

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет електроенергетики та електромеханіки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Високоєфективний метод управління електроприводом металорізального
верстату»

Виконав: студент 2-го курсу, гр. ЕПА-24м
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

(цифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Вячеслав НЕКРУТЕНКО
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц. кафедри КЕМСК

Володимир БОГАЧУК
(прізвище та ініціали)

«25» 11 2025 р.

Опонент: к.т.н., доц. каф. ЕСЕМ

Войтик Ю.П.
(прізвище та ініціали)

«19» 12 2025 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри [підпис]
«25» 11 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет Електроенергетики та електромеханіки
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань 14 – Електрична інженерія
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувача кафедри

к.т.н., доц.

Микола МОШНОРИЗ

“14” 10 2025 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Некрутенку Вячеславу Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Високоєфективний метод управління електроприводом металорізального верстату

керівник роботи Богачук Володимир Васильович, к.т.н., доц. каф. КЕМСК

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “24” 09 2025 року № 313

2. Строк подання студентом роботи 25.11.2025р.

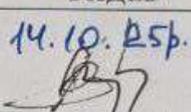
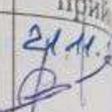
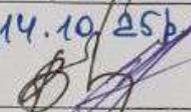
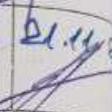
3. Вихідні дані до роботи: Тип електродвигуна головного приводу - АДЧР132М4, Швидкість обертання поля статора, об/хв – 1500, Номінальна кількість обертів ротора, об/хв – 1460, Номінальне значення напруги, В – 220, Кратність пускового моменту - 2.2, Здатність перевантаження по струму - 7.3, Коефіцієнт корисної дії - 0.88, Коефіцієнт потужності - 0.85, Номінальна потужність, Вт – 11000, Момент інерції ротора двигуна, кг/м² - 0.045, Момент інерції деталі, кг/м² - 0.023, Загальний момент інерції, кг/м² - 0.068.

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1 Огляд особливостей електроприводів металорізальних верстатів. аналіз та перспективи їх розвитку. 2 Дослідження способів підвищення ефективності електроприводів головного руху і руху подач верстатів. 3 Синтез високоєфективного методу та системи управління електроприводом металорізального верстата із застосуванням нейроконтролера 4 Економічна частина. 5 Охорона праці. Висновки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Об'єкт, предмет, мета та задачі дослідження. Аналіз вимог до електроприводів головного руху та руху подачі. Проблеми в системах управління електроприводами верстатів. Математичний опис системи векторного управління АД КЗ. Аналіз сучасних систем керування ЕП металообробних верстатів. Порівняння показників систем управління. Синтез системи керування приводом поздовжньої подачі токарного верстата з пружними зв'язками із застосуванням нестандартного задавача інтенсивності. Дослідження впливу пружностей елементів кінематичних кіл приводу головного руху верстату на динаміку та

точність різання. Синтез системи управління металорізального верстата із застосуванням нейроконтролера. Синтез системи управління швидкістю приводу поздовжньої металообробки з використанням нейроконтролера. Синтез системи управління стабілізації зусилля металорізального верстата. Висновки.

6. Консультанти розділів роботи

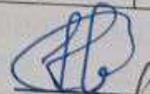
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	к. т. н., доц. каф. КЕМСК Богачук В.В.	14.10.25р. 	21.11.25р. 
Економічна частина	Шулле Ю.А. к.т.н., доц. каф. ЕСЕЕМ	14.10.25р. 	21.11.25р. 

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Прим.
1	Формування та затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)	24.09.25р.	
2	Виконання спеціальної частини МКР. Перший рубіжний контроль виконання МКР	28.10.25р.	
3	Виконання спеціальної частини МКР. Другий рубіжний контроль виконання МКР	21.11.25р.	
4	Виконання розділу «Економічна частина»	21.11.25р.	
5	Виконання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	21.11.25р.	
6	Попередній захист МКР	25.11.25р.	
7	Нормоконтроль МКР	24.11.25р.	
8	Рецензування МКР	19.12.2025р.	
9	Захист МКР	23.12.25р.	

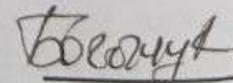
Студент


(підпис)

Керівник роботи


(підпис)

Некрутенко
(прізвище та ініціали)


(прізвище та ініціали)

УДК: 62
Некрутенко
металорізально
141 – Електрое
електрична інж
На укр. м
В магісте
керування еле
системи з не
динамічним
Розглянуто за
подач, зокрема
жорсткості, ш
обладнання т
варіантів сист
задатчиком і
урахуванням
на базі нейро
на 34% та
Доведено ефе
приводах по
імпульсні ко
підтвердили
зниження еко
експлуатації
факторів дов
Графіч
В розд
експлуатації
чинників ото
Ключо
Simulink; дво
ПІ-регулятор

АНОТАЦІЯ

УДК: 621.313

Некрутенко В.О. Високоєфективний метод управління електроприводом металорізального верстату. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма - електрична інженерія. Вінниця: ВНТУ, 2025. 117 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 34 назв; рис.: 23; табл. 19.

В магістерській кваліфікаційній роботі було проведено аналіз сучасних систем керування електроприводами верстатів, серед яких найбільш перспективними є системи з нейрорегуляторами та вентильними двигунами завдяки їх високим динамічним властивостям і широкому діапазону регулювання швидкості. Розглянуто загальні та специфічні вимоги до електроприводів головного руху й подач, зокрема необхідність забезпечення широкого діапазону регулювання, високої жорсткості, швидкодії, точності та плавності руху, що покращує довговічність обладнання та якість обробки. У середовищі Matlab Simulink розроблено кілька варіантів систем керування: систему приводу поздовжньої подачі з нестандартним задатчиком інтенсивності, систему керування двомасовим електроприводом із урахуванням пружних властивостей ремня та систему управління головним рухом на базі нейропередбачувального контролера, що зменшує час перехідного процесу на 34% та перерегулювання на 18% порівняно з класичним ПІ-регулятором. Доведено ефективність нейроконтролера також для зменшення пружних коливань у приводах подач завдяки використанню еталонної моделі MRC, яка формує імпульсні коригувальні впливи. Виконано техніко-економічні розрахунки, які підтвердили економічну доцільність впровадження запропонованих рішень та зниження експлуатаційних витрат, а також визначено основні вимоги до безпечної експлуатації електроприводів і електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих факторів довкілля.

Графічна частина складається з 16 плакатів із результатами роботи.

В розділі охорони праці визначено основні положення щодо безпечної експлуатації досліджуваного електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих чинників оточуючого середовища.

Ключові слова: електропривод; система керування; нейрорегулятор; Matlab Simulink; двомасова система; ремінна передача; нейропередбачувальний контролер; ПІ-регулятор; еталонна модель; пружні коливання.

ABSTRACT

Nekrytenko V.O. High-Efficiency control method for a machine tool electric drive. Master's thesis in specialty 141 - electricity, electrical engineering and electromechanics, educational program - electrical engineering Vinnitsa: VNTU, 2025. – 117 p.

In Ukrainian language. Bibliographer: 34 titles; fig.: 23; tabl. 19.

An analysis of modern control systems for machine tool electric drives has been conducted, identifying systems with neural regulators and brushless motors as the most promising due to their high dynamic performance and wide speed regulation range. General and specific requirements for main motion and feed electric drives are considered, including the need for a wide control range, high rigidity, fast response, accuracy, and smooth motion, which improves equipment durability and machining quality. Several control system variants were developed in Matlab Simulink: a feed drive system with a nonstandard rate setter, a control system for a two-mass electric drive considering belt elasticity, and a main motion control system based on a neuro-predictive controller that reduces transient time by 34% and overshoot by 18% compared to a classical PI controller. The efficiency of the neuro-controller in reducing elastic vibrations in feed drives was also demonstrated using a Model Reference Control (MRC) structure that generates corrective impulse actions. Techno-economic calculations confirmed the economic feasibility of the proposed solutions and reduced operational costs, and the main requirements for safe operation of electric drives and the electrotechnical system under harmful environmental factors were established.

The graphic part consists of 16 posters with the results of the work.

The section on labor protection defines the main provisions for the safe operation of the studied electrical complex under the influence of harmful environmental factors.

