом переміщення поздовжнього або поперечного супорта. Це переміщення може бути кероване вручну за допомогою маховиків, або автоматизоване, завдяки кінематичному з'єднанню із ходовим гвинтом та подаючим валом, який приводиться від коробки подач.

Швидкість обертання заготовки у токарному верстаті має широкий діапазон регулювання, що дозволяє адаптувати режим обробки до різних матеріалів та вимог до якості поверхні. У сучасних верстатах застосовуються електродвигуни змінного або постійного струму, які можуть працювати на фіксованій або змінній частоті, що забезпечується шляхом використання частотних перетворювачів або перемикання передавальних ступенів редуктора [5].

На токарному верстаті виконують широкий спектр технологічних операцій, таких як [5]:

- зовнішнє циліндричне обточування для формування гладких або фасонних поверхонь;
- торцювання (обрізка) кінцевих площин деталей;
- розточування осьових отворів, включаючи глухі та наскрізні;
- нарізання зовнішньої або внутрішньої різьби шляхом синхронізації обертання шпинделя з поступальним рухом супорта;
- зняття фасок, підрізання канавок, тощо.

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						12
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Токарні верстати є незамінним інструментом у металообробній галузі, завдяки їх універсальності, простоті налаштування та здатності виконувати як грубу, так і високоточну обробку.

У сучасному виробничому середовищі токарно-гвинторізальні верстати посідають важливе місце серед металообробного обладнання. Вони характеризуються широким функціональним призначенням і здатністю виконувати складні різьбонарізні операції. За допомогою таких верстатів можливе формування метричної, дюймової, торцевої, однозаходної або багатозаходної різьби, включно з виконанням різьб з нормальним або збільшеним кроком. Завдяки потужності приводів, стійкості конструкції та вдосконаленим системам керування, ці верстати дозволяють працювати не лише з м'якими металами, а й з твердими та важкооброблюваними матеріалами, включно з загартованими сталями [6].

Ще одним важливим представником верстатного парку є заточувальні верстати, які призначені для відновлення ріжучих властивостей інструменту шляхом його повторного заточування. Існує два основні типи таких верстатів: спеціалізовані, які призначені для обслуговування одного типу інструмента (наприклад, тільки свердел або фрез), та універсальні, які здатні виконувати заточування широкого спектра ріжучого інструменту. Завдяки універсальності останніх, їх активно використовують у ремонтних майстернях та на інструментальних ділянках підприємств [5].

Особливу нішу займають вертикальні розточувальні верстати, які використовуються у випадках, коли необхідна точна обробка отворів у масивних і складних деталях, зокрема розточування блоків циліндрів та гільз двигунів внутрішнього згоряння. Таке обладнання також дозволяє виконувати свердління, підрізання торцевих поверхонь, фрезерування отворів у конструкційних елементах великої товщини або нестандартної форми. Не менш важливими є карусельні верстати, що призначені для обробки масивних деталей великого діаметру, які важко обробляти на класичних токарних машинах. Карусельні

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						13
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

верстати дозволяють здійснювати розточування внутрішніх отворів, обточування зовнішніх циліндричних і конічних поверхонь, підрізання торців, формування кільцевих канавок, а також операції свердління, зенкерування та розгортання. Завдяки вертикальному розташуванню шпинделя та високій жорсткості конструкції, карусельні верстати є незамінними при обробці великогабаритних заготовок, зокрема в машинобудівній, енергетичній та оборонній промисловості [7].

У процесі вибору металообробного обладнання для виробничих потреб, все більшого поширення набуває підхід, що ґрунтується на аналізі співвідношення "вартість-якість". Такий підхід дозволяє не лише оцінити економічну доцільність придбання конкретної моделі, але й здійснити обґрунтоване порівняння кількох аналогічних за функціоналом верстатів, враховуючи їхню ефективність, надійність і технічні параметри [10, 17].

У категорії токарних верстатів ключовим параметром, що характеризує функціональні можливості обладнання, є об'єм робочої зони, який, як правило, має форму циліндра. Натомість у випадку фрезерних, розточувальних або багатоопераційних верстатів, форма робочої області набуває прямокутної геометрії, що пов'язано зі специфікою рухів оброблюваного інструменту та напрямків подачі.

Одним із важливих критеріїв класифікації обладнання є маса верстата, яка прямо корелює з його габаритами, типом виконуваних робіт і розмірами оброблюваних деталей. У промисловій практиці всі металообробні верстати, зокрема токарні, розточувальні або шліфувальні, поділяються на три основні категорії [9]:

- Легкі верстати - масою до 1 тонни. В основному застосовуються у дрібносерійному та ремонтному виробництві;
- Середньої маси верстати - вага яких становить від 1 до 10 тонн. Ця група є найбільш поширеною в умовах серійного та масового виробництва;

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						14
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Важкі верстати - маса перевищує 10 тонн. Використовуються для обробки великогабаритних і важких деталей у важкому машинобудуванні [2].

Ще одним істотним параметром, що визначає придатність верстата до виконання високоточних робіт, є його клас точності. У стандартизованій системі класифікації, прийнятій в промисловості, розрізняють такі категорії [7]:

- Нормальна точність (Н) - для загальнопромислового використання;
- Підвищена точність (П) - у разі потреби у більш точному позиціонуванні та обробці;
- Висока точність (В) - для обробки деталей із суворими допусками;
- Особливо висока точність (А) - використовується для виготовлення точних вузлів і шаблонів;
- Майстер-верстати або особливо точні (С) - призначені для калібрування, перевірки вимірювальних засобів і виготовлення еталонних деталей [8].

Ці позначення мають відповідне маркування у вигляді літерних індексів і дозволяють швидко зорієнтуватися у призначенні верстата для конкретних завдань.

У процесі оцінювання ефективності роботи металорізального верстатного обладнання прийнято розрізняти кілька різновидів продуктивності, що характеризують його експлуатаційні можливості. Зокрема, виділяють [9]:

- ідеальну або технологічну продуктивність,
- циклову продуктивність,
- фактичну (реальну) продуктивність [8].

Особливості обліку втрат часу

При розрахунку продуктивності важливо враховувати часові втрати, які не є безпосередньо пов'язаними з процесом різання, проте істотно впливають на загальний виробничий цикл. До таких втрат належить:

- час, витрачений на зміну або переналагодження ріжучого інструменту;

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						15
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- регулювання та налагодження верстата;
- технічне обслуговування і ремонт вузлів та агрегатів;
- часові витрати на підготовчо-завершальні операції.

Ці компоненти формують сумарний додатковий час на одиницю виготовлення, який часто позначають як інші втрати.

Хоча технологічна продуктивність прямо пропорційна зменшенню часу чистового різання, вона не завжди відповідає фактичній продуктивності обладнання. Зокрема, початкове зростання швидкості різання веде до підвищення обох показників. Проте при подальшому перевищенні оптимальних параметрів швидкості починають зростати експлуатаційні втрати, оскільки [9]:

- ріжучий інструмент інтенсивніше зношується;
- збільшується частота його заміни;
- зростають простої, пов'язані з повторним налагодженням.

У результаті фактична продуктивність може навіть зменшуватися. Таким чином, надмірне форсування режимів обробки не є ефективним рішенням. Оптимальним підходом для підвищення продуктивності вважається застосування альтернативних технічних рішень, зокрема [10]:

- використання багатопозиційної обробки;
- введення багатоінструментальних систем;
- поєднання операцій завантаження й різання;
- використання роторних автоматичних ліній, де мінімізовано час допоміжних операцій [10 -13].

Ключовими параметрами, що визначають ефективність обробки, є поздовжня та поперечна подачі — тобто швидкості переміщення інструменту вздовж та поперек заготовки. Ці характеристики суттєво впливають на швидкість обробки, продуктивність, а також демонструють рівень технічного розвитку обладнання.

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						16
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Згідно з аналітичними даними, сучасні токарні верстати нового покоління мають значно вищі значення параметрів подачі, що дозволяє їм демонструвати високий рівень інноваційності та ефективності виробництва [14; 15].

Висока продуктивність обладнання, безумовно, позитивно позначається на його експлуатаційних характеристиках та здатності до швидкого виконання виробничих завдань. Проте при прийнятті остаточного рішення щодо впровадження нового або інноваційного обладнання до виробничого процесу слід урахувувати не лише технічні параметри, але й економічну доцільність інвестицій.

До ключових економічних критеріїв належать [12]:

- первісна вартість обладнання;
- витрати на встановлення, налагодження та навчання персоналу;
- довгострокові експлуатаційні витрати, включаючи енерговитрати, обслуговування, вартість комплектуючих та витратних матеріалів.

Тільки комплексний аналіз техніко-економічних показників дозволяє прийняти виважене рішення щодо доцільності придбання того чи іншого типу верстата.

У процесі експлуатації металообробного верстатного обладнання неминуче відбувається виділення теплової енергії. Це тепло є наслідком кількох факторів: по-перше, інтенсивного різання металу ріжучим інструментом, що супроводжується високими контактними температурами в зоні різання; по-друге, тертя в кінематичних парах та механічних з'єднаннях, які формують систему переміщення та обертання. Накопичення тепла в структурних елементах верстата зумовлює виникнення теплових деформацій, що негативно впливають на точність та стабільність його роботи. Серед основних наслідків теплового впливу можна виділити такі [12]:

1. Зниження ефективності мастильного шару. При нагріванні вузлів тертя (напр., направляючих або підшипників) в'язкість мастила зменшується. Це призводить до погіршення мастильних властивостей, внаслідок чого захисна

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						17
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

плівка між поверхнями руйнується, що спричиняє підвищене зношування, можливе перегрівання та навіть заклинювання.

2. Зміна посадочних зазорів. При підвищенні температури матеріали корпусу та механізмів розширюються, внаслідок чого відбувається деформація точних з'єднань. Це особливо критично для вузлів, що мають визначені посадки (наприклад, шпинделів, направляючих супортів, гвинтових пар), де навіть незначна зміна зазору може викликати втрату геометричної стабільності.

3. Порушення точності обробки. Наприклад, при нагріванні передньої опори шпиндельного вузла, вісь обертання може зміщуватися в просторі. Це призводить до зміни відносного положення інструмента й оброблюваної заготовки, і, як наслідок, - до зниження точності виготовлення.

4. Геометричні помилки. При тривалому тепловому впливі можуть виникати викривлення корпусу, згинання напрямних та інші деформації, які спричиняють накопичення похибок при серійному виробництві.

Параметри точності є критично важливими при аналізі економічної доцільності впровадження нового обладнання. Зменшення точності обробки безпосередньо впливає на:

- зростання частки бракованої продукції;
- необхідність додаткових операцій переробки або шліфування;
- збільшення витрат на контроль і калібрування;
- зниження рентабельності виробництва.

Отже, термічна стабільність верстата та здатність зберігати точність при нагріванні повинні розглядатися як ключові критерії у виборі обладнання та техніко-економічному обґрунтуванні його закупівлі або модернізації [12].

Під час обробки заготовок на верстатах з числовим програмним управлінням (ЧПУ) досягається значно вищий рівень точності, ніж при використанні традиційних верстатів із ручним або механічним управлінням. Висока точність є наслідком автоматизованого контролю положення та

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

переміщення робочих елементів, що зменшує вплив людського чинника та механічних люфтів.

Згідно з загальноприйнятою класифікацією, точність обробки визначається класом точності верстата [12]:

- Н (нормальна точність) – базовий рівень, достатній для більшості загальних виробничих задач.
- П (підвищена точність) – забезпечує кращу точність обробки і використовується в умовах, де потрібна висока відповідність розмірів.
- В (висока точність) – призначена для операцій, що вимагають мінімальних відхилень і високої якості поверхні.

На відміну від механічних верстатів, де точність переміщення може залежати від довжини ходу, зусиль різання, зношування напрямних тощо, у верстатах з ЧПУ ця похибка значно зменшена і практично не залежить від відстані переміщення. Це досягається завдяки використанню сервоприводів, імпульсних енкодерів і цифрового управління, які забезпечують точне позиціонування незалежно від шляху. Одиницею вимірювання точності системи позиціонування є дискрет (крок переміщення). У сучасних ЧПУ-системах цей показник досягає 1–2 мікрометрів (мкм), що дозволяє програмно задати переміщення з дуже високою роздільною здатністю. Водночас, варто враховувати, що остаточна точність виконання переміщення визначається не лише параметрами системи управління, а й жорсткістю конструкції верстата, якістю виготовлення кулькогвинтових передач, стабільністю напрямних, точністю монтажу та термостійкістю [12].

- Для верстатів підвищеної точності типовим є значення дискрету ± 1 мкм.
- Для верстатів нормальної точності – ± 10 мкм.

Таким чином, застосування верстатів з ЧПУ не лише підвищує точність виготовлення деталей, але й забезпечує стабільне відтворення розмірів у

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						19
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

серійному або масовому виробництві, що критично важливо для сучасної машинобудівної галузі.

днією з ключових конструктивних переваг цієї моделі верстатного обладнання є повна відмова від традиційної трансмісії у вузлі приводу шпинделя. Зокрема, у даній конфігурації відсутній ремінний передавальний механізм, який зазвичай використовується для з'єднання електродвигуна зі шпинделем.

Виключення з конструкції ремінної передачі забезпечує низку технічних і експлуатаційних переваг:

- По-перше, підвищується загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) системи, оскільки усуваються втрати енергії, що виникають під час передавання моменту через ремінь.
- По-друге, зменшується рівень механічних вібрацій, які традиційно передаються на шпиндель через ремінь і шківи. Це безпосередньо покращує якість обробки, особливо при виконанні високоточних операцій.
- По-третє, підвищується надійність і довговічність вузла шпинделя, що є критично важливим у випадках, коли верстат експлуатується у безперервному або багатозмінному режимі.