Keywords: electric drive; control system; neural regulator; Matlab Simulink; two-mass system; belt transmission; neuro-predictive controller; PI controller; reference model; elastic vibrations.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ	
МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ. АНАЛІЗ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ	
РОЗВИТКУ.....	
1.1 Аналіз вимог до електроприводів головного руху та руху подачі.....	10
1.2 Проблеми в системах управління електроприводами металообробних верстатів.....	12
1.3 Аналіз сучасних систем керування електроприводами металообробних верстатів	19
1.4 Перспективи розвитку електроприводів металообробних верстатів	25
1.5 Висновки.....	27
2 ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ	
ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ГОЛОВНОГО РУХУ І РУХУ ПОДАЧ	
ВЕРСТАТІВ.....	
2.1 Застосування нейронних мереж у системах керування електроприводами.....	28
2.2 Синтез системи керування приводом поздовжньої подачі токарного верстата з пружними зв'язками із застосуванням нестандартного задавача інтенсивності.....	29
2.3 Дослідження впливу пружностей елементів кінематичних кіл приводу головного руху верстату на динаміку та точність різання.....	36
2.4 Висновки.....	42
3 СИНТЕЗ ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО МЕТОДУ ТА СИСТЕМИ	
УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО	
ВЕРСТАТА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕЙРОКОНТРОЛЕРА	
3.1 Синтез системи управління металорізального верстата із застосуванням нейроконтролера.....	43
3.2 Синтез системи управління швидкістю приводу поздовжньої подачі з	

	4
використанням нейроконтролера.....	50
3.3 Висновки.....	62
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	63
5 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	74
ВИСНОВКИ.....	87
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	89
Додаток А (обов'язковий) Технічне завдання.....	93
Додаток Б (обов'язковий) Ілюстративна частина.....	100

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Електроприводи змінного струму застосовують практично у всіх галузях промисловості. При цьому регулювання швидкості з необхідною точністю є одним із пріоритетних завдань. Сучасні регульовані електроприводи з асинхронними виконавчими двигунами, що володіють великим діапазоном регулювання швидкості, в переважній більшості випадків являють собою системи векторного управління.

Важливим напрямом розвитку в машинобудуванні є збільшення продуктивності верстатів, а також підвищення якості та точності виробів, що обробляються на верстаті. На точність обробки впливають такі фактори, як вібрації в верстаті через обертові приводні системи, пружні деформації в довгих валах і ремінних передачах, режими різання, знос обробного інструменту, похибка установки заготовки та обробного інструменту, геометрична точність обладнання, нелінійності, пов'язані з люфтами струму електродвигуна і т.д.

Динамічні характеристики приводів головного руху та руху подачі істотно впливають на технологічний процес обробки заготовок. Механічна частина приводу головного руху верстата здійснює передачу потужності до виконавчого механізму, і в більшості випадків складається з двигуна та механічного пристрою, що передає, виконаного у вигляді ремінної передачі, редуктора, коробки швидкостей або муфти. Однак застосування коробки швидкостей може негативно позначитися на якості обробки деталей внаслідок її нагрівання і наявності зазорів між шестернями. Компонування приводів головного руху з ременної передачею ізолюють шпиндель від вібрацій двигуна.

Однак при передачі зусиль ремені розтягуються, що призводить до виникнення коливань швидкості, а також помилки по швидкості веденого шківів в статичному режимі, що призводить до зниження якості обробки деталей. У сучасних верстатах електроприводи подачі є складною

двомасовою системою, в якій в процесі експлуатації виникають пружні коливання, що негативно впливають на металообробку виробів. З конструктивних особливостей, а також призначення деталі, призначається допуск форми для найважливіших розмірів заготовок. У цьому забезпечення точності металообробки заготовок типу «вал» перебуває у низці найважливіших. Слід зазначити, що радіальна складова сили різання призводить до деформації заготовки, що впливає на її форму.

Для забезпечення високої якості продукції металообробного верстата важливо компенсувати пружні коливання, що виникають в електроприводних системах, а також врахувати вигин циліндричної заготовки внаслідок впливу радіальної сили різання.

Незважаючи на те, що вчені вже провели дослідження, присвячені підвищенню ефективності роботи металорізальних верстатів, деякі питання все ще потребують додаткового вивчення.

Підвищення жорсткості чи вібростійкості верстатів найчастіше досягається за допомогою застосування спрощених кінематичних ланцюгів приводів головного руху. Компонування приводів головного руху зі спрощеним кінематичним колом є мотор-шпиндель, або конструкцію, що складається з двигуна, з'єданого зі шпинделем через муфту або ремінну передачу. Однак зазначені варіанти конструкцій мають суттєві недоліки, наприклад, мотор-шпиндель складний у виготовленні, піддається підвищеним тепловим навантаженням, має низьку ремонтпридатність. Компонування з муфтою, що з'єднує двигун зі шпинделем, мають великі осьові габарити, що робить їх недостатньо компактними, крім того, при недостатньо точному виготовленні та монтажі будуть передаватися вібрації від двигуна до шпинделя. Компонування з ремінним приводом схильні до витягування і прослизання ременів при високих швидкостях обертання і великих навантаженнях. Виходячи з вищезгаданого, актуальним є дослідження в галузі пошуку альтернативних шляхів модернізації кінематичних ланцюгів приводів головного руху.

Застосування в системах керування (СК) електроприводів верстатів класичних ПД регуляторів зі стандартними налаштуваннями на оптимум по модулю та симетричний оптимум у ряді випадків не забезпечують необхідних показників якості перехідного процесу приводу. У разі перспективним напрямом є розробка СУ, заснована на інтелектуальному підході. Таким чином, проблема синтезу нових систем керування верстатами із застосуванням нейронних мереж для покращення динамічних характеристик приводів є актуальним завданням.

Об'єктом дослідження є електромеханічна система, що складається з приводів головного руху, поздовжньої та поперечної подач токарного металообробного верстата.

Предметом дослідження є математичні моделі та структури, режими роботи, динамічні характеристики асинхронних електроприводів змінного струму головного руху, поздовжньої та поперечної подач токарного металообробного верстата, а також способи покращення цих характеристик.

Метою є розробка високоефективного методу керування та алгоритмів модернізації електроприводів для підвищення якості та точності обробки деталей на металорізальних верстатах.

У процесі реалізації мети роботи необхідно виконати такі **завдання**:

- провести аналіз класичних методів модернізації приводів головного руху верстатів. Запропонувати спосіб модернізації, що дозволяє зменшити кількість використовуваних швидкостей обертання шпинделя, збільшуючи тим самим жорсткість та продуктивність верстата;

- провести аналіз систем управління електроприводами з використанням нейронних мереж у своїй структурі, що доводить актуальність, ефективність та перспективність цього напрямку;

- розробити математичні та комп'ютерні моделі в програмі Matlab Simulink приводу поздовжньої подачі з урахуванням вигину згину з урахуванням згину еталоною моделлю;

- виконати техніко-економічний розрахунок величини витрат запропонованого варіанту системи електроприводу та обґрунтувати

правильність виконання досліджень та економічну доцільність впровадження технічних рішень;

- визначити основні положення щодо безпечної експлуатації досліджуваного електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих факторів оточуючого середовища.

Методи дослідження: теорія автоматичного управління, методи математичного програмування, методи нелінійної оптимізації, методи моделювання, теорія нейронних мереж. Під час проведення етапів синтезу регуляторів та моделювання використовувався математичний пакет Matlab Simulink.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Розроблено математичну модель високоефективного методу управління приводом головного руху верстата, що враховує пружні властивості ремінної передачі, і включає систему управління нейроконтролер з еталонною моделлю.

2. Розроблено систему керування приводом поздовжньої подачі верстата, що враховує вигин циліндричної заготовки в процесі точіння, що дозволяє підвищити якість металообробки.

Практичне значення одержаних у роботі результатів полягає в наступному: полягає в тому, що отримані результати можуть використовуватися для поліпшення якості обробки циліндричних заготовок завдяки обліку вигину заготовки під впливом радіальної складової сили різання в приводі поперечної подачі, а також компенсації пружних коливань, що виникають в електроприводі головного руху і поздовжнього руху подачі.

Особистий внесок здобувача. Основні результати магістерської кваліфікаційної роботи отримано автором самостійно.

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати досліджень доповідались та обговорювались на науково-технічній конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (МН-2026).

Публікації. За тематикою дослідження опубліковано 1 тези доповідей матеріалів конференцій:

- Аналіз сучасних систем керування електроприводами металообробних верстатів / В.О. Некрутенко, В.В. Богачук – Матеріали конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026)», [Електронний ресурс]. URL:

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn20256>, – Вінниця : ВНТУ, 2026.

– 4 с.

1 ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ. АНАЛІЗ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ РОЗВИТКУ

1.1 Аналіз вимог до електроприводів головного руху та руху подачі

Механічна частина електроприводу головного руху верстата здійснює передачу потужності до виконавчого механізму, і в більшості випадків складається з двигуна та механічного пристрою, що передає, виконаного у вигляді редуктора, коробки швидкостей або муфти. У деяких випадках механічний передавальний пристрій відсутній, коли електродвигун безпосередньо поєднаний з виконавчим механізмом верстата.

Дистанційне перемикання шестерень у коробці дозволяє змінювати передатне відношення електроприводу ступінчасто. Це важливо задля досягнення різних швидкостей обертання виконавчого механізму верстата. Наявність проміжків у шестернях коробки швидкостей викликає вібрації в приводі металорізального верстата, що у свою чергу знижує якість обробки деталей. Для зменшення цих негативних ефектів необхідно забезпечити точнішу узгодженість елементів коробки швидкостей верстата. Під час робочого процесу верстата коробка швидкостей піддається нагріванню, і тепло передається прилеглим вузлам електроприводу верстата. Нагрів може призвести до перегріву, що спричиняє зниження якості оброблюваної деталі.

Для підвищення продуктивності обробки на верстаті може бути використаний безступінчастий привід регульований або малоступінчаста коробка швидкостей з редуктором. Такі електроприводні системи дозволяють точно налаштувати оптимальну швидкість різання та плавно регулювати її у процесі роботи.

При швидкостях нижче від номінальної частоти обертання електродвигуна управління приводом головного руху здійснюється з постійним моментом. Якщо швидкість вище щодо номінальної, то керування

здійснюється за постійної потужності. Вибір того чи іншого типу керування приводом ґрунтується на тому, що при невеликих швидкостях різання виникають великі зусилля в процесі обробки заготовки, у той час як при великих швидкостях різання зусилля стає набагато меншим. Тому управління швидкістю здійснюється у двох зонах - з постійною потужністю на високих швидкостях та з постійним моментом на низьких швидкостях. Однак, якщо потужність електроприводу невисока, використовується однозонне регулювання швидкості в процесі обробки заготовок [8].

На діапазон регулювання швидкості електроприводу головного руху верстата впливають такі параметри, як: допустима швидкість різання, матеріал виробу, що обробляється, і максимальний діаметр заготовки. Внаслідок того, що на універсальних верстатах обробляються заготовки з різних матеріалів та різних геометричних параметрів, то й діапазони регулювання можуть відрізнятися.

Стабільність роботи електроприводу головного руху верстата є важливим показником, що характеризує його здатність підтримувати задану швидкість при змінах в напругі живлення, коливаннях електромагнітного моменту опору електродвигуна, відхиленнях в температурі навколишнього середовища.

Серед вимог до приводів верстатів можна виділити як загальні, що відносяться до всіх приводів, так і приватні, що відносяться до конкретного типу приводу. У таблиці 1.1 наведено вимоги до приводів головного руху та руху подач верстатів.

Таблиця 1.1 – Вимоги до електроприводів верстатів

Вимоги до електроприводів верстатів		
Для всіх приводів верстатів	Для конкретного типу приводу	
	Подачі	Головного руху
<ul style="list-style-type: none"> - низька вартість приводу - невеликі вага та габарити - простота управління та обслуговування - висока надійність і схибленість - висока швидкодія - стабільність і повторюваність характеристик - висока максимальна швидкість - висока продуктивність - значний запас стійкості 	<ul style="list-style-type: none"> - швидкий час відпрацювання керуючого впливу при аперіодичному характері перехідних процесів розгону та гальмування - високий крутний момент - здатність витримувати великі навантаження - висока жорсткість - висока швидкодія - висока точність позиціонування - Інші 	<ul style="list-style-type: none"> - висока точність та плавність - забезпечення необхідних значень потужності, моменту, швидкості різання - широкий діапазон регулювання швидкості - інші

1.2 Проблеми в системах управління електроприводами металообробних верстатів

Методи збільшення продуктивності верстатів, а також якості та точності обробки заготовок умовно поділяються на три основні напрямки:

1. Підвищення жорсткості та вібростійкості окремих вузлів верстата.
2. Розробка систем керування точністю.
3. Розробка моделей розрахунку точності обробки.

Розглянемо ці три методи докладніше.

1. Збільшення жорсткості та вібростійкості верстатів досягається підвищенням жорсткості інструменту, а також елементів технологічної системи, таких як супорт, задня та передня бабки. Збільшення жорсткості здійснюється за допомогою розробки нових та модернізації існуючих конструкцій. Використання сучасних твердосплавних інструментальних обробних матеріалів із зносостійкими покриттями, синтетичних алмазів,

композитних матеріалів на основі кубічного нітриду бору дозволяє суттєво підвищити якість обробки заготовок [2, 4].

Відповідно з дослідженнями [6] на якість обробки деталей може впливати величина звису інструменту. Для досягнення високої якості обробки деталей на верстатах автори статті рекомендують зменшувати величину звису оброблювального інструменту. Автори пропонують спосіб чорнової обробки заготовок зі змінною глибиною різання, який знижує вібрації, збільшує термін служби ріжучого інструменту та продуктивність металорізального верстата.

Приводи головного руху верстатів істотно впливають на вібростійкість верстатів. Вони виникають вільні коливання, пов'язані з відхиленням заготівлі чи початкової швидкості обертання, вимушені коливання, пов'язані зі зміною моменту інерції заготівлі, наведених мас, коефіцієнтів жорсткості, і навіть параметричні коливання, які під дією змінних змушуючих сил. Частка, яку привід головного руху вносить у загальний рівень вібрацій верстата, може становити 90% [4, 5].

2. Розробка систем керування точністю. Одним із можливих способів підвищення якості обробки деталей металорізальних на верстатах є зниження темпу розгону або гальмування електроприводу. Нестандартний задатчик інтенсивності, запропонований авторами статті [13], дозволяє задавати час розгону електроприводу поздовжньої подачі токарного металорізального верстата, його прискорення та час гальмування, забезпечуючи при цьому високі динамічні характеристики при керуванні. Однак використання такого задатчика інтенсивності призводить до зниження продуктивності верстата.

Відповідно до [4, 5], при використанні адаптивних систем управління здійснюється зміна будь-якого параметра режиму різання або траєкторії руху виконавчого органу верстата так, щоб забезпечити належну якість обробки відповідно до заданого допуску.

На рисунку 1.1 приведені різновиди систем керування точністю [9].

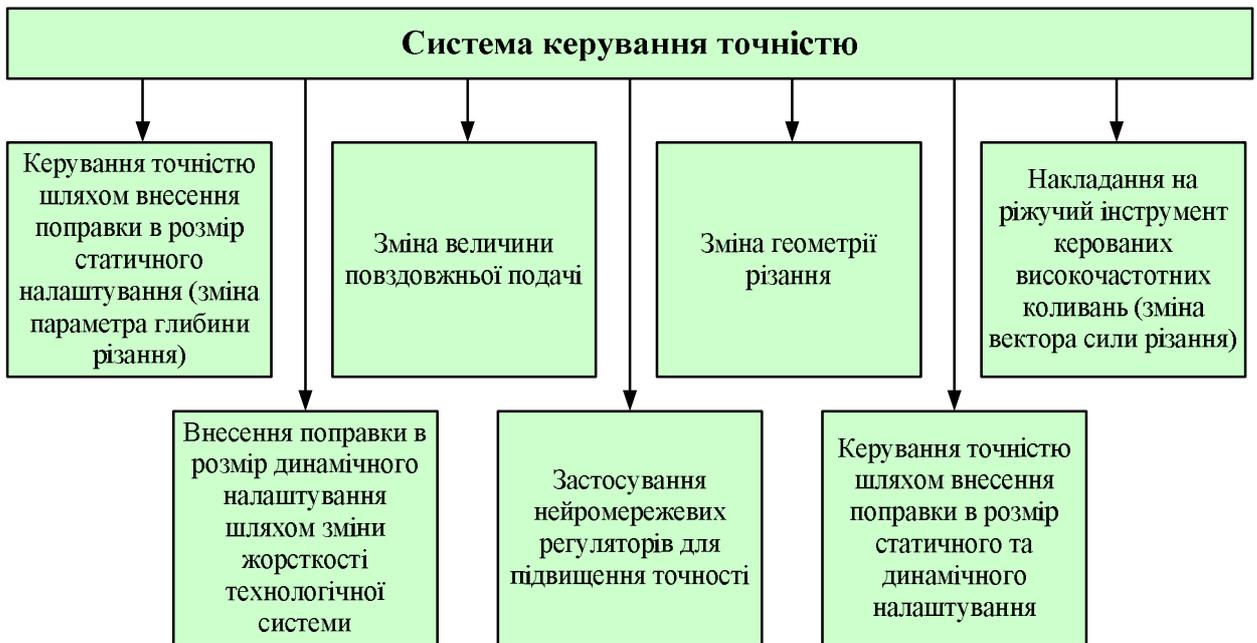


Рисунок 1.1 – Системи керування точністю

Згідно з дослідженнями, у системах управління приводів металорізальних верстатів можуть ефективно використовуватися нейронні мережі, виконані у вигляді нейрорегуляторів. Автори зазначених досліджень виробляють синтез різних систем керування приводами верстатів у математичному середовищі Matlab Simulink. Наведені перехідні характеристики електроприводів подач металорізальних верстатів мають високі динамічні характеристики, що говорить про перспективність застосування нейромережевих регуляторів СК.

З аналізу робіт [4, 5] видно, що для досягнення ефективного управління процесом обробки заготовок на верстатах здійснюють зміни глибини різання, швидкості поздовжньої подачі, положення інструменту щодо поверхонь, що обробляються, а також жорсткості елементів технологічної системи. Коригування здійснюється на основі даних від датчиків зворотних зв'язків. Застосування систем адаптивного керування призводить до значного підвищення точності металообробки у 6-8 і більше разів у порівнянні з класичними способами керування. Недоліком аналізованих систем управління є складність їх впровадження з виробництва.