Таким чином, відмова від ремінного приводу на користь прямого приводу (Direct Drive) дозволяє не лише підвищити технологічну ефективність, але й суттєво зменшити експлуатаційні витрати, пов'язані з технічним обслуговуванням, регулюванням натягу ременів та їх періодичною заміною [9].

У підсумку, такий підхід до конструювання приводу шпинделя є відображенням сучасних тенденцій у верстатобудуванні, орієнтованих на надійність, точність, енергоефективність та мінімізацію зношування у вузлах з інтенсивним навантаженням.

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						20
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

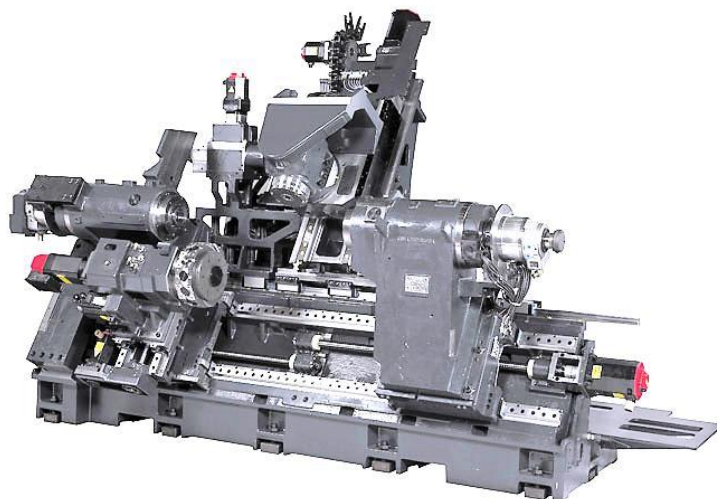


Рисунок 1.1 – Станина

З метою забезпечення ефективного тепловідведення та підвищення термостійкості вузлів, у конструкції передбачено систему примусового масляного охолодження для обох шпинделів — лівого та правого. Такий підхід дозволяє стабілізувати температурний режим під час інтенсивної експлуатації, зменшити ризик перегріву, а також забезпечити довготривалу й надійну роботу механізмів у жорстких умовах багатоциклового навантаження [13].

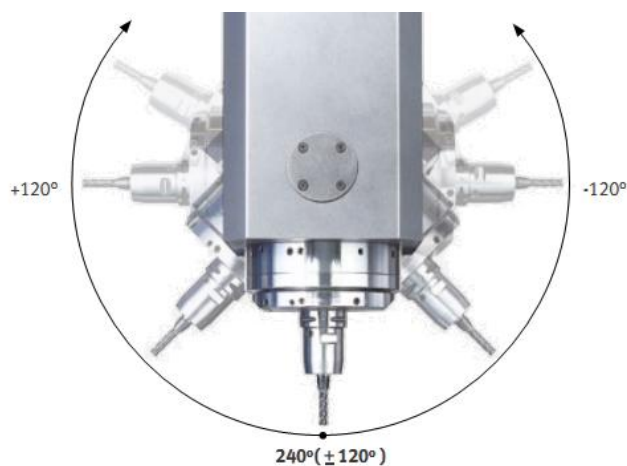


Рисунок 1.2 – Діапазон обертання осі В

Комплексне використання оброблювальних центрів (ОЦ) із можливістю інтеграції допоміжних автоматизованих систем подачі заготовок і вивантаження готових виробів. Завдяки цьому стає можливим повноцінне обробки деталей тіл

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

обертання, що суттєво оптимізує виробничий процес. Такий рівень автоматизації дозволяє не лише досягти високої геометричної точності, але й значно підвищити загальну продуктивність обробки, зменшуючи кількість технологічних переходів і виключаючи потребу у багаторазовому ручному переналагодженні обладнання. Крім того, скорочення чистого машинного часу на виготовлення однієї деталі безпосередньо впливає на зниження собівартості продукції, підвищення конкурентоспроможності підприємства та ефективності використання виробничих ресурсів [9].

У сучасних умовах жорсткої конкуренції в галузі машинобудування, мінімізація витрат часу на обробку лишається одним із ключових чинників, що визначає доцільність впровадження того чи іншого верстатного обладнання. Надзвичайно високий рівень продуктивності сучасного верстатного обладнання забезпечується завдяки реалізації концепції інтегрованої багатофункціональної обробки, що дозволяє виконувати повний спектр технологічних операцій у рамках одного єдиного установу. Такий підхід значно знижує потребу у переналаштуванні, перенесенні деталі між різними верстатами та, відповідно, скорочує загальний виробничий цикл. Однією з ключових переваг є суттєве зменшення сумарного часу на обробку завдяки інтеграції точіння, фрезерування, а також виконання додаткових технологічних переходів на допоміжному шпинделі без потреби у зміні обладнання. Синхронна робота основного і додаткового шпинделів забезпечує паралельне виконання процесів, що суттєво підвищує ефективність завантаження верстата. Додатково слід відзначити надвисоку швидкість швидких переміщень по осях, що може досягати до 48 метрів за хвилину, завдяки чому міжопераційний час і холості переміщення інструменту зводяться до мінімуму. Це дозволяє не тільки збільшити кількість деталей, що виготовляються за одиницю часу, а й зменшити знос приводних механізмів за рахунок оптимізації траєкторії руху. Таким чином, завдяки поєднанню багатофункціональної обробки, високих швидкісних характеристик, а також інтелектуальної оптимізації циклу, досягається надзвичайна

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						22
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

продуктивність, яка відповідає вимогам сучасного серійного та масового виробництва високоточної продукції [17].

Забезпечення високоточної та швидкісної обробки на верстатах сучасного покоління досягається завдяки інтеграції передових конструкторських рішень, серед яких ключову роль відіграє застосування напрямних ковзання з лінійними елементами (типу LM), відомих своєю надзвичайною жорсткістю, мінімальними люфтами та стабільністю параметрів при довготривалому навантаженні. Ці напрямні гарантують плавність та високу точність переміщень робочих органів навіть при динамічних режимах функціонування. Крім того, для мінімізації впливу термічних навантажень, що виникають у процесі інтенсивної безперервної обробки, у конструкцію верстата інтегрована високоефективна система термостабілізації. Масляне охолодження, реалізоване у вузлах обертання шпинделя та по напрямках подачі, дозволяє стабілізувати температурне поле в критичних зонах. Завдяки цьому забезпечується збереження геометричної стабільності протягом усього виробничого циклу - похибка позиціонування осей не перевищує $0,0001^\circ$, що істотно зменшує потребу в операціях додаткового доведення точності або ручного коригування [11].

Для забезпечення прецизійної точності позиціонування при серійному та масовому виготовленні деталей, особливо в умовах підвищених режимів різання, багатозмінної роботи й частих переходів між чорною та чистовою обробкою, верстати обладнуються системами прямого вимірювання положення. Такі системи використовують високоточні лінійні енкодери (вимірювальні лінійки), які дають змогу у режимі реального часу виявляти навіть незначні відхилення переміщення внаслідок температурних впливів, вібрацій або навантажень. Корекція цих відхилень виконується автоматизованим контуром зворотного зв'язку, що включає алгоритми адаптивного керування з урахуванням змінних навантажень. Результатом є досягнення надвисокої точності позиціонування - до 3 мкм, незалежно від тривалості експлуатації, складності оброблюваного контуру чи характеру обраного технологічного режиму. Таким чином, сукупність

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						23
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вказаних технічних рішень дозволяє значно покращити якість кінцевої продукції, зменшити кількість браку, підвищити надійність технологічного процесу та ефективність використання обладнання у виробничих умовах [17].

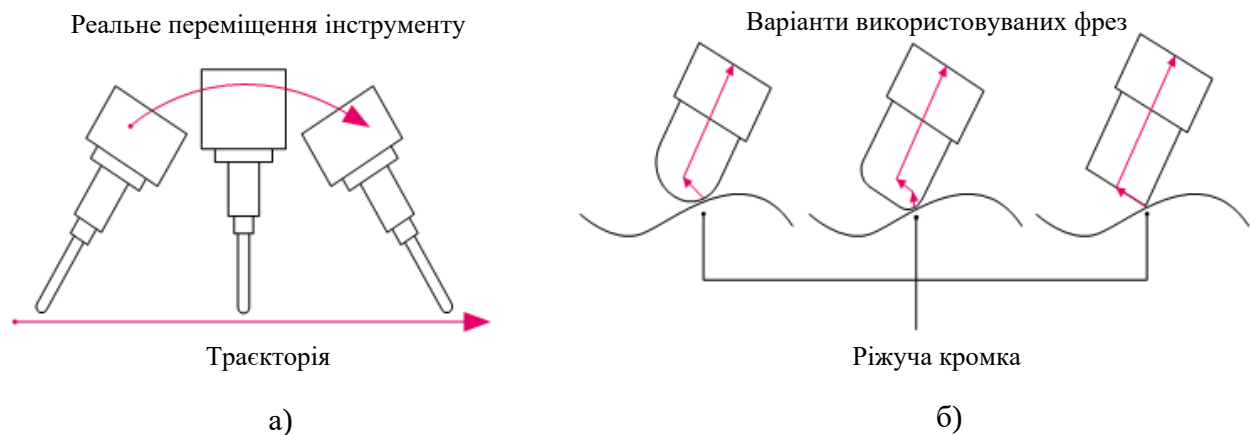


Рисунок 1.3 – а) TCP; б) 3D Cutter Compensation

Застосування сучасного верстатного обладнання, що оснащено спеціалізованими функціями для високоточної обробки, значно спрощує виготовлення складних просторових поверхонь. Це особливо актуально при виробництві геометрично складних деталей, таких як лопатки турбін, імпелери, пропелери або крильчатки, де критично важливо дотримуватись суворих допусків та гладкості контурів. Інтеграція цих функцій дозволяє з високою точністю відтворювати 3D-контури з варіативною кривизною та забезпечує узгоджену обробку по всіх координатах. Серед конструктивних переваг розглянутих моделей особливо варто відзначити ортогональне компоновання основних вузлів, що дає змогу ефективно використовувати весь потенціал просторової кінематики. Такий підхід дозволяє збільшити діапазон робочого переміщення по осі Y до 300 мм, що істотно розширює можливості по обробці великогабаритних або нестандартних за формою заготовок. Завдяки цьому оператор має змогу виконувати багатоопераційне фрезерування, свердління або точіння за один установ, знижуючи необхідність у повторному позиціюванні деталі. Таким

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

чином, ортогональна архітектура в поєднанні з розширеною кінематичною схемою забезпечує не лише збільшення зони обробки, але й покращення динамічних характеристик обладнання, таких як стабільність траєкторій, жорсткість при обробці та відсутність паразитних вібрацій. У підсумку це підвищує продуктивність і якість виготовлення критичних елементів, що мають складну поверхневу топографію [16].

Привід подачі у верстатних системах виконує функцію відстеження та точного дотримання швидкісного режиму переміщення виконавчого вузла, зокрема силової головки, відповідно до заданих параметрів. У випадку використання числового програмного управління (ЧПУ) він функціонує згідно з алгоритмами, сформованими у керуючій програмі, забезпечуючи синхронізацію координатного руху та дотримання режимів подачі, що є критичним для досягнення високої точності обробки [15].

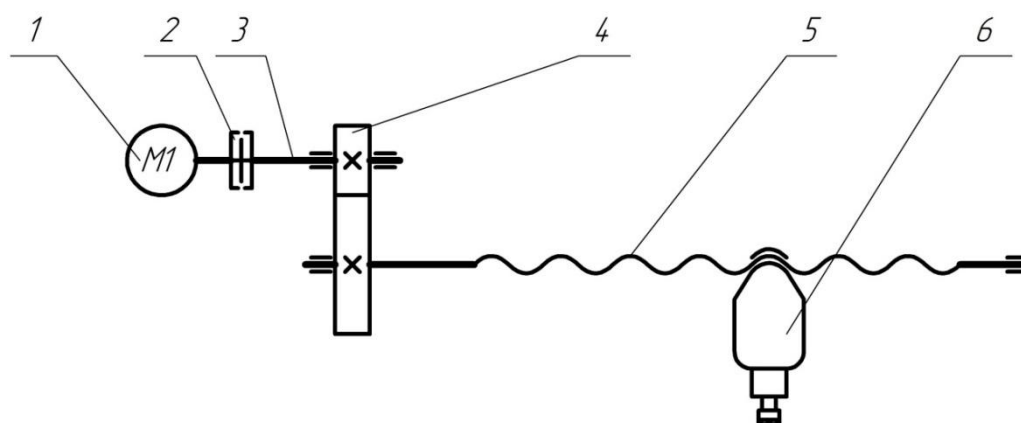


Рисунок 1.4 –Привод фрезерної голівки: 1 – Електродвигун; 2 – дискова двостороння муфта зчеплення; 3 – вал; 4 – редуктор; 5 – Нерозмірна передача «гвинт-гайка»; 6 – силова фрезерна голівка.

Допустимий рівень відхилення частоти обертання електродвигуна у межах усього робочого діапазону не повинен перевищувати 5% від заданої номінальної величини. Системи керування мають забезпечувати високу швидкодію в умовах зміни навантаження, зокрема динамічна реакція на коливання моменту

навантаження повинна відбуватись у межах часу від 0,1 до 0,3 секунди. Крім того, встановлюються конкретні вимоги до середнього прискорення виконавчих елементів, зокрема для кулькогвинтових передач. Наприклад, у випадку, коли номінальний момент не перевищує $1,7 \text{ Н}\cdot\text{м}$, а момент інерції системи становить $0,002 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, привід має забезпечити прискорення на рівні до 1000 рад/с^2 . Для більш потужних систем із моментом до $170 \text{ Н}\cdot\text{м}$ і моментом інерції $2,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ відповідне прискорення повинно сягати приблизно 1500 рад/с^2 . Окрему категорію електроприводів утворюють високошвидкісні системи, що застосовуються на шліфувальному, свердлильному та фрезерному обладнанні. Такі приводи здатні працювати в широкому діапазоні частот обертання, який у деяких випадках досягає співвідношення 1:1000. Максимальна швидкість обертання у цих системах може становити до 15 000 об/хв і навіть більше, що вимагає застосування лише асинхронних або синхронних двигунів, здатних працювати у високочастотному режимі. Висуваються жорсткі вимоги до стабільності підтримки частоти обертання - навіть у змінних режимах вона повинна залишатися максимально сталою. Також слід зазначити, що час розгону таких двигунів, навіть на максимальну швидкість, повинен бути не більше 0,1–0,2 секунди. Сучасні високошвидкісні електроприводи мають вражаючі показники потужності - наприклад, моделі на 25 кВт можуть досягати швидкості обертання до 48 000 об/хв, що робить їх незамінними у високоточних і продуктивних виробничих процесах [18].

У минулому системи подачі металорізальних верстатів реалізовувалися переважно за допомогою ступінчастого регулювання, що здійснювалось через механічні коробки подач або редуктори. У деяких випадках також використовували приводи з плавним регулюванням обертів електродвигуна. Однією з ключових технічних вимог до приводу подачі є забезпечення стабільного (майже незмінного) значення обертового моменту навіть за умов значного зниження частоти обертання вала. Це особливо актуально при обробці матеріалів, які потребують високої точності при малих швидкостях подачі. У

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						26
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сучасних верстатах потреба у складних механічних системах регулювання, таких як коробки передач або понижувальні редуктори, практично зникла. Завдяки розвитку силової електроніки та цифрових систем керування, повний діапазон регулювання частоти обертання забезпечується виключно електричними засобами. Сучасні приводи подач охоплюють надзвичайно широкий діапазон частот регулювання - до співвідношення 1:20 000, що дозволяє точно налаштовувати швидкість подачі для будь-якого режиму різання без потреби у механічних перемиканнях. Діапазон потужності електроприводів, що використовуються у механізмах подачі, зазвичай знаходиться у межах від 0,1 до 20 кВт, залежно від типу верстата, технологічної операції та габаритів оброблюваних деталей. Реверс (зміна напрямку руху подачі) також, як правило, реалізується безпосередньо за допомогою електропривода, без участі механічного перемикання. Щодо перевантажувальної здатності, приводи подач повинні бути здатні витримувати короточасні навантаження, що в 2–4 рази перевищують їх номінальні значення, особливо в умовах складного режиму різання або обробки матеріалів підвищеної твердості. Така здатність до перенавантаження є критичною для забезпечення стабільності процесу обробки та захисту обладнання від аварійних ситуацій [17].

Вимоги, які висуваються до електроприводів і систем автоматичного керування металорізальними верстатами, формуються на основі особливостей технологічного процесу, конструктивних параметрів самого верстатного обладнання, а також характеристик ріжучого інструменту. З технологічної точки зору, найважливішими є наступні критерії: можливість реалізації широкого спектру режимів обробки з використанням сучасного інструментарію; забезпечення максимальної продуктивності процесу; досягнення високих показників точності геометричних параметрів оброблюваних деталей; отримання високоякісної поверхні з мінімальною шорсткістю; стабільна повторюваність результатів обробки у межах однієї партії заготовок [16].

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						27
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Реалізація вищезазначених вимог є можливою лише за умови узгодженої роботи декількох підсистем: конструктивно-технологічних можливостей верстата, ефективності роботи ріжучого інструменту, потужності головного приводу, а також динамічних характеристик системи подачі й регулювання. Окрему увагу необхідно приділяти узгодженню зусиль, які виникають під час різання, зі швидкістю цього процесу, оскільки саме ці два фактори визначають необхідну потужність, яку має забезпечити електропривод.

Для головного руху найбільш доцільним варіантом є реалізація системи регулювання частоти обертання з підтриманням сталої потужності на всьому діапазоні. Це обумовлено характерною залежністю між швидкістю різання та навантаженням: при високих швидкостях різання зазвичай спостерігається зниження зусиль, у той час як на малих швидкостях, навпаки, різальні сили зростають. Отже, принцип підтримання сталої потужності дозволяє оптимізувати енергетичне навантаження в залежності від умов обробки [14].

Вибір діапазону зміни частоти обертання головного приводу безпосередньо пов'язаний із вимогами до швидкості різання та габаритними розмірами оброблюваних заготовок, особливо - їхнім діаметром. Для універсального обладнання, яке має обробляти деталі з різними геометричними параметрами та з матеріалів різної твердості, необхідно забезпечити гнучке та широке регулювання частоти обертання. Це дозволяє реалізовувати режими різання відповідно до нормативних параметрів, заданих для кожного конкретного випадку [17].

Таким чином, система керування головним приводом повинна бути здатною адаптуватися до технологічних умов шляхом точного, динамічного та плавного регулювання швидкості обертання з урахуванням як розмірів деталі, так і властивостей матеріалу, що обробляється.

У даному розділі було здійснено детальний аналіз сучасних типів металообробного обладнання, їх технічних можливостей і типових сфер застосування. Особливу увагу приділено функціональним характеристикам та рівню технологічної гнучкості верстатів. У сучасних умовах пріоритетними

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						28
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стають високотехнологічні обробні центри з розширеним функціоналом, які значно переважають традиційні одноопераційні або багатоопераційні верстати [18].

З огляду на сучасні тенденції, найбільшу практичну цінність мають універсальні металообробні центри, здатні виконувати комплекс механічних операцій у кількох площинах без необхідності переустановки заготовки. Завдяки інтеграції числового програмного управління (ЧПУ) забезпечується висока точність позиціонування та відтворення заданої геометричної форми деталі з мінімальним впливом людського фактору. Такі машини є ключовими в умовах серійного або масового виробництва, де важливі швидкість, точність та економічне використання ресурсів [16].

У межах подальшого дослідження, яке відповідає тематиці дипломного проєкту, буде виконано обґрунтований інженерний розрахунок електроприводу переміщення силової головки одного з таких обробних центрів. У якості приводу планується застосування асинхронного електродвигуна, що поєднує в собі простоту конструкції, високу надійність та адаптивність до систем автоматичного керування.

Крім того, в цьому розділі було проаналізовано основні технічні вимоги, які висуваються до електроприводів сучасного металообробного обладнання. Серед них: здатність забезпечувати широкий діапазон регулювання швидкості, високу точність позиціонування, стабільність динамічних характеристик, енергоефективність і адаптивність до змін навантаження.

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						29
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ВИЗНАЧЕННЯ ДВИГУНА

З огляду на те, що однією з найбільш поширених та універсальних технологічних операцій, які виконуються на багатоцільових верстатах, є фрезерування, доцільно зосередити увагу саме на цьому процесі. Метод фрезерної обробки забезпечує можливість високоточного формування широкого спектра геометричних поверхонь – як плоских, так і просторово складних. Зокрема, за допомогою фрезерування можна виготовляти зубчасті колеса, зенкери, розвертки, шпонкові канавки, шліци, багатогранні елементи, а також різного роду гвинтові канавки та фасонні поверхні [18].

Фрезерна обробка дозволяє виконувати оброблення горизонтальних і похилих площин, уступів і пазів, зубчастих рейок та секторів, здійснювати розрізання і відрізання заготовок. Беручи до уваги наведені особливості та широке застосування фрезерування в умовах сучасного виробництва, у наступних розділах даного дипломного дослідження буде виконано проектування, математичне моделювання та аналіз системи керування електроприводом, що використовується в даному технологічному процесі. Особлива увага буде приділена адаптації електропривода до динамічних навантажень, характерних для фрезерних операцій [19].

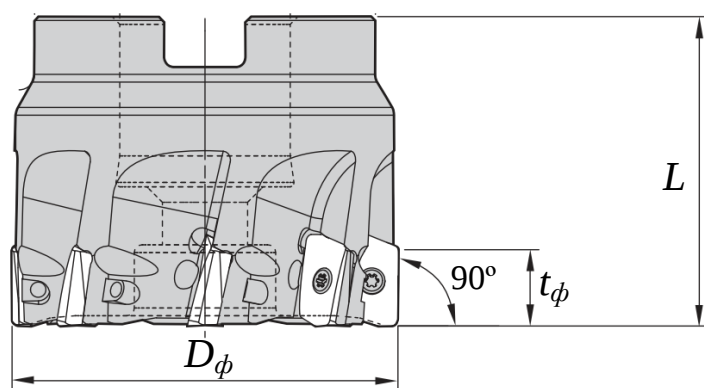


Рисунок 2.1 – Торцева фреза

Процес передбачає виконання операції фрезерування з прорізанням крайової частини заготовки за допомогою інструменту, описаного у попередньому розділі. Технологічна послідовність починається з пуску електроприводу, після чого відбувається плавне нарощування частоти обертання шпинделя фрезерної головки до значення, що відповідає низькій швидкості подачі.

У цьому режимі інструмент обережно входить у матеріал заготовки, забезпечуючи мінімальне навантаження та зниження ймовірності утворення вібрацій. Після завершення фази врізання система переходить у режим основної обробки – швидкість подачі збільшується до заданого номінального рівня, що відповідає оптимальній продуктивності процесу [18].

У момент наближення ріжучого інструмента до кінця оброблюваної зони (тобто перед виходом фрези з деталі), швидкість переміщення знову зменшується до мінімального значення. Це необхідно для уникнення механічного виривання металу та забезпечення якісного формування кромки. Після завершення різання фреза повністю виходить із заготовки, рух зупиняється, і за допомогою реверсивного режиму електропривода виконується зворотний хід інструменту.

Повернення у вихідне положення також здійснюється з використанням малої швидкості подачі, що дозволяє знизити динамічні навантаження на систему і забезпечити плавність ходу механізмів. Така організація процесу дозволяє підвищити як якість обробки, так і довговічність обладнання та інструменту [20].

$$F_Z = 9.8 \cdot C_{F_Z} \cdot t_{\phi}^{X_{F_Z}} \cdot S_Z \cdot B^{U_F} \cdot Z_{\phi} \cdot D_{\phi}^{q_F} \cdot K_{ПЗ} \quad (2.1)$$

$$F_Z = 9.8 \cdot 82.5 \cdot 11.4^{0.95} \cdot 0.15 \cdot 63^{1.1} \cdot 6 \cdot 63^{-1.1} \cdot 1 = 7345 \text{ Н.} \quad (2.2)$$

$$F_X = 0,4 \cdot F_Z = 0,4 \cdot 7345 = 2938 \text{ Н.} \quad (2.3)$$

$$F_Y = 0,3 \cdot F_Z = 0,3 \cdot 7345 = 2203 \text{ Н.} \quad (2.4)$$

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						31
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F_{\text{н3}} = \mu \cdot g \cdot m + \beta \cdot S_{\text{III}} = 0.07 \cdot 9.81 \cdot 30 \cdot 0.5 \cdot 600 = 329.43 \text{ Н.} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} F_{\text{нY}} &= k \cdot F_X + (m \cdot g + F_Z + F_Y) \cdot \mu = \\ &= 1.4 \cdot 2938 + (30 \cdot 9.8 + 7345 + 2203) \cdot 0.07 = 5097 \text{ Н.} \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$M_3 = \frac{F_{\text{н3}} \cdot \frac{d}{1000}}{2} = \frac{329.43 \cdot 0.024}{2} = 4.941 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.7)$$

$$M_Y = \frac{F_{\text{нY}} \cdot \frac{d}{1000}}{2} = \frac{5097 \cdot 0.024}{2} = 61.16 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.8)$$

$$M_{\text{с3}} = \frac{M_3}{i_p \cdot \eta_p} = \frac{4.941}{1.2 \cdot 0.88} = 4.67 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.9)$$

$$M_{\text{сY}} = \frac{M_Y}{i_p \cdot \eta_p} = \frac{61.16}{1.2 \cdot 0.88} = 57.9 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.10)$$

$$P_C = \frac{F_{\text{нY}} \cdot v_B}{60 \cdot \eta_p} = \frac{5097 \cdot 1}{60 \cdot 0.88} = 0.096 \text{ кВт.} \quad (2.11)$$

$$P_p = \frac{z \cdot P_C}{\eta_p} = \frac{1.3 \cdot 0.096}{0.88} = 0.142 \text{ кВт.} \quad (2.12)$$

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{\pi \cdot 750}{30} = 78.54 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.13)$$

$$M_H = \frac{P_{\text{ЕД}}}{\omega} = \frac{3000}{78.54} = 38.19 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.14)$$

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

$$M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \cdot \varepsilon_{\text{доп}}, \quad (2.15)$$

$$J_{\Sigma} = (1 + \delta) \cdot J_{\text{ед}} + m \cdot \rho^2, \quad (2.16)$$

$$\rho = \frac{H}{2 \cdot \pi \cdot i_p} = \frac{0.002}{2 \cdot 3.14 \cdot 1.2} = 0.00026. \quad (2.17)$$

$$J_{\Sigma} = (1 + 0,2) \cdot 0,025 + 30 \cdot 0.00026^2 = 0.03 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.18)$$

$$\varepsilon_{\text{доп}} = \frac{a}{\rho} = \frac{0.08}{0.00026} = 301.5 \text{ рад} / \text{с}^2. \quad (2.19)$$

$$M_{\text{дин}} = 0.03 \cdot 301.5 = 9.048 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.20)$$

$$M_1 = M_{\text{дин}} + M_{\text{сз}} = 9.048 + 4.67 = 13.72 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.21)$$

$$t_1 = \frac{v_n}{60 \cdot a} = \frac{0.5}{60 \cdot 0.08} = 0.104 \text{ с}. \quad (2.22)$$

$$l_1 = \frac{a \cdot t_1^2}{2} = \frac{0.08 \cdot 0.104^2}{2} = 0.00043 \text{ м}. \quad (2.23)$$