3. Оскільки верстат в процесі роботи являє собою складну нелінійну динамічну технологічну систему, в якій вузли верстата, інструмент і оброблювана заготовка обертаються, переміщуються один щодо одного, а також існують безліч обурювальних факторів, що призводять до вібрацій, резонансним коливанням, потрібні дослідження для визначення поведінки такої складної системи, якісний розрахунок точності металообробки.

Дослідники в роботах [12-14] відзначають, що механічні коливання, що виникають у процесі обробки заготовок, можуть мати різний характер та інтенсивність, і залежать вони від швидкості обертання заготовки, її розмірів та матеріалу. Автори цих робіт пропонують способи обліку впливу вібрацій у верстатах з метою знаходження кращих режимів роботи обладнання, що дозволить покращити якість обробки деталей на металорізальних верстатах. Оскільки в даний момент спостерігається тенденція до підвищення якості та точності виробів, що обробляються на верстатах, питання розробки математичних моделей розрахунку точності металообробки або вдосконалення вже існуючих моделей є актуальним і перспективним.

1.3 Аналіз сучасних систем керування електроприводами металообробних верстатів

Для забезпечення необхідного за техніко-економічними та технологічними вимогами руху виконавчого органу верстата, наприклад, різця, шліфувального круга або фрези, широко використовуються системи управління електроприводів головного руху та руху подач металообробних верстатів. Найбільш поширеними в даний час є системи векторного керування електроприводами з датчиками зворотних зв'язків і без них системи прямого управління моментом і СУ з використанням нейрорегуляторів у своїй структурі.

Якщо в металообробному верстаті необхідно забезпечити регулювання швидкості обертання виконавчого механізму широкому діапазоні, то

застосовуються векторні системи управління. Раннє у векторних системах управління застосовувалися датчики Холла, що дозволяють вимірювати магнітний потік у зазорі між статором та ротором електричної машини. Однак застосування датчиків Холла робить систему недостатньо надійною та дорогою. Обчислення потокозчеплення ротора, а також його кутового положення в системах векторного управління з датчиком Холла відбувається за допомогою математичних перетворень на підставі даних про струми обмоток статорів і потоку в зазорі. Якщо електроприводі верстата потрібно забезпечити діапазон регулювання швидкості виконавчого механізму більше 1000, то використовуються векторні системи управління асинхронним приводом з датчиком зворотного зв'язку, виконаним у вигляді енкодера. Сучасні методи так званого векторного управління забезпечують частотно-регульованого електроприводу верстата практично ті ж властивості керованості, які має найдосконаліший електропривод постійного струму.

Математичний опис системи векторного управління асинхронним короткозамкнутим двигуном при орієнтації системи координат вектора потокозчеплення ротора здійснюється наступною системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{1\alpha} = \frac{1/R_1}{\sigma T_1 p} (u_{1\alpha} - R_1 i_{1\alpha} + \omega_{0\text{эл}} \sigma T_1 R_1 i_{1\beta} - \frac{L_m}{L_2} p \psi_2), \\ i_{1\beta} = \frac{1/R_1}{\sigma T_1 p} (u_{1\beta} - R_1 i_{1\beta} + \omega_{0\text{эл}} \sigma T_1 R_1 i_{1\alpha} - \frac{L_m}{L_2} \omega_{0\text{эл}} \psi_2), \\ \psi_2 = \frac{1}{T_2 p} (L_m i_{1\alpha} - \psi_2), \omega_p = \frac{L_m}{L_2} R_2 \frac{i_{1\beta}}{\psi_2}, \omega_{0\text{эл}} = \omega_{\text{п}} + \omega_p, \\ M_d = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \psi_2 i_{1\beta}, M_d - M_c = J p \omega, \\ u_{1\alpha}^* = W_{\text{пт}\alpha}(p) [u_{\text{пт}} - k_{\text{т}} i_{1\alpha}], u_{\text{пт}} = W_{\text{пт}}(p) [\psi_{\text{зад}} - k_{\text{пт}} \psi_2], \\ u_{1\beta}^* = W_{\text{пт}\beta}(p) [u_{\text{рс}} - k_{\text{т}} i_{1\beta}], u_{\text{рс}} = W_{\text{рс}}(p) [u_{\text{зад}} - k_{\text{с}} \omega], \end{array} \right. \quad (1.1)$$

де $i_{1\alpha}, i_{1\beta}$ – складові струму статора;

R_1, R_2 – активні опори фазних обмоток статора та ротора;

T_1, T_2 – постійні часу статора та ротора, $T_1 = L_1/R_1, T_2 = L_2/R_2$;

L_1, L_2 – індуктивності обмоток статора та ротора;

σ – коефіцієнт розсіювання електродвигуна, $\sigma = 1 - L_m^2/(L_1 \cdot L_2)$;

L_m – індуктивність намагнічує контуру;

$u_{1\alpha}, u_{1\beta}$ – складові напруги статора;

ω_{0EL} – кутова швидкість оберткової системи координат $\alpha - \beta$;

p – оператор Лапласа;

ψ_2 – потокозчеплення ротора;

ω_p – частота роторної ЕРС;

ω – кутова швидкість обертання ротора;

p_{II} – число пар полюсів статора;

M_d – момент, що розвивається двигуном;

M_c – момент опору двигуна;

J – момент інерції двигуна;

$u_{1\alpha}^*, u_{1\beta}^*, u_{1PT}^*, u_{1PP}^*$ – вихідні напруги регуляторів струмів,

потокозчеплення та швидкості;

$W_{1\alpha}, W_{1\beta}, W_{1PT}, W_{1PP}$ – передавальні функції регуляторів струму,

потокозчеплення та швидкості;

$k_T, k_{PT}, k_{ШВ}$ – коефіцієнти передачі датчиків зворотних зв'язків контурів струму, потокосцеплення і швидкості відповідно;

$\psi_{ЗД.}, u_{ЗД.}$ – задані значення потокозчеплення та швидкості.

Функціональна схема регулювання швидкості при векторному управлінні асинхронним двигуном з датчиком швидкості наведено на рисунку 1.2.

Живлення двигуна здійснюється від перетворювача частоти з керованим випрямлячем (КВ) та автономним інвертором напруги (АІН).

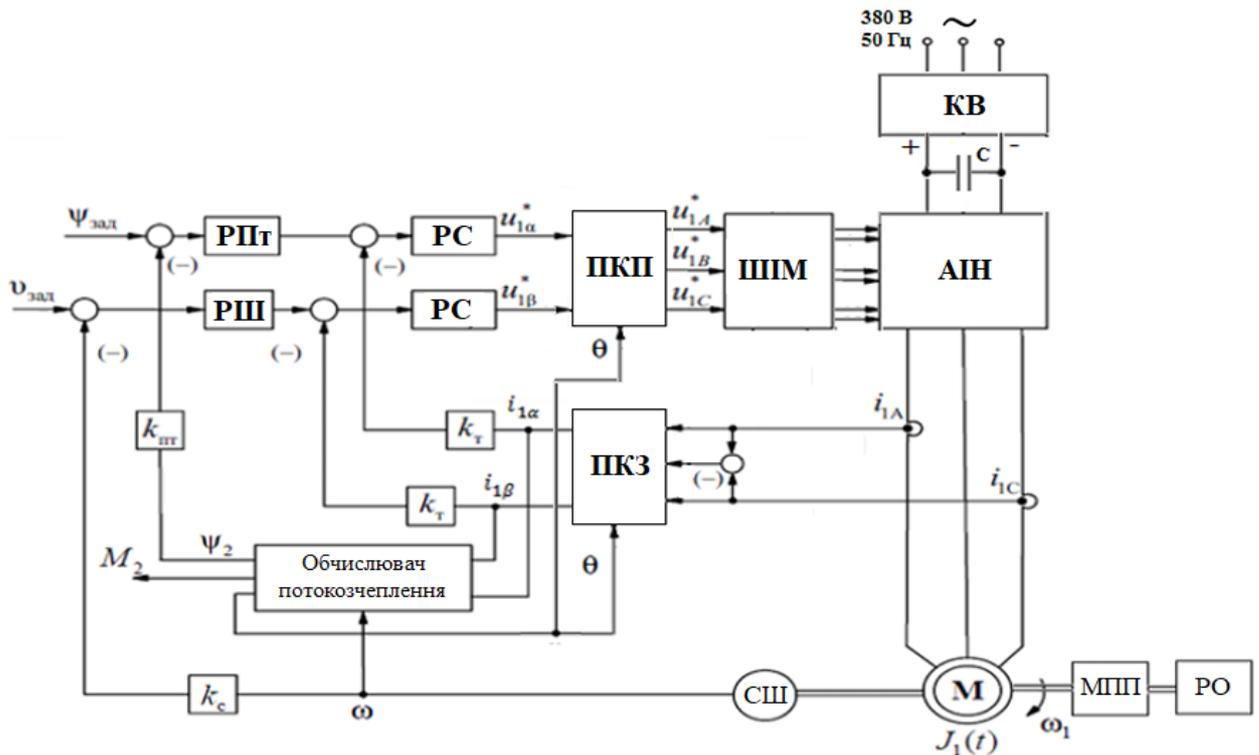


Рисунок 1.2 – Функціональна схема регулювання швидкості при векторному керуванні асинхронним двигуном з сенсором швидкості

На рисунку 1.2 приведені такі умовні позначення: ПКП – перетворювач координат прямий; ПКЗ – перетворювач координат зворотний; ШІМ – широтно-імпульсний модулятор; АІН – автономний інвертор напруги; КВ – керований випрямляч; СШ – сенсор швидкості; М – асинхронний двигун; МПП – механічний передавальний пристрій; РО – робочий орган виконавчого механізму; РШ – регулятор швидкості; РПт – регулятор потокозчеплення.

Напруги на виході АІН утворюють струми в статорних обмотках двигуна. Сигнали від датчиків струму i_{1a} , i_{1c} надходять на вхід ПКЗ. Виходом ПКЗ є струми системи координат, що обертається, які порівнюються зі струмами завдання на входах регуляторів струму.

Швидкість двигуна вимірюється датчиком швидкості (СШ). Сигнал СШ порівнюється із сигналом завдання швидкості. Результат неузгодженості є сигналом завдання РШ. Вихід регулятора швидкості є завданням струму, яке порівнюється зі струмом на виході ПКЗ.

Робочий орган (виконавчий механізм) приєднано до валу двигуна через спрощений МПП у вигляді муфти або малоступінчастого редуктора.

У наведеній на рисунку 1.1 системі управління в якості електродвигуна використовується асинхронний трифазний з короткозамкненим ротором. Живлення електродвигуна здійснюється за допомогою напівпровідникового перетворювача частоти, що підтримує режим векторного управління датчиком зворотного зв'язку за швидкістю. В якості сенсорів швидкості в металорізальних верстатах застосовуються оптичні інкрементальні або абсолютні енкодери з роздільною здатністю до 10000 імп/об і напругою живлення від 5 до 32 В.

У практиці проектування та експлуатації систем управління електродвигунами спостерігається стійка тенденція відмови від використання сенсорів механічних величин, зокрема сенсорів Холла. Такий перехід пояснюється низкою суттєвих переваг, таких як підвищена надійність, знижена вартість, найкращі масогабаритні показники систем керування без датчиків. Замість датчиків відновлення стану системи використовуються різні оцінюючі моделі. Ці моделі дозволяють опосередковано визначати положення ротора двигуна шляхом аналізу електричних сигналів, які отримують від електричної машини. Для обчислення положення ротора використовуються класичні методи оцінювання, такі як: адаптивні системи із моделлю, що задає; розширений фільтр Калмана; спостерігач стану Люенберга та інші.

Функціональна схема векторної системи керування електроприводом без сенсора швидкості приведена на рисунку 1.3.

У системі управління без датчика швидкості інформація про поточне положення, кутову швидкість, потокозчеплення і момент електродвигуна формується в блоках обчислення відповідних параметрів. Якість регулювання швидкості в системах без датчика швидкості залежить від відповідності математичної моделі та її параметрів реальній електричній машині. Однак навіть при точному моделюванні можлива поява помилок,

спричинених похибками вимірювання та нелінійностями у характеристиках машини. В цілому, бездатчикове управління електроприводом є перспективною технологією, яка дозволяє підвищити надійність, компактність і знизити витрати в системах управління двигуном.

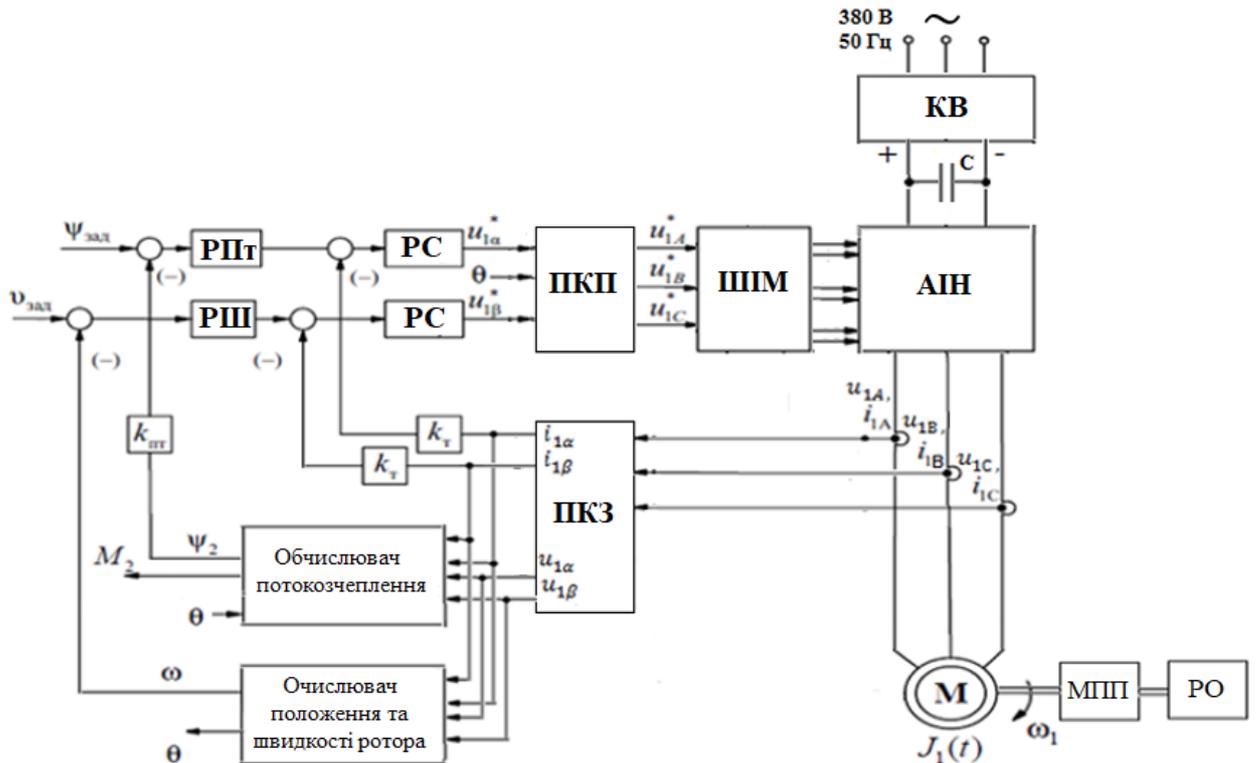


Рисунок 1.3 – Функціональна схема системи векторного керування електроприводом без сенсора швидкості

В сьогоднішні перспективними є електроприводи головного руху верстатів, у яких є вентильний чи вентильно-індукторний електродвигун. У таких електроприводах частота струму або напруги на виході інвертора визначається частотою обертання ротора за допомогою сенсора положення ротора. Вентильні електродвигуни характеризуються конструктивною простотою та економічністю. Функціональна схема регульованого електроприводу з вентильним двигуном змінного струму приведена на рисунку 1.4.