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						33
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

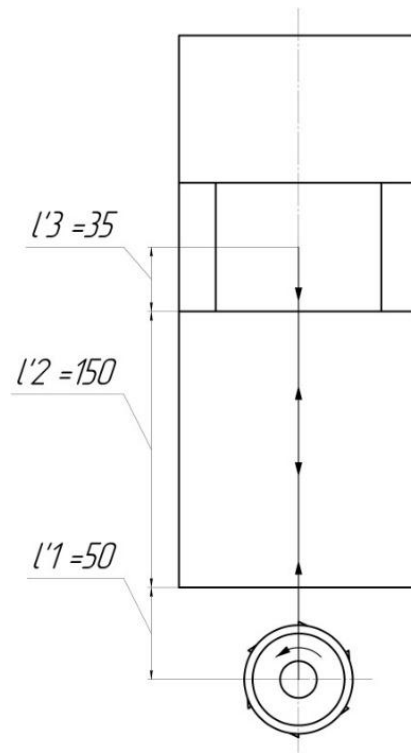


Рисунок 2.2 – Карта руху фрези

$$M_2 = M_{c3} = 4.67 \text{ Н} \cdot \text{м} . \quad (2.24)$$

$$t_2 = \frac{l'_1 \cdot 60}{v_H} - t_1 = \frac{0.05 \cdot 60}{0.5} - 0.104 = 5.896 \text{ с} . \quad (2.25)$$

$$l_2 = l'_1 - l_1 = 0.05 - 0.00043 = 0.04957 \text{ м} . \quad (2.26)$$

$$M_3 = M_{\text{дин}} + M_{cy} = 9.048 + 57.9 = 66 \text{ Н} \cdot \text{м} . \quad (2.27)$$

$$t_3 = \frac{v_B - v_H}{60 \cdot a} = \frac{1 - 0.5}{60 \cdot 0.08} = 0.104 \text{ с} . \quad (2.28)$$

$$l_3 = \frac{v_H}{60} \cdot t_3 + \frac{a \cdot t_3^2}{2} = \frac{0.08 \cdot 0.104^2}{2} = 0.0013 \text{ м} . \quad (2.29)$$

$$M_4 = M_{cy} = 57.9 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.30)$$

$$l_4 = l_2 - 2 \cdot l_3 = 0.15 - 2 \cdot 0.0013 = 0.147 \text{ м}. \quad (2.31)$$

$$t_4 = \frac{l_4 \cdot 60}{v_b} = \frac{0.147 \cdot 60}{1} = 8.844 \text{ с}. \quad (2.32)$$

$$M_5 = M_{cy} - M_{дин} = 57.9 - 9.048 = 48.8 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.33)$$

$$t_5 = t_3 = 0.104 \text{ с}. \quad (2.34)$$

$$l_5 = l_3 = 0.0013 \text{ м}. \quad (2.35)$$

$$M_6 = M_{c3} = 4.67 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.36)$$

$$t_6 = \frac{l'_3 \cdot 60}{v_h} - t_1 = \frac{0.035 \cdot 60}{0.5} - 0.104 = 4.096 \text{ с}. \quad (2.37)$$

$$l_6 = l'_3 - l_1 = 0.035 - 0.00043 = 0.03457 \text{ м}. \quad (2.38)$$

$$M_7 = M_{c3} - M_{дин} = 4.67 - 9.048 = -4.369 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.39)$$

$$t_7 = t_1 = 0.104 \text{ с}. \quad (2.40)$$

$$l_7 = l_1 = 0.00043 \text{ м}. \quad (2.41)$$

$$M_8 = -M_{дин} - M_{c3} = -9.048 - 4.67 = -13.72 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.42)$$

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						35
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$t_8 = \frac{v_H}{60 \cdot a} = \frac{0.5}{60 \cdot 0.08} = 0.104 \text{ с.} \quad (2.43)$$

$$l_8 = \frac{a \cdot t_8^2}{2} = \frac{0.08 \cdot 0.104^2}{2} = 0.00043 \text{ м.} \quad (2.44)$$

$$M_9 = -M_{c3} = -4.67 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.45)$$

$$l_9 = l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6 = \\ = 0.04957 + 0.0013 + 0.147 + 0.0013 + 0.03457 = 0.234 \text{ м.} \quad (2.46)$$

$$t_9 = \frac{l_9 \cdot 60}{v_H} = \frac{0.234 \cdot 60}{0.5} = 28 \text{ с.} \quad (2.47)$$

$$M_{10} = -M_{c3} + M_{\text{дин}} = -4.67 + 9.048 = 4.369 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.48)$$

$$t_{10} = t_1 = 0.104 \text{ с.} \quad (2.49)$$

$$l_{10} = l_1 = 0.00043 \text{ м.} \quad (2.50)$$

$$2(l_1' + l_2' + l_3') = \\ = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6 + l_7 + l_8 + l_9 + l_{10}, \quad (2.51)$$

$$2(0.05 + 0.15 + 0.035) = \\ = 0.00043 + 0.04957 + 0.0013 + 0.147 + 0.0013 + 0.03457 + \\ + 0.00043 + 0.00043 + 0.234 + 0.00043, \quad (2.52)$$

$$0.47 = 0.47. \quad (2.53)$$

На основі попередньо отриманих результатів розрахунків і моделювання формується навантажувальна діаграма, яка враховує зміну моменту навантаження у часі з урахуванням динамічної поведінки електропривода. Оскільки

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

електропривід силової фрезерної головки функціонує в режимі змінного навантаження з періодичним повторенням робочих фаз (врізання, основна обробка, сповільнення, холостий хід), тобто в умовах циклічного навантаження, то особливу увагу при перевірці його працездатності слід приділити тепловому стану [21].

Для аналізу нагріву електродвигуна в умовах змінного режиму роботи застосовується метод еквівалентного моменту. Суть методу полягає в приведенні змінного навантаження до сталого за енергетичним впливом, що дозволяє провести коректну оцінку теплових втрат та допустимого термічного навантаження на двигун протягом усього робочого циклу.

Розрахунок еквівалентного моменту дозволяє визначити, чи відповідає обраний електродвигун заданим умовам експлуатації з точки зору теплової стійкості, зокрема – чи не перевищуватиметься допустима температура обмоток і ізоляційних матеріалів упродовж тривалої роботи в реальних умовах циклічних навантажень [22].

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + M_3^2 \cdot t_3 + M_4^2 \cdot t_4 + M_5^2 \cdot t_5 + M_6^2 \cdot t_6 + M_7^2 \cdot t_7 + M_8^2 \cdot t_8 + \dots + M_9^2 \cdot t_9 + M_{10}^2 \cdot t_{10}}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10} + t_{\text{п}}}} \dots$$

$$= \sqrt{\frac{13.72^2 \cdot 0.104 + 4.67^2 \cdot 5.896 + 66^2 \cdot 0.104 + \dots + 57.9^2 \cdot 8.844 + 48.8^2 \cdot 0.104 + 4.67^2 \cdot 4.096 + (-4.369^2) \cdot 0.104 + \dots + 0.104 + 28 + 0.104 + 15 + (-13.72^2) \cdot 0.104 + (-4.67^2) \cdot 28 + 4.369^2 \cdot 0.104}{\dots}} = 22.24 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.54)$$

$$M_{\text{екв}} \leq M_{\text{н}}. \quad (2.55)$$

$$M_3 \leq \lambda M_{\text{н}},$$

$$M_3 = 66 \text{ Нм},$$

$$\lambda M_{\text{н}} = 38.19 \cdot 2.2 = 84.034 \text{ Нм},$$

$$66 \text{ Нм} \leq 84.034 \text{ Нм}. \quad (2.56)$$

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

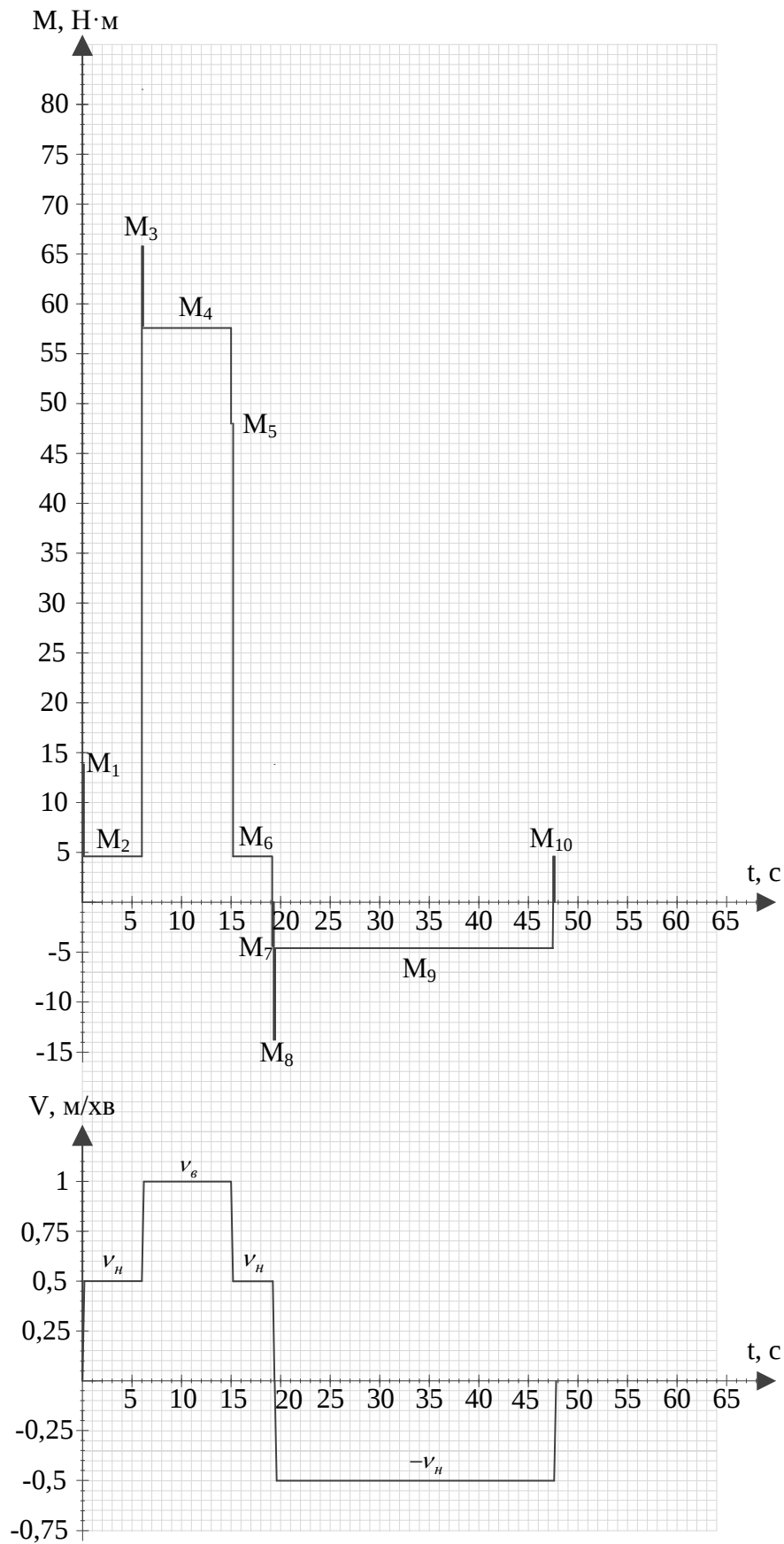


Рисунок 2.3 – Навантажувальна діаграма

У даному розділі було здійснено комплексний аналіз та визначення необхідної потужності електродвигуна, що забезпечує функціонування приводу силової фрезерної головки. Розрахунки були виконані з урахуванням найбільш навантаженого технологічного режиму – фрезерування з максимальною шириною знімання матеріалу. У процесі обчислень були враховані геометричні параметри оброблюваної деталі, характеристики фрезерного інструменту, а також кінематичні та масоінерційні властивості механічної частини приводу [19].

На основі одержаних розрахункових значень визначено необхідний рівень потужності для забезпечення стабільної роботи електропривода без перевантаження і перегріву в найбільш критичних умовах. З урахуванням теплових обмежень та динамічних навантажень було обрано електродвигун асинхронного типу з короткозамкненим ротором серії 4А номінальною потужністю 3 кВт [20].

Слід зазначити, що вибір двигуна з істотним запасом по потужності (у 20 разів перевищує розраховану потребу) обумовлений специфікою експлуатаційних характеристик серії 4А. Усі електродвигуни цієї серії з меншою номінальною потужністю не здатні забезпечити необхідну термічну стійкість при навантаженнях, характерних для даної задачі, а також не відповідають вимогам по перевантажувальній здатності та швидкодії.

Використовуючи номінальні паспортні параметри обраного двигуна, було побудовано навантажувальну діаграму, яка відображає зміну електромеханічних величин у процесі роботи, а також сформовано тахограму - графік зміни швидкості обертання фрезерної головки у часі. Обидва графіки враховують динамічні аспекти функціонування приводу, що дозволяє здійснити подальший аналіз термонавантаження і забезпечити правильний підбір параметрів системи керування.