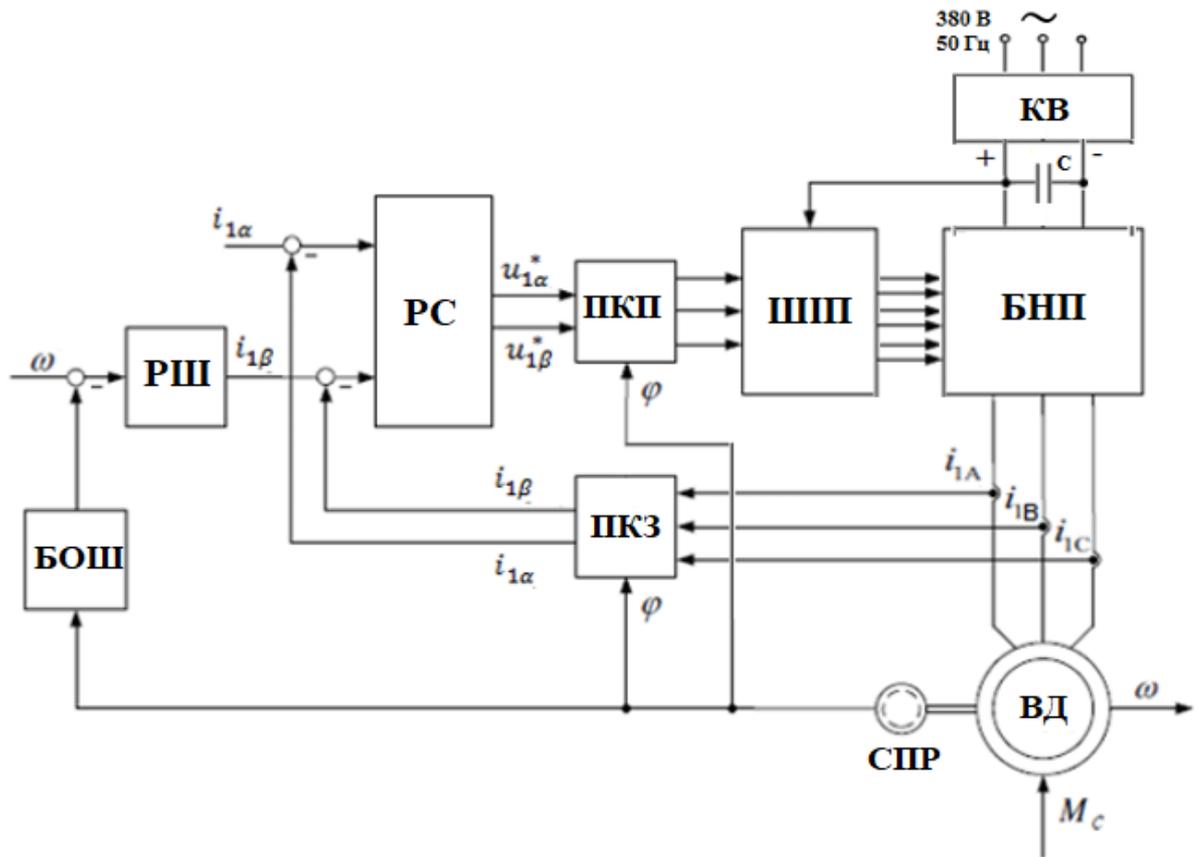


Рисунок 1.4 – Функціональна схема регульованого електроприводу з вентильним двигуном

На рисунку 1.4 приведені такі позначення: ВД – вентильний електродвигун; СПР – сенсор положення ротора; M_c – момент опору електродвигуна; φ – кут повороту ротора вентильного двигуна; РС – блок регуляторів струму; БОШ – блок обчислювача швидкості; БНП – блок напівпровідникового перетворювача.

У приведеній на рисунку 1.4 функціональній схемі регульованого електроприводу тригонометричні перетворення змінних між обертовою та нерухомою системами координат виконуються за допомогою блоків перетворення координат ПКЗ і ПКП при відомому значенні кута положення ротора вентильного двигуна. У блоці БОШ відбувається диференціювання кута положення ротора для розрахунку поточної кутової швидкості вентильного електродвигуна.

У системі управління вентильним приводом, що розглядається, можна досягти широкого діапазону регулювання швидкості до 100000, а також високої швидкодії, при якому смуга пропускання контуру регулювання швидкості може становити до 500 Гц. Час реакції моменту вентильного електродвигуна на стрибкоподібну зміну статора струму за завданням може становити від 10^{-5} до 10^{-4} секунди.

Для досягнення максимальних діапазонів регулювання електроприводів з вентильно-індукторними двигунами змінного струму необхідно, по-перше, забезпечити синусоїдальну форму струмів двигуна, по-друге, компенсувати пульсацію моменту. Момент вентильного двигуна залежить від середнього значення струму, що подається на обмотки індукторів. У зв'язку з цим регулювання електромагнітного моменту здійснюється за допомогою зміни напруги, що підводиться до обмотування індукторів.

Вентильно-індукторні приводи застосовуються в верстатах потужністю до 50 кВт, де високі вимоги до якості регулювання є першорядними. Ефективне використання вентильно-індукторних приводів особливо актуальне для верстатів з номінальною частотою обертання 6000 оборотів за хвилину та вище.

Функціональна схема векторного управління асинхронним двигуном з датчиком швидкості та нейронним регулятором (НР) з передбаченням приведена на рисунку 1.5.

Управління з прогнозом є ефективним підходом у сфері управління різними об'єктами. Воно засноване на використанні нейромережевих моделей для передбачення поведінки об'єкта керування у майбутньому. Цей метод використовує принцип горизонту, що віддаляється, тобто модель передбачає реакцію об'єкта на певному часовому інтервалі вперед. Одним із ключових компонентів такої системи є нейрорегулятор. Він складається з нейромережевої моделі керованого процесу та блоку оптимізації. Нейросетева модель використовується для передбачення поведінки об'єкта

управління, а блок оптимізації використовується для обчислення сигналу, що управляє, який мінімізує заданий критерій якості управління.

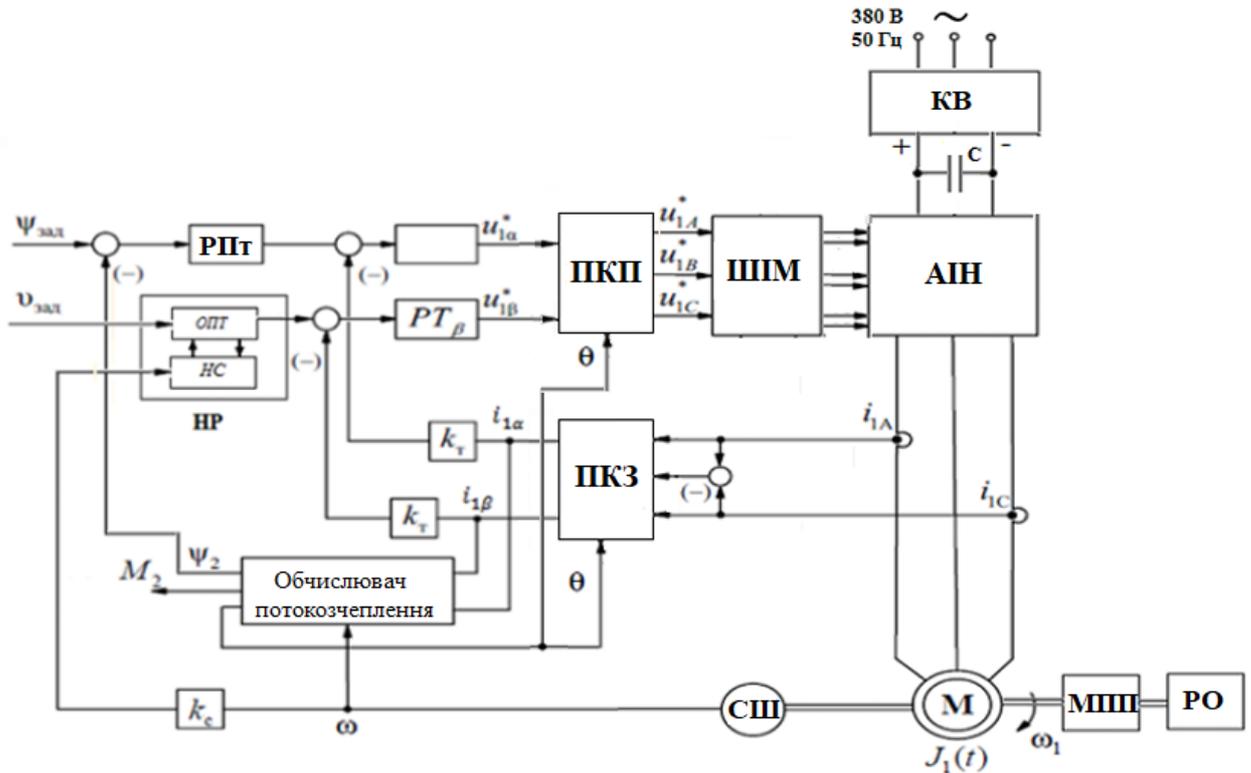


Рисунок 1.5 – Функціональна схема регулювання швидкості при векторному керуванні асинхронним двигуном з датчиком швидкості та нейронним регулятором

В блоці нейронної мережі реалізовано динамічну модель керованого процесу. Ця модель дозволяє врахувати різні фактори, що впливають на поведінку об'єкта управління, та передбачити його майбутній стан [12].

Нейрорегулятори, що використовуються в системах управління (СУ), є ефективними інструментами для забезпечення динамічних характеристик приводу верстата. За результатами проведеного дослідження стало ясно, що вони перевершують класичний ПД регулятора за показниками якості перехідних процесів. Однак, незважаючи на свою ефективність, нейроконтролери мають деякі недоліки. Один із них полягає у тривалому процесі навчання.