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

3 СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

У сучасних системах автоматизованого керування електроприводами змінного струму ключову роль відіграють перетворювачі частоти, які реалізовані за схемою з проміжною ланкою постійного струму. Ця архітектура забезпечує високий ступінь універсальності та дозволяє адаптувати привод до широкого спектра експлуатаційних режимів. Сучасні електроприводи даного типу широко використовуються як у промисловому устаткуванні, так і в побутовій техніці завдяки своїй гнучкості та енергоефективності [20].

У структурному плані перетворювач частоти виконує функції як силового, так і керуючого компонента. Він складається з випрямляча, фільтра (ланки постійного струму), інвертора (який формує змінну напругу необхідної частоти) та мікропроцесорного керуючого модуля. Завдяки цьому перетворювач частоти стає центральним вузлом у електромеханічній системі, що формує змінну напругу з регульованими параметрами для живлення асинхронного двигуна. Оскільки функціональність перетворювача значно перевищує лише перетворення електричної енергії, а включає також керування швидкістю, моментом і динамічними характеристиками електродвигуна, у практиці його іноді умовно називають «електроприводом». Проте з наукової точки зору та з позиції стандартного визначення, електропривод - це комплексна система, яка включає в себе двигун, силовий перетворювач, систему керування, механічне навантаження та зворотні зв'язки [21].

Такий тип побудови електроприводу з використанням перетворювача частоти дозволяє досягати високої точності регулювання частоти обертання вала, зменшити пускові струми, реалізувати м'який пуск, а також значно знизити знос механічних компонентів. Більше того, застосування векторного керування або керування за скалярним законом дає змогу досягати різного рівня продуктивності в залежності від вимог до системи. Завдяки впровадженню цифрових мікроконтролерів та алгоритмів ШІМ (широтно-імпульсної модуляції) сучасні

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						40
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перетворювачі частоти не лише забезпечують оптимізацію енергоспоживання, а й активно компенсують негативні фактори, пов'язані з нелінійностями навантаження та пульсаціями напруги. Усі ці переваги роблять частотні перетворювачі невіддільним елементом сучасного автоматизованого електропривода, особливо в умовах високих вимог до динаміки, точності та енергоефективності [23].

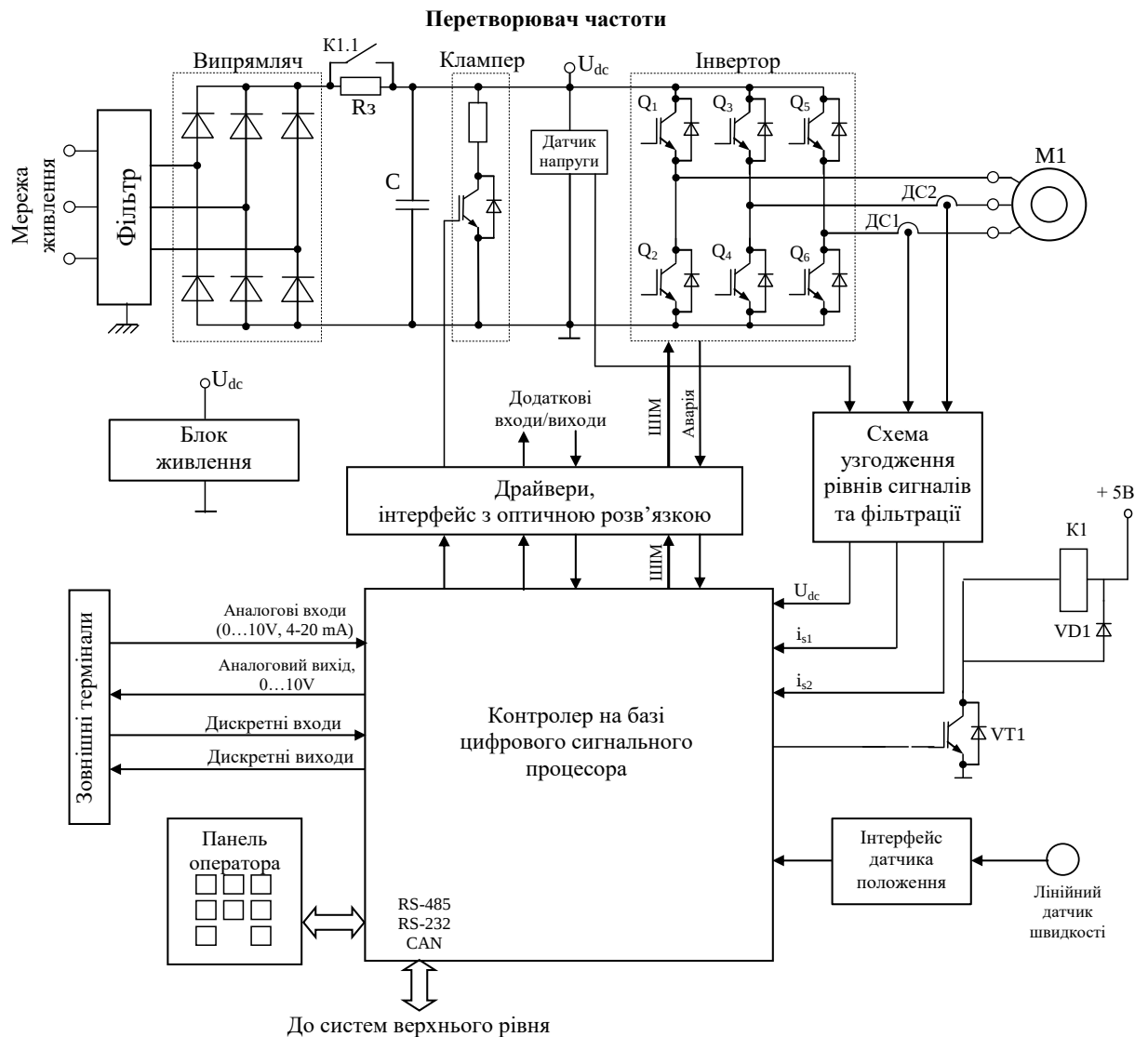


Рисунок 3.1 – Функціональна схема

Датчик вимірювання напруги використовується для відстеження значення напруги на шині постійного струму, дані з якого передаються до мікропроцесорного контролера системи керування. Отримана інформація

необхідна для виконання кількох важливих функцій: забезпечення контролю над процесом заряджання конденсаторів фільтру після випрямлення, реалізації алгоритмів захисту обладнання, а також для формування широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) з урахуванням реального енергетичного стану силової частини [22].

Інверторний модуль здійснює функцію перетворення напруги постійного струму у трифазну змінну напругу з наперед заданими параметрами. Вектор результуючої напруги, отриманий шляхом усереднення протягом періоду ШІМ, формується так, щоб відповідати заданим значенням амплітуди, частоти та фазового зсуву, що дозволяє ефективно керувати електродвигуном в реальному часі.

Фазові датчики струму (ДС1, ДС2) виконують роль вимірювальних елементів, що зчитують миттєві значення струмів у фазах асинхронного двигуна. Ці сигнали необхідні для реалізації зворотного зв'язку у системах векторного керування, формування коригуючих дій, а також для спрацювання захисних механізмів у разі перевищення допустимих струмів, що може вказувати на коротке замикання або перевантаження [24].

Енкодер або інший датчик кутової швидкості забезпечує зчитування обертальної швидкості або положення ротора. Ця інформація критично важлива для точного векторного регулювання, реалізації контурів зворотного зв'язку за швидкістю і положенням, а також для активації захисних сценаріїв у разі втрати синхронізації або перевищення допустимих значень швидкості.

Драйвери силових ключів призначені для узгодження логічних сигналів з керуючого модуля з реальними електричними характеристиками силових IGBT транзисторів. Вони забезпечують необхідні амплітуду, тривалість та швидкість фронтів сигналів відкривання/закривання ключів. У сучасних драйверах також реалізовані вбудовані захисні функції, зокрема обмеження надструмів, виявлення коротких замикань і перегріву [25].

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						42
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Система гальванічної розв'язки (опторозв'язка) забезпечує фізичну електричну ізоляцію між високовольтною силовою частиною перетворювача та малопотужною логічною частиною системи управління. Такий підхід значно підвищує електромагнітну сумісність, дозволяє захистити контролер від перенапруг і імпульсних перешкод. У високопотужних системах застосовуються оптичні канали передачі сигналів або оптоволоконні з'єднання.

Мікроконтролер (PLC) є головним обчислювальним блоком у структурі електропривода. Він виконує основну логіку управління: отримує команди на зміни заданих координат (швидкість, момент, положення), обробляє сигнали від усіх датчиків, генерує сигнали керування ШІМ, ініціює дії захисту та підтримує обмін з іншими рівнями автоматизації через стандартні протоколи зв'язку (наприклад, Modbus, CANopen, Profibus тощо) [26].

Схеми узгодження сигналів і фільтрації служать для адаптації аналогових сигналів з датчиків до вимог аналогово-цифрового перетворювача керуючого модуля. У таких схемах реалізується нормалізація рівнів, захист від перенапруг, а також активна фільтрація шумів та перешкод, що особливо важливо в промислових умовах з підвищеним електромагнітним фоном [24].

$$U_n = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219.393 \text{ В.} \quad (3.1)$$

$$U_{na} = \sqrt{2}U_n = \sqrt{2} \cdot 219.393 = 310.269 \text{ В,} \quad (3.2)$$

$$I_{na} = \sqrt{2}I_n = \sqrt{2} \cdot 7.74 = 10.95 \text{ А.} \quad (3.3)$$

$$I_n = \frac{P_{\text{ЕД}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{Ін}} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{3000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0.795 \cdot 0.74} = 7.74 \text{ А.} \quad (3.4)$$

$$I_{\text{max}} = k_{\text{ovl}} I_{na} = 2.5 \cdot 10.95 = 27.39 \text{ А.} \quad (3.5)$$

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						43
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$U_{dcn} = \sqrt{2}U_{grid} \approx 540 \text{ В.} \quad (3.6)$$

$$U_{ce} > 1.5U_{dc \max} \quad (3.7)$$

$$U_{ce} = 1.5 \cdot 750 = 1125 \text{ В.} \quad (3.8)$$

$$I_c > I_{\max}, U_{ce \max} > U_{ce}, \quad (3.9)$$

$$C = \frac{1}{2\pi k_p m f R_0}, \quad (3.10)$$

$$I_{dc} = \frac{k_{ovl} P_n}{U_{dcn} \eta \eta_{inv}} = \frac{2.5 \cdot 3000}{540 \cdot 0.795 \cdot 0.96} = 18.19 \text{ А} \quad (3.11)$$

$$R_0 = \frac{U_{dcn}}{I_{dc}} = \frac{540}{18.19} = 29.67 \text{ Ом.} \quad (3.12)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 0.035 \cdot 3 \cdot 50 \cdot 29.67} = 998.7 \text{ мкФ.} \quad (3.13)$$

Під час вибору струмових датчиків для електроприводної системи першочергово враховується граничне значення струму, який може виникати у процесі роботи. Вимірювальний діапазон обраного датчика повинен із запасом перекривати максимально можливу величину струму в системі, щоб уникнути насичення, спотворень або виходу датчика з ладу під час пікових навантажень. Це особливо важливо для застосувань, де струм може різко змінюватися, зокрема при пускових режимах або раптових збуреннях навантаження.

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

У випадку, коли йдеться про визначення струмів на виході інвертора, параметром, на який орієнтуються при виборі сенсорів, є пікове значення фазного струму, який може протікати через навантаження (наприклад, обмотки асинхронного двигуна). Правильний підбір забезпечує достовірну та безпечну роботу як захисних, так і регулюючих елементів системи керування [27].

Однак у деяких випадках, з метою зменшення вартості силової електроніки, допускається відмова від встановлення струмових сенсорів у вихідних фазах інвертора. Таке рішення є технічно обґрунтованим, якщо застосована стратегія керування двигуном не передбачає необхідності формування зворотних зв'язків за струмом - наприклад, у спрощених схемах регулювання або при використанні відкритих систем управління без векторного керування.

У таких конфігураціях обмежуються використанням одного датчика струму, встановленого у ланці постійного струму, між випрямлячем і інвертором. Він виконує функцію моніторингу загального енергоспоживання та виявлення аварійних ситуацій, таких як короткі замикання чи перевантаження. Хоча така система менш точна з точки зору керування електромагнітними процесами в двигуні, вона є економічно доцільною в невибагливих або бюджетних застосуваннях [28].

Таким чином, остаточне рішення щодо кількості та типу струмових сенсорів приймається залежно від структури системи управління, необхідного рівня точності керування, вимог до динаміки, а також фінансових і конструктивних обмежень проєкту.