Порівняння показників, розглянутих вище систем управління приведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняння показників систем управління

Метод управління / Показники якості	Векторне управління з сенсором швидкості АД	Векторне управління без сенсора швидкості АД	Векторне управління ВД	Векторне управління з НР АД
Діапазон регулювання швидкості	Високий діапазон регулювання швидкості $D \geq 100$	Діапазон регулювання швидкості нижче, ніж із сенсором $D \leq 100$	Високий діапазон регулювання швидкості $D \leq 100000$	Високий діапазон регулювання швидкості $D \geq 1000$
Полоса пропускання, Гц	100 і вище	до 100	500	500
Жорсткість механічної характеристики	Жорстка	Менш жорстка	Жорстка	Жорстка
Наявність додаткових звороних зв'язків	СС, СШ	СС	СС, СШ, СП	СС, СШ
Тип регуляторів	ПД	ПД	ПД	ПД, НР
Недоліки	наявність проводів, що з'єднують ДЗЗ та СУ (іноді далеко)	невисока якість регулювання швидкості (залежить від ступеня відповідності моделі АД реальній машині)	висока вартість приводу, наявність проводів, що з'єднують ДЗЗ та СУ (іноді далеко)	Складність навчання нейрорегулятора, наявність проводів, що з'єднують ДЗЗ та СУ (іноді далеко)

У векторних системах керування вплив на момент двигуна здійснюється зміною струму статора. Продовженням розвитку векторних систем керування електроприводами є метод прямого керування моментом, запропонований компанією АВВ. Управління моментом двигуна у цьому методі здійснюється за допомогою впливу на зчеплення статора. Зміна

потокосцеплення асинхронного двигуна відбувається з допомогою оптимальної комутації ключів автономного інвертора напруги [14].

1.4 Перспективи розвитку електроприводів металообробних верстатів

Пружні коливання в приводах верстатів призводять до погіршення якості обробки заготовок, тому перспективним напрямом машинобудування є підвищення вібростійкості. Для покращення стійкості верстата до вібрацій рекомендується звернути увагу на структуру приводів, заснованих на коробках швидкостей, інтегрованих у шпиндельний вузол. Це дозволяє досягти високої точності без значних додаткових витрат за правильного аналізу прийнятих проектних рішень.

Автори розглядають можливість застосування компактних мотор-шпинделів. Тим не менш, такі приводні системи схильні до підвищених теплових навантажень і мають високу вартість.

Одним з можливих шляхів підвищення жорсткості верстата, зниження вібрацій у ньому та підвищення якості виробів є спосіб, при якому слід спростити кінематичну схему електроприводу головного руху шляхом зменшення кількості використовуваних передавальних відносин коробки швидкостей [11]. У цьому управлінні швидкістю обертання має здійснюватися від перетворювача частоти. Розроблена методика зменшення кількості передавальних відносин коробки швидкостей [11] підходить для застосування до різних типів верстатів. Такий спосіб модернізації електроприводу є перспективним та відносно не дорогим.

Існуючі системи векторного управління з датчиками зворотного зв'язку та без застосовуються в приводах головного руху та руху подач верстатів розглянутих раніше вітчизняних та зарубіжних верстатобудівних підприємств [12-16]. У таких системах керування електроприводами використовуються асинхронні електродвигуни із короткозамкненим ротором

або вентильні двигуни. У зв'язку з меншими масогабаритними показниками порівняно з АД з короткозамкненим ротором і ціною, що знижується, все більш широке застосування в приводах головного руху верстатів отримують ВД. Використання ВД доцільно у високоточних верстатах із широким діапазоном регулювання швидкості.

Системи керування високоточних верстатів повинні враховувати можливість появи пружних коливань у приводах верстатів, зменшуючи або усуваючи їх. Зниження коливань при керуючих впливах може бути здійснено за допомогою застосування спеціальних задатчиків інтенсивності, що обмежують прискорення приводу у процесі розгону та гальмування двигуна.

У процесі обробки заготовки піддаються пружним деформаціям, що призводять до зниження якості, підвищення шорсткості виробів. Крім заготовок пружним деформаціям можуть бути схильні довгі вали в шарико гвинтових передачах або ремінні передачі. Перспективними є розробка таких систем керування верстатами, у яких координати приводів (швидкість, положення) змінюється з урахуванням пружних деформацій.

Застосування у системах керування електроприводами верстатів ПД регуляторів зі стандартними налаштуваннями не дозволяє забезпечити високу динамічну якість приводів. Тому перспективним напрямом є розробка СК з нейрорегуляторами у своїй структурі.

1.5 Висновки:

1. Сучасні приводи верстатів значно різняться по діапазону регулювання. Діапазон регулювання залежить від вимог до якості та точності обробки заготовок. У системах керування без датчика зворотного зв'язку за швидкістю діапазон регулювання складає $D \leq 100$. У системах керування з датчиком зворотного зв'язку за швидкістю діапазон регулювання $D \geq 100$. Системи керування з вентильними двигунами є лідерами по діапазону регулювання, який може досягати $D \leq 100000$.

2. Проведено аналіз сучасних систем керування електроприводами верстатів. Системи керування з нейрорегуляторами у своїй структурі та системи керування з вентильним двигуном є найбільш перспективними, оскільки забезпечують необхідні динамічні характеристики верстатів, а також широкий діапазон регулювання швидкості.

3. Розглянуто загальні вимоги до електроприводів головного руху та руху подач, та приватні, що належать до конкретного типу приводу. Серед розглянутих вимог слід відзначити широкий діапазон регулювання, високу жорсткість, швидкодію, продуктивність, компактність, а також високу плавність та точність руху. Виконання зазначених вимог дозволить підвищити довговічність приводних систем верстата, покращити якість обробки заготовок, знизити шпаруватість.

4. До сучасних виробів верстатів пред'являють безперервно зростаючі вимоги до підвищення якості, а також однієї з його складових у вигляді точності. На точність обробки впливають такі фактори як механічні коливання в верстаті, погіршення стану інструментальних обробних матеріалів, встановлення неточних інструментальних обробних матеріалів, а також заготовок, пружні деформації, режими різання, геометрична точність обладнання і т.д.

5. Проблеми підвищення продуктивності верстатів, якості, точності заготовок є актуальними в сьогоденні. Для вирішення цих проблем збільшують жорсткість верстата, розробляють спеціальні системи керування чи математичні моделі. При проектуванні та синтезі систем керування приводами верстатів необхідно враховувати вібрації, пружності, зазори у зоні різання. Спеціальні пристрої, датчики сил різання, нейрорегулятори активно застосовуються під час проектування таких систем.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ГОЛОВНОГО РУХУ І РУХУ ПОДАЧ ВЕРСТАТІВ

2.1 Застосування нейронних мереж у системах керування електроприводами

В умовах сучасного розвитку науки й техніки дедалі частіше впроваджуються ті чи інші нові наукові розробки. Не виняток і системи управління електроприводів (СУЕП). Розглянемо основні підходи у застосуванні інтелектуальних нейросистем (ІНС) в СУЕП.

Існує велика кількість робіт, присвячених нейронним мережам, в яких наводиться їх математичний опис, різновиди, гідності та недоліки, сфери застосування та способи їх реалізації [19, 20].

Програмний пакет Matlab Simulink є зручним інструментом для синтезу систем керування динамічними об'єктами, у тому числі із застосуванням нейронних мереж. У математичному середовищі широко використовуються 3 архітектури нейронних мереж у вигляді: нейроконтролера, що дозволяє передбачати поведінку керованого об'єкта (NN Predictive Controller); нейроконтролера на основі моделі авторегресії зі ковзним середнім (NARMA-L2 Controller); нейроконтролера, у структурі якого використовується еталонна модель керованого об'єкта (Model Reference Controller) [18].

Нейронні мережі здатні замінити стандартні пропорційно інтегральні (ПІ) та пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) регулятори або покращити характеристики шляхом адаптації їх налаштувань під поточні умови роботи [17]. Позитивною властивістю нейромережових регуляторів є їхній малий ступінь чутливості до зміни параметрів об'єкта управління (наприклад, при зменшенні моменту інерції на 50% працездатність регулятора на базі ІНС зберігається), порівняно з класичними регуляторами.

Дослідження, проведене авторами статті [17], показало, що для управління приводом верстата може ефективно використовуватися нейромережевий регулятор NARMA-L2. Цей регулятор дозволяє досягти високої динамічної якості електроприводу, а також забезпечити переміщення виконавчого механізму верстата заданою траєкторією з високою точністю.

У роботі [16] зроблено синтез системи управління приводом подачі верстата, в якій застосовується алгоритм узагальненого нейроуправління із передбаченням NGPC. Наводяться графіки швидкості приводу за різних значень параметрів нейроконтролера. Як випливає з графіків, нейроконтролер може ефективно застосовуватися для керування такими об'єктами.

2.2 Синтез системи керування приводом поздовжньої подачі токарного верстата з пружними зв'язками із застосуванням нестандартного задавача інтенсивності

Як було зазначено раніше, у машинобудуванні, підвищення якості та точності обробки заготовок є важливим завданням. Точність розмірів та форми оброблених заготовок залежить від жорсткості системи, точності верстата, інструменту тощо. На якість і точність обробки значно впливають електроприводи подач.

Конструкція електроприводів поздовжньої або поперечної подачі включає приводний двигун і передавальний механізм, на якому закріплений виконавчий орган приводу верстата. У верстатах з числовим програмним управлінням електроприводи подачі включають кулькову гвинтову передачу (КГП), що безпосередньо впливає на відповідність розмірів, геометрії деталі після обробки необхідним значенням.