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						45
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

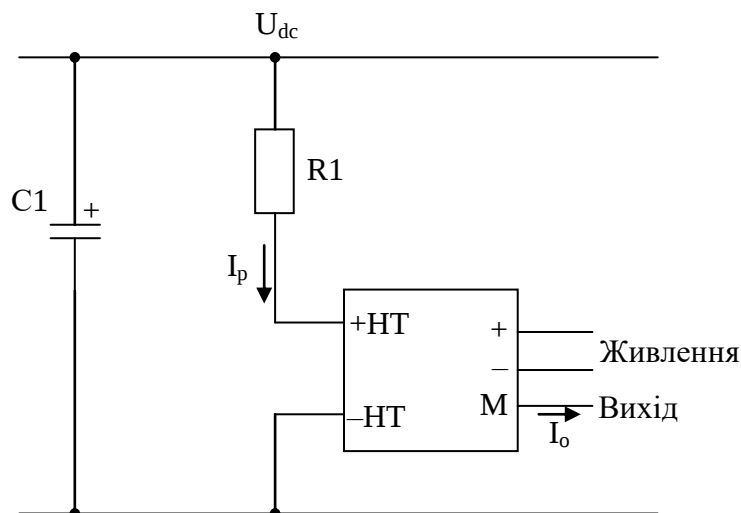


Рисунок 3.2 – Підключення датчика напруги

У сучасному машинобудуванні та металообробних технологіях все більшої актуальності набуває використання методів векторного керування асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором. Однією з головних переваг цієї системи є її здатність забезпечувати високу точність та стабільність регулювання швидкості й моменту, як у сталих, так і у динамічних режимах роботи електропривода. Принцип дії векторного управління базується на моделюванні асинхронного двигуна як еквівалентної машини постійного струму, де напрямки і величини потокозчеплення ротора і струму керуються окремо. Це дозволяє здійснювати гнучке і точне регулювання механічних координат — швидкості обертання та електромагнітного моменту. Проте ефективність і стабільність цієї системи значною мірою залежать від точності визначення внутрішніх параметрів двигуна, зокрема електричних характеристик його обмоток. Найбільш критичним параметром у даній системі є активний опір ротора, який напряму впливає на коректність розрахунку потокозчеплення і, відповідно, на координати вектора струму. На практиці цей параметр є складним для безпосереднього вимірювання в умовах реального часу. До того ж, під впливом навантаження і нагріву в процесі тривалої експлуатації активний опір ротора може змінюватися в межах 50–100% від номінального значення (у 1.5–2 рази). Такі коливання значно впливають на точність реалізації алгоритмів полеорієнтації [29]і.

Як наслідок, спостерігається порушення умов синхронізації вектора потокозчеплення з реальним магнітним полем ротора, що спричиняє втрату точності в керуванні механічними змінними, такими як швидкість і момент. Відхилення від ідеальних умов управління також знижують загальний ККД системи електропривода, погіршуючи її енергетичну ефективність, що є особливо критичним у виробництві з високою питомою енерговитратою, зокрема в галузі металорізальних операцій [22].

Таким чином, доцільність впровадження векторного управління в металорізальних верстатах обумовлена його високою продуктивністю й точністю, але для досягнення повної ефективності необхідне динамічне спостереження за параметрами ротора та адаптивне налаштування керуючих алгоритмів.

$$\begin{aligned}
 \dot{\omega} &= \mu(\psi_d \dot{i}_q - \psi_q \dot{i}_d) - M_c / J, \\
 \dot{\psi}_d &= -\alpha_n \psi_d + \omega_2 \psi_q + \alpha_n L_m \dot{i}_d - \Delta\alpha(\psi_d - L_m \dot{i}_d), \\
 \dot{\psi}_q &= -\alpha_n \psi_q - \omega_2 \psi_d + \alpha_n L_m \dot{i}_q - \Delta\alpha(\psi_q - L_m \dot{i}_q), \\
 \dot{i}_d &= -\gamma_n \dot{i}_d + \omega_0 \dot{i}_q + \alpha_n \beta \psi_d + \beta \omega \psi_q + \sigma^{-1} u_d + \Delta\alpha \beta (\psi_d - L_m \dot{i}_d), \\
 \dot{i}_q &= -\gamma_n \dot{i}_q - \omega_0 \dot{i}_d + \alpha_n \beta \psi_q - \beta \omega \psi_d + \sigma^{-1} u_q + \Delta\alpha \beta (\psi_q - L_m \dot{i}_q), \\
 \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0; \varepsilon_0(0) = 0,
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \left(\frac{R_{2n}}{L_2} + \frac{\Delta R_2}{L_2} \right) \square \alpha_n + \Delta\alpha > 0, \\
 \beta &= \frac{L_m}{\sigma L_2}, \\
 \gamma_n &= \frac{R_1}{\sigma} + \alpha_n L_m \beta, \\
 \sigma &= L_1 - \frac{L_m^2}{L_2}, \\
 \mu &= \frac{3L_m}{(2L_2 J)},
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{X}_{(d-q)} &= \mathbf{e}^{-J\varepsilon_0} \mathbf{X}_{(a-b)}, \\
\mathbf{X}_{(a-b)} &= \mathbf{e}^{J\varepsilon_0} \mathbf{X}_{(d-q)}, \\
\mathbf{e}^{-J\varepsilon_0} &= \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & \sin \varepsilon_0 \\ -\sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix},
\end{aligned} \tag{3.16}$$

$$\begin{aligned}
\dot{\omega} &= \mu(\psi_d \mathbf{i}_q - \psi_q \mathbf{i}_d) - \mathbf{M}_c / J, \\
\dot{\psi}_d &= -\alpha_n \psi_d + \omega_2 \psi_q + \alpha_n L_m \mathbf{i}_d - \Delta \alpha (\psi_d - L_m \mathbf{i}_d), \\
\dot{\psi}_q &= -\alpha_n \psi_q - \omega_2 \psi_d + \alpha_n L_m \mathbf{i}_q - \Delta \alpha (\psi_q - L_m \mathbf{i}_q), \\
\dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0; \varepsilon_0(0) = 0,
\end{aligned} \tag{3.17}$$

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \sqrt{\psi_d^2 + \psi_q^2} \end{pmatrix} \square \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ |\psi| \end{pmatrix}, \tag{3.18}$$

$$\mathbf{y}^* = (\mathbf{v}^*, \psi^*)^T \tag{3.19}$$

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{y} - \mathbf{y}^* = \begin{pmatrix} \mathbf{v} - \mathbf{v}^* \\ |\psi| - \psi^* \end{pmatrix} \square \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{v}} \\ \tilde{\psi} \end{pmatrix}. \tag{3.20}$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\mathbf{v}} = 0, \tag{3.21}$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} = 0, \tag{3.22}$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi}_d = 0, \tag{3.23}$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi}_d = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi}_q = 0, \tag{3.24}$$

$$\begin{aligned}
\dot{\hat{\mathbf{i}}}_d &= -\gamma_n \hat{\mathbf{i}}_d + \omega_0 \mathbf{i}_q + \alpha_n \beta |\hat{\psi}| + \sigma^{-1} \mathbf{u}_d + \mathbf{k}_{ed1} \mathbf{e}_d, \\
\dot{\hat{\mathbf{i}}}_q &= -\gamma_n \hat{\mathbf{i}}_d - \omega_0 \mathbf{i}_d - \alpha_n \beta |\hat{\psi}| + \sigma^{-1} \mathbf{u}_q + \delta \text{sign}(\mathbf{e}_q), \\
|\dot{\hat{\psi}}| &= -\alpha_n |\hat{\psi}| + \alpha_n L_m \tilde{\mathbf{i}}_d, |\hat{\psi}| > 0, \\
\dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0 = \omega + \frac{(\alpha_n L_m \tilde{\mathbf{i}}_q - \beta^{-1} \delta \text{sign}(\mathbf{e}_q) + v_\varepsilon)}{|\hat{\psi}|},
\end{aligned} \tag{3.25}$$

$$\begin{aligned}
\dot{\mathbf{e}}_d &= -\mathbf{k}_{ed} \mathbf{e}_d + \alpha_n \beta \tilde{\psi}_d + \beta \omega \tilde{\psi}_q, \\
\dot{\tilde{\psi}}_d &= -\alpha_n \tilde{\psi}_d + (\omega_0 - \omega) \tilde{\psi}_q + \alpha_n L_m \mathbf{e}_d, \\
\dot{\tilde{\psi}}_q &= -\omega_0 \tilde{\psi}_d - \mathbf{e}_d (\omega_0 + \gamma_1 \omega) / \beta,
\end{aligned} \tag{3.26}$$

$$\mathbf{z}_d = \mathbf{e}_d + \beta \tilde{\psi}_d, \quad \mathbf{z}_q = \beta \tilde{\psi}_q, \tag{3.27}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{e}}_d \\ \dot{\mathbf{z}}_a \\ \dot{\mathbf{z}}_b \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -(\alpha_n + \mathbf{k}_{ed}) & \mathbf{w}_a(t) & \mathbf{w}_b(t) \\ -\gamma_1 \mathbf{w}_a(t) & 0 & 0 \\ -\gamma_1 \mathbf{w}_b(t) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{e}_d \\ \mathbf{z}_a \\ \mathbf{z}_b \end{pmatrix}, \tag{3.28}$$

$$\int_t^{t+T} \mathbf{W}(\tau) \mathbf{W}^T(\tau) d\tau \geq kI > 0 \quad \text{для } \forall t > 0, \tag{3.29}$$

$$\tilde{\psi} = |\hat{\psi}| - \psi^*, \tag{3.30}$$

$$\ddot{\tilde{\psi}} = -\alpha_n \tilde{\psi} - \alpha_n L_m \mathbf{e}_d - \alpha_n \psi^* - \dot{\psi}^* + \alpha_n L_m \mathbf{i}_d. \tag{3.31}$$

$$\begin{aligned}
i_d &= \frac{1}{\alpha_n L_m} \left(\alpha_n \psi^* + \dot{\psi}^* - \mathbf{k}_\psi \tilde{\psi} - \mathbf{x}_\psi \right), \\
\dot{\mathbf{x}}_\psi &= \mathbf{k}_{\psi i} \tilde{\psi},
\end{aligned} \tag{3.32}$$

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_{\psi} &= \mathbf{k}_{\psi i} \tilde{\psi}, \\ \ddot{\tilde{\psi}} &= -(\alpha_n + k_{\psi}) \tilde{\psi} - \alpha_n L_m \mathbf{e}_d - \mathbf{x}_{\psi}.\end{aligned}\quad (3.33)$$

$$\tilde{M}_c = k \frac{M_c}{J} - \hat{M}_c, \quad (3.35)$$

$$\dot{\hat{v}} = k\mu\psi^* i_q + k\mu \left[(\tilde{\psi}_d + \tilde{\psi}) i_q - \tilde{\psi}_q i_d \right] - \hat{M}_c - \tilde{M}_c - \dot{v}^*, \quad (3.36)$$

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{M}}_c &= k_{vi} \tilde{\omega}, \\ \dot{\hat{v}} &= -k_v \tilde{\omega} + \mu \left[(\tilde{\psi}_d + \tilde{\psi}) i_q - \tilde{\psi}_q i_d \right] - \tilde{M}_c.\end{aligned}\quad (3.37)$$

$$\mathbf{A}_{11} = \begin{bmatrix} 0 & k_{vi} \\ -1 & -k_v \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A}_{12}(\mathbf{x}_2, t) = \frac{\tilde{\psi}}{\psi^*} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & -k_v \end{bmatrix} + \frac{\tilde{\psi}_d}{\psi^*} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & -k_v \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_1(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 & b_{24} & -\frac{\mu(\alpha_n \psi^* + \dot{\psi}^*)}{\alpha_n L_m} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_2(\mathbf{x}_2) = \frac{\mu \tilde{\psi}_q}{\alpha_n L_m} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & k_{\psi} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C} = \left[\begin{array}{c|ccc} \mathbf{I}_{(2 \times 2)} & & & \mathbf{0}_{(2 \times 3)} \\ \hline & 1 & 0 & 0 \\ \mathbf{0}_{(3 \times 2)} & -1/\beta & 1/\beta & 0 \\ & 0 & 0 & 1/\beta \end{array} \right];$$

$$\mathbf{A}_2(\mathbf{x}_1, t) = \left[\begin{array}{cc|ccc} 0 & k_{\psi i} & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -(\alpha_n + k_{\psi}) & -\alpha_n L_m & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & -(\alpha_n + k_{ed}) & \alpha_n & \omega \\ 0 & 0 & -\gamma_1 \alpha_n & 0 & \omega_0 \\ 0 & 0 & -\gamma_1 \omega & -\omega_0 & 0 \end{array} \right].$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_2(\mathbf{x}_1, t) = & \left[\begin{array}{cc|ccc} 0 & k_{\psi i} & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -(\alpha_n + k_{\psi}) & -\alpha_n L_m & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & -(\alpha_n + k_{ed}) & \alpha_n & \omega^* \\ 0 & 0 & -\gamma_1 \alpha_n & 0 & \omega_0 \\ 0 & 0 & -\gamma_1 \omega^* & -\omega_0 & 0 \end{array} \right] + \\ & + \left[\begin{array}{cc|ccc} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & \tilde{\omega} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\gamma_1 \tilde{\omega} & 0 & 0 \end{array} \right] \square \mathbf{A}_{21}(\omega^*, t) + \mathbf{A}_{22}(\mathbf{x}_1, t). \end{aligned}$$

У цьому розділі було проведено детальний аналіз структурної побудови асинхронного електропривода, зокрема зосереджено увагу на ключових складових його функціональної схеми. Центральним елементом розгляду став перетворювач частоти, який структурно складається з двох основних підсистем - силової та керуючої. Силова частина перетворювача виконує роль енергетичного каналу, який забезпечує безпосередню трансформацію електричної енергії відповідно до параметрів, заданих системою керування. Згідно з технічними

вимогами, сформованими на основі розрахунків, наведених у другому розділі, було здійснено вибір необхідних елементів силового модуля із використанням даних з технічних каталогів. До складу силового вузла увійшли: напівпровідниковий модуль типу IGBT (ізолюваний біполярний транзистор з керованим затвором), який забезпечує ефективне перемикання струму; фільтруючі елементи, що мінімізують пульсації та перешкоди в ланці постійного струму; а також датчики струму і напруги, які забезпечують інформаційний зворотний зв'язок для коректної роботи всієї системи [24].

Крім того, були підібрані відповідні опорні елементи (електроізоляційні та конструктивно-монтажні компоненти), які забезпечують надійність і безпечність функціонування силової частини електропривода в умовах реального експлуатаційного середовища. Уся елементна база обиралась з урахуванням номінальних параметрів навантаження, динамічних характеристик системи та вимог до енергоефективності.

А також спираючись на побудовану математичну модель асинхронного електродвигуна (АД) та враховуючи цілі, сформульовані в рамках завдання проєкту, було здійснено повноцінний синтез системи керування. Основна увага при цьому приділялася реалізації струмового керування двигуном з забезпеченням інваріантності до змін активного опору ротора — одного з найменш стабільних параметрів, що значною мірою впливають на точність роботи векторної системи керування.

Оскільки об'єктом керування в даному випадку виступає привод силової фрезерної голівки, для якого критично важливим є забезпечення заданої лінійної швидкості переміщення, у процесі синтезу була розроблена система регулювання саме цієї координати. Для підвищення точності регулювання та стабільності роботи приводу у різних режимах експлуатації до системи було введено контур зворотного зв'язку за лінійною швидкістю переміщення виконавчого органу [29].

Розрахунок параметрів регулятора лінійної швидкості здійснювався з урахуванням вимог до динамічних характеристик електромеханічної системи, а

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						52
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

також з метою гарантування асимптотичної стійкості системи в умовах можливих варіацій параметрів об'єкта керування. Проведений аналіз характеристик системи дозволив зробити висновок про задоволення вимог стійкості відповідно до обраної математичної моделі і синтезованого регулятора.

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						53
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

Для того, щоб мати змогу коректно проводити подальший аналіз і моделювання як статичних, так і динамічних режимів функціонування електромеханічної частини системи, першочерговим завданням є визначення параметрів асинхронного двигуна, які мають вирішальне значення для точності розрахунків. З цією метою доцільно застосувати Т-подібну еквівалентну схему заміщення асинхронної машини, що дозволяє у спрощеному, але достатньо наближеному до реального, вигляді описати електромагнітні процеси, які відбуваються в обмотках статора і ротора, та забезпечити точне моделювання реакцій системи при різних режимах її роботи.

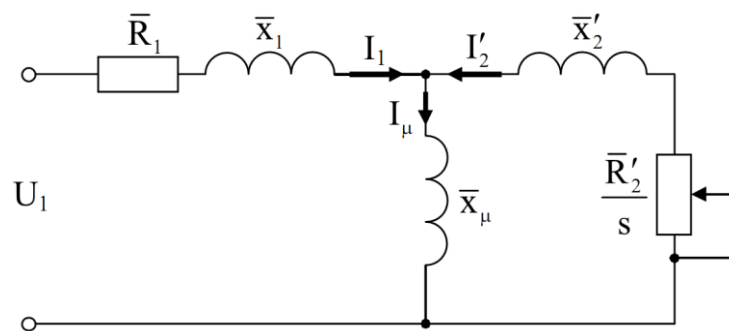


Рисунок 5.1 – Т-подібна схема заміщення

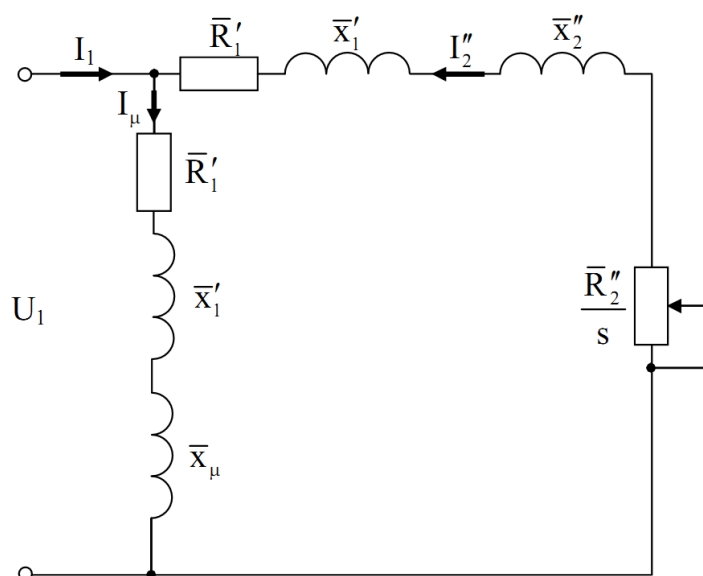


Рисунок 5.2 – Г-подібна схема заміщення

У процесі математичного опису та подальшого аналізу електромагнітних властивостей асинхронного електродвигуна широко застосовуються різні типи еквівалентних схем заміщення, серед яких найбільш поширеними є Т-подібна та Г-подібна моделі. Кожна з них має свої особливості в інтерпретації фізичних процесів у машині. Перехід від однієї схеми до іншої передбачає використання відповідних коефіцієнтів перерахунку, що забезпечують еквівалентність відтворення динаміки.:

$$c_1 = \frac{\bar{x}_\mu + \sqrt{(\bar{x}_\mu)^2 + 4 \cdot \bar{x}_1^l \cdot \bar{x}_\mu}}{2 \cdot \bar{x}_\mu} = \frac{1.6 + \sqrt{1.6^2 + 4 \cdot 0.11 \cdot 1.6}}{2 \cdot 1.6} = 1.065. \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \bar{X}_1 &= \frac{\bar{X}_1^l}{c_1} = \frac{0.11}{1.065} = 0.103, & \bar{R}_1 &= \frac{\bar{R}_1^l}{c_1} = \frac{0.08}{1.065} = 0.075, \\ \bar{X}_2^l &= \frac{\bar{X}_2^l}{c_1^2} = \frac{0.17}{1.065^2} = 0.15, & \bar{R}_2^l &= \frac{\bar{R}_2^l}{c_1^2} = \frac{0.083}{1.065^2} = 0.073. \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$X_1 = \bar{X}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.103 \cdot \frac{220}{7.74} = 2.926 \text{ Ом}, \quad (4.3)$$

$$R_1 = \bar{R}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.075 \cdot \frac{220}{7.74} = 2.128 \text{ Ом}, \quad (4.4)$$

$$X_2 = \bar{X}_2^l \frac{U_n}{I_n} = 0.15 \cdot \frac{220}{7.74} = 4.24 \text{ Ом}, \quad (4.5)$$

$$R_2 = \bar{R}_2^l \frac{U_n}{I_n} = 0.073 \cdot \frac{220}{7.74} = 2.074 \text{ Ом}, \quad (4.6)$$

$$X_{\mu} = \bar{X}_{\mu} \frac{U_n}{I_n} = 1.6 \cdot \frac{220}{7.74} = 45.3 \text{ Ом.} \quad (4.7)$$

$$L_{1\sigma} = \frac{X_1}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{2.926}{314.159} = 0.009 \text{ Гн,} \quad (4.8)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{X_2^l}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{4.24}{314.159} = 0.014 \text{ Гн.} \quad (4.9)$$

$$L_m = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{45.3}{314.159} = 0.144 \text{ Гн.} \quad (4.10)$$

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0.144 + 0.009 = 0.154 \text{ Гн,} \quad (4.11)$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0.144 + 0.014 = 0.158 \text{ Гн.} \quad (4.12)$$

Метою такого аналізу є оцінка переваг кожного з підходів з точки зору точності керування, стійкості до змін параметрів машини (насамперед активного опору ротора), швидкодії, а також якості перехідних процесів. Параметри регуляторів у структурі системи керування підбираються з урахуванням класичних методик оптимального синтезу лінійних автоматичних систем. Зокрема, налаштування контурів зворотного зв'язку виконується на основі аналізу характеристичних рівнянь замкнених контурів [24].

У спрощеному вигляді кожен з таких контурів регулювання може бути представлений характеристичним рівнянням другого порядку, яке має стандартну форму [26]:

$$p^2 + k_p p + k_i = 0, \quad (4.13)$$

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

У процесі проведення числового моделювання та аналізу динаміки електроприводу подачі силової голівки в умовах типового технологічного циклу, було обрано фрагмент першого повного робочого циклу переміщення. Цей цикл містить усі характерні етапи функціонування системи у рамках одного проходу, що дозволяє найбільш інформативно оцінити адекватність роботи розробленої системи керування.

На початковій ділянці траєкторії спостерігається фаза прискорення до заздалегідь заданого значення низької лінійної швидкості переміщення, яка є безпечною для початкового контакту інструмента із заготовкою. Далі система переходить у режим врізання фрези у матеріал, що супроводжується стабілізацією швидкості та ростом моменту навантаження через зростання сил різання [25].

Після впевненого врізання, керуючий контролер формує команду на збільшення лінійної швидкості до робочого рівня, що забезпечує високу продуктивність процесу фрезерування. На завершальній фазі проходу швидкість плавно знижується до початкової, що дозволяє уникнути механічного викидання матеріалу при виході фрези з деталі. Заключним етапом є гальмування привода та його підготовка до реверсного ходу.

Визначальні профілі змінних, що характеризують функціонування електромеханічної системи - а саме заданий закон зміни лінійної швидкості, графік зміни моменту навантаження, а також динамічна траєкторія зміни магнітного потоку у фазах розгону, навантаження та гальмування - представлені далі.

Зазначені діаграми слугують основою для подальшого аналізу ефективності розробленої системи керування з урахуванням інваріантності до зміни опору ротора, забезпечення динамічної точності та збереження стабільності параметрів поля [27].

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						57
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

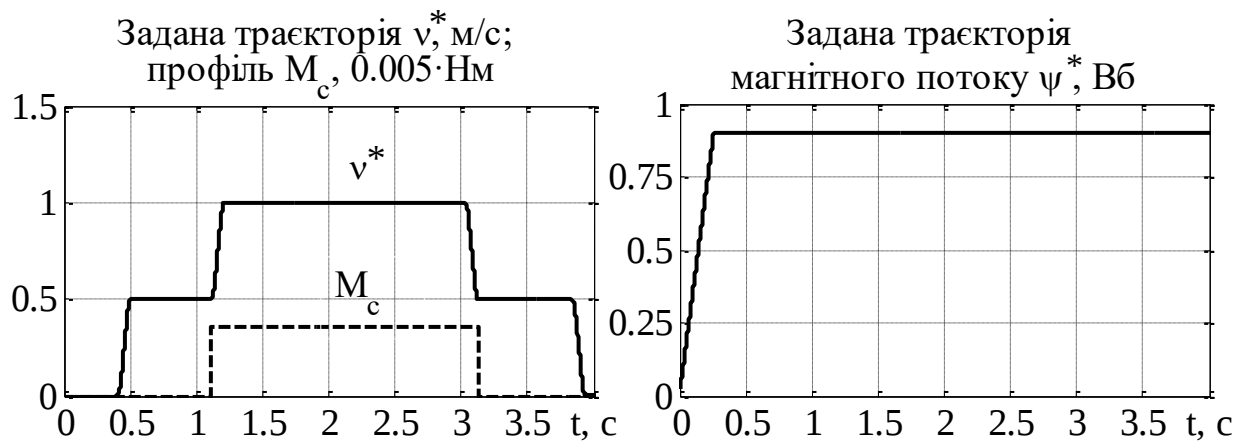


Рисунок 5.3 – Задані траєкторії лінійної швидкості і потоку

На графіках, що подані на рисунках 5.4–5.6, зображено характер перехідних процесів асинхронного двигуна (АД) у відповідь на зміни навантаження, що моделюють типові режими технологічного процесу. Зокрема, це проявляється у сповільненому перебігу перехідного процесу струму в напрямку осі q , що відображає певну інерційність реакції системи [28]. Додатково варто зазначити, що у фазі намагнічування двигуна при інваріантному алгоритмі керування з'являється невелика динамічна похибка в регулюванні магнітного потоку, яка хоча й помітна, проте в обох алгоритмах швидко згасає до нульового рівня, не викликаючи тривалих коливань чи нестабільностей у роботі системи. Щодо питання енергетичної ефективності системи в обох випадках, згідно з результатами, наведеними в [27], встановлено, що використання стандартного алгоритму управління вимагає більших витрат енергії на забезпечення того самого рівня механічної роботи, порівняно з інваріантним підходом. Це пояснюється меншою чутливістю інваріантного алгоритму до змін параметрів електричної машини, зокрема активного опору ротора, що дозволяє точніше підтримувати енергетично оптимальні режими електромеханічного перетворення.

Таким чином, можна дійти висновку, що реалізація інваріантного векторного керування в системі керування асинхронним двигуном дозволяє не лише забезпечити достатній рівень динамічної точності, а й підвищити загальну

енергоефективність електропривода, що є особливо важливим у промислових умовах експлуатації [29].

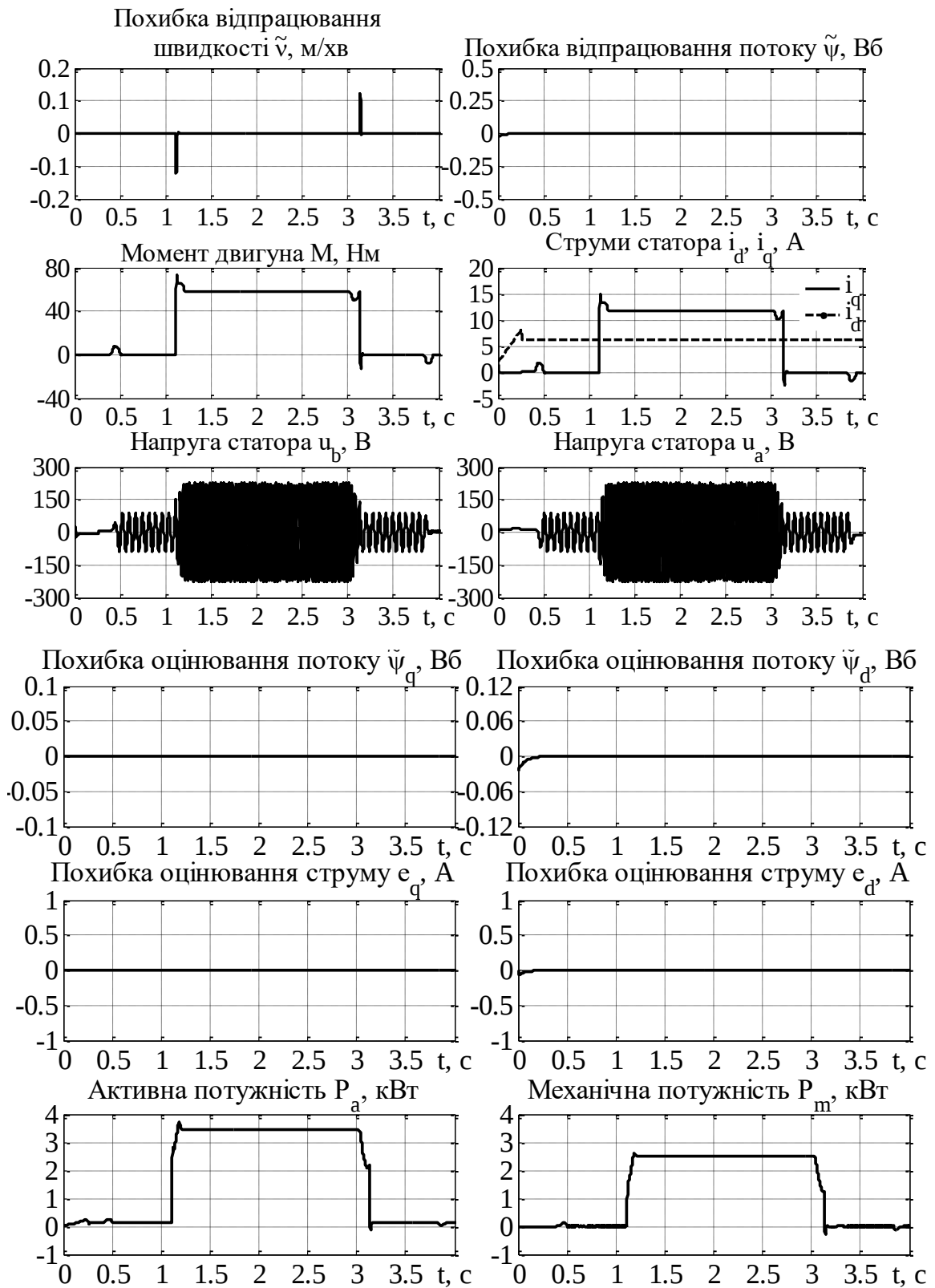


Рисунок 4.4 – Перехідні процеси

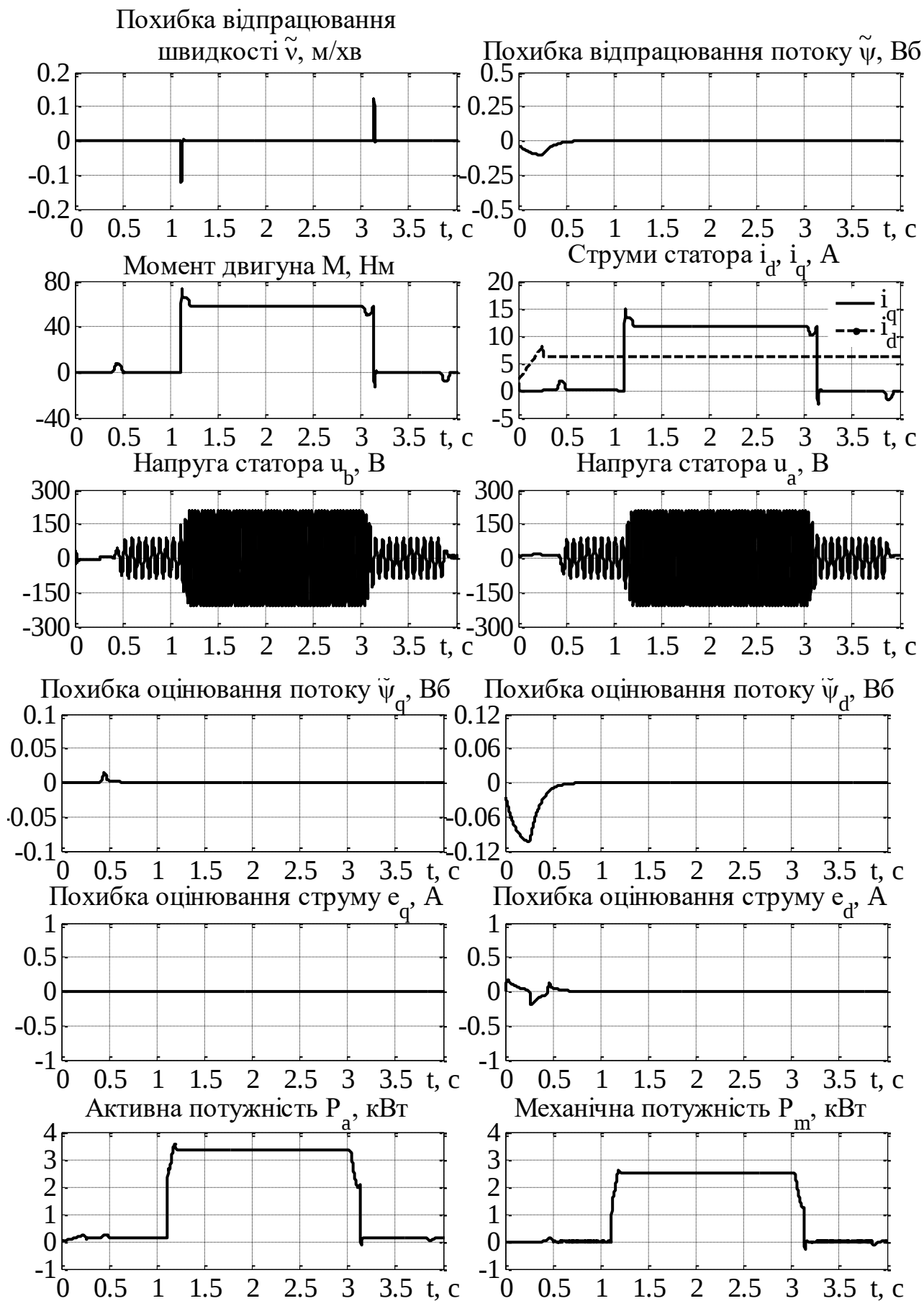


Рисунок 4.5 – Перехідні процеси п

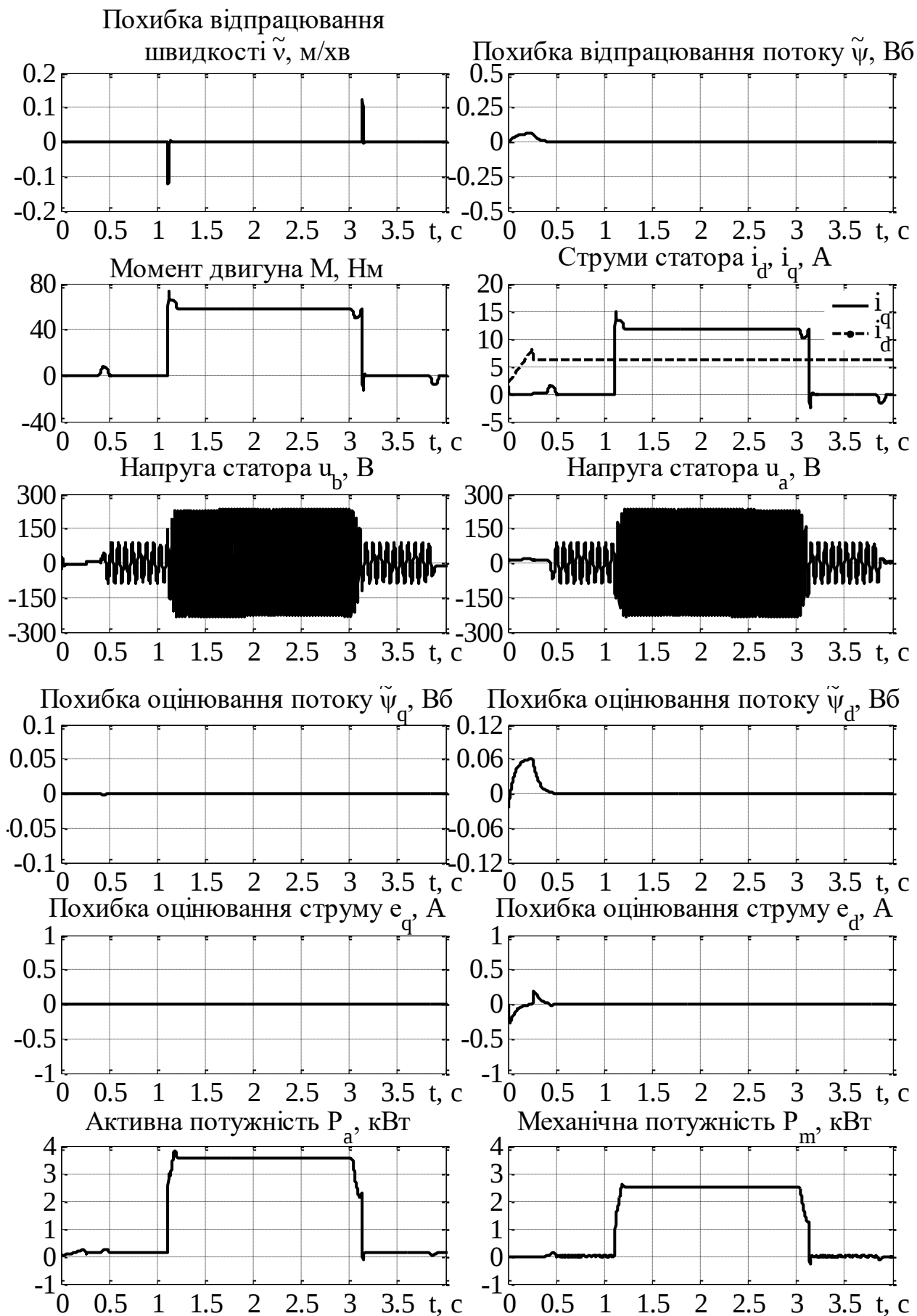


Рисунок 4.6 – Перехідні процеси

У поточному розділі було здійснено комплексний розрахунок параметрів електричної моделі заміщення асинхронного двигуна (АД), що надалі слугували основою для аналізу дії синтезованого алгоритму векторного керування. Цей алгоритм, сформований відповідно до методології, описаної у попередньому розділі, був досліджений за умов стандартного налаштування в системі керування.

Після завершення параметричного синтезу було проведено математичне моделювання поведінки електропривода у середовищі моделювання (наприклад, MATLAB/Simulink), під час якого відстежувались перехідні процеси, що виникають у системі як за наявності змін активного опору ротора, так і без таких змін.

Результати чисельного моделювання демонструють, що запропонований векторний алгоритм керування має високу ступінь адаптивності до коливань параметрів роторного кола. Зокрема, у випадках, коли активний опір ротора змінюється в межах від -30% до $+30\%$ від номінального значення, система продовжує функціонувати стабільно, без значного погіршення динамічних або статичних характеристик.

Таким чином, на підставі проведених досліджень можна стверджувати, що розроблений алгоритм забезпечує надійне керування асинхронним двигуном навіть за умов суттєвої невизначеності в параметрах електромеханічної системи. Ефективність і робастність системи керування підтверджено як чисельним моделюванням, так і експериментальними випробуваннями, що дозволяє рекомендувати її до впровадження у практичних застосуваннях, де важливими є надійність та енергоефективність у змінних режимах навантаження.

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						62
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

В роботі було виконано ґрунтовний аналіз та математичне моделювання електромеханічної системи регулювання швидкості, що побудована на базі векторно-керованого асинхронного електропривода. Такий тип приводу сьогодні вважається одним із найбільш перспективних рішень для високоточної та енергоефективної автоматизації, особливо в умовах сучасного машинобудівного виробництва, де висувуються підвищені вимоги до динаміки, точності позиціонування та стабільності роботи приводних систем.

Враховуючи недостатню деталізацію технічних характеристик, яка часто притаманна промисловим зразкам електроприводів подачі, було розроблено власну кінематичну структуру приводу силової голівки. На основі заданих параметрів оброблюваної деталі, особливостей фрезерної операції та передбачених механічних навантажень було здійснено розрахунок необхідної потужності двигуна. Через високі динамічні вимоги до системи обрано асинхронний двигун з істотним запасом по потужності, що дозволило забезпечити стабільну роботу приводу навіть у найскладніших режимах експлуатації.

Для реалізації системи керування було прийнято рішення впровадити алгоритм прямого векторного керування струмом, адаптований до варіацій активного опору ротора. Такий підхід дозволяє значно підвищити робастність електропривода, зменшити вплив теплових та навантажувальних змін у роторному колі, а також покращити показники енергоефективності. В рамках даного підходу виконано синтез контурів регулювання, зокрема реалізовано регулятор лінійної швидкості з урахуванням специфіки руху силової голівки по прямолінійній траєкторії.

На заключному етапі було побудовано математичну модель всієї системи керування, включно з об'єктом керування, регуляторами та джерелом струму. За

					ЕМКС 123004 000 ПЗ	Арк.
						63
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		