Внаслідок пружних властивостей КГП, електропривод подачі є двомасовою системою, яка піддається виникненню пружних коливань при обурювальних впливах з боку супортної групи верстата в процесі

металообробки виробів на верстатах. Виникаючі вібрації призводять до підвищених динамічних навантажень на механічну частину електроприводу, а також негативно позначаються на якості обробки деталей.

Для підвищення вібростійкості металообробних верстатів застосовуються системи керування, що дозволяють знижувати темп розгону та гальмування двигуна. Однак використання таких СУ призводить до зниження швидкодії, і, як наслідок, продуктивності верстата.

Для зниження негативного впливу вібрацій у металорізальних верстатах, перспективним напрямом є використання у системах управління нейронних мереж.

При дослідженні та проектуванні автоматизованих СУ електроприводами верстатів часто робиться припущення, що привід не схильний до абсолютно жорсткого. Таке припущення припустимо, якщо частота власних пружних коливань механізму значно перевищує частоту, що визначає швидкодію системи керування. В іншому випадку необхідно враховувати пружні деформації в електроприводній системі. Слід мати на увазі, зі збільшенням швидкодії системи керування електроприводом металорізального верстата, зростає ймовірність того, що вплив пружних властивостей на систему керування стане більш помітним [18].

Двомасова система з пружними зв'язками приведена на рисунку 2.1.

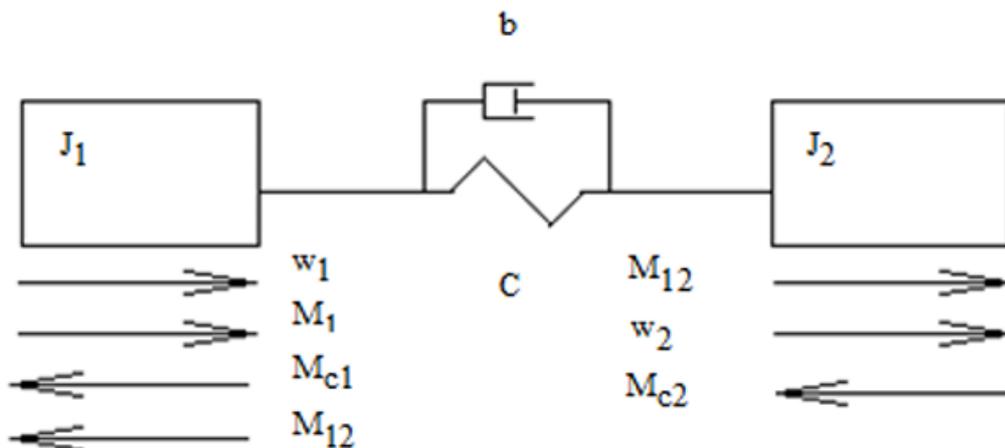


Рисунок 2.1 – Двомасова система

На рисунку 2.1: J_1, J_2 – моменти інерції двох мас; b – коефіцієнт, який характеризує демпфуючі властивості; C – коефіцієнт, що характеризує жорсткість системи; M_{12} – пружний момент взаємодії двох мас; M_{c1}, M_{c2} – моменти опору двох мас; w_1, w_2 – кутові швидкості обертання двох мас.

У встановленому режимі роботи $w_1=w_2=const$, в перехідних режимах $w_1 \neq w_2 = var$.

Для математичного опису двомасового об'єкта, представленого у вигляді приводу поздовжньої подачі верстата з урахуванням пружних властивостей, використовується другий закон Ньютона для мас, що обертаються:

$$\begin{cases} M_1 - M_{c1} - M_{12} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M_{12} = C(f_1 - f_2); \\ M_{12} - M_{c2} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}. \end{cases} \quad (3.1)$$

У наведених рівняннях: f_1, f_2 – кути повороту мас.

У системах управління електроприводами з метою обмеження моменту, прискорення чи швидкості широко використовуються задатчики інтенсивності. При проектуванні СУ під час попередніх розрахунків зазвичай використовується лінійний задатчик інтенсивності. Недоліком такого задавача є те, що електромагнітний момент двигуна в перехідних режимах змінюється поступово, що зменшує термін його служби.

У реальних системах управління електроприводами найчастіше використовуються S-подібні ЗІ, які дозволяють обмежувати прискорення та ривок вихідної координати електроприводу. У таких задавачах інтенсивності необхідний вихідний сигнал у процесі інтегрування вхідного сигналу задавачаа. Застосування S-подібних задавачів призводить до плавної зміни електромагнітного моменту двигуна у перехідних режимах [21].

Виконаємо синтез системи управління електроприводом поздовжньої подачі верстата з пружними зв'язками. При синтезі обмеження прискорення приводу застосуємо задавач інтенчності.

У цій роботі застосовується не стандартний ЗІ, що включає 2 стандартних. Структура такого ЗІ приведено на 3.2.

На рисунку 2.2 приведені наступні позначення: Score1-Score4 – відображення сигналів, що формуються; підсилювачі сигналів A1-A14; інтегральні ланки D1-D9; перемикачі B1-B9; блоки множення/розподілу P1-P6; постійних C1-C7; вхідних та вихідних величин In1-In3, Out1.

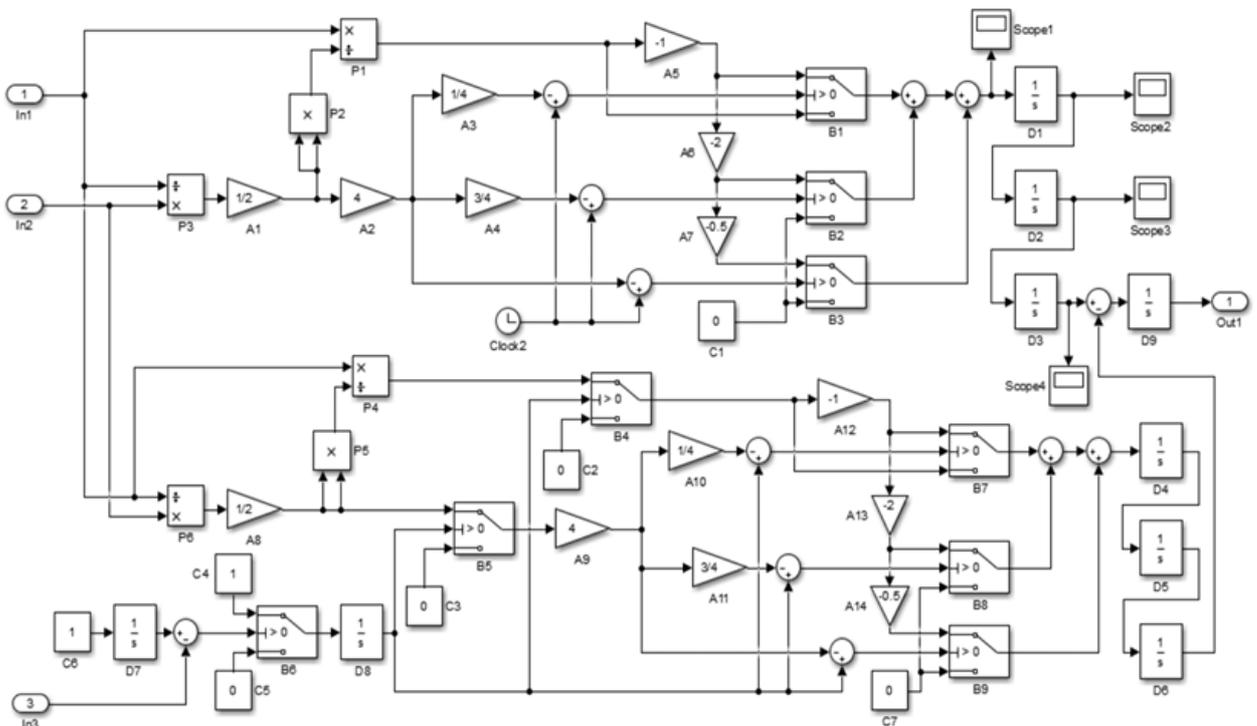


Рисунок 2.2 – Структура задавача інтенсивності

Приведений на рисунку 2.2 задавач інтенсивності генерує два протилежно спрямованих S-подібних сигнали. Для пояснення принципу роботи задавача інтенсивності на рисунку 2.3 приведений приклад ступінчастого сигналу, який подається на вхід S-подібного задавача і згодом кілька разів інтегрується, поки не стане S-подібним (рисунки 2.3 а-г).

Нестандартний задавач включає два стандартних S-подібних і дозволяє задавати прискорення приводу, величину встановленого значення вихідного

сигналу задавача і час, протягом якого сигнал буде незмінний. При використанні СУ верстатами вихідною величиною задавача може бути завдання на швидкість обертання приводу. Амплітуда сигналу завдання визначає бажане значення вхідного сигналу системи, а часовий інтервал задає тривалість цього сигналу. Завдяки використанню двох протилежно спрямованих S-подібних сигналів забезпечується плавне наростання та спад інтенсивності вхідного сигналу системи управління, що дозволяє мінімізувати коливання та перехідні процеси в системі.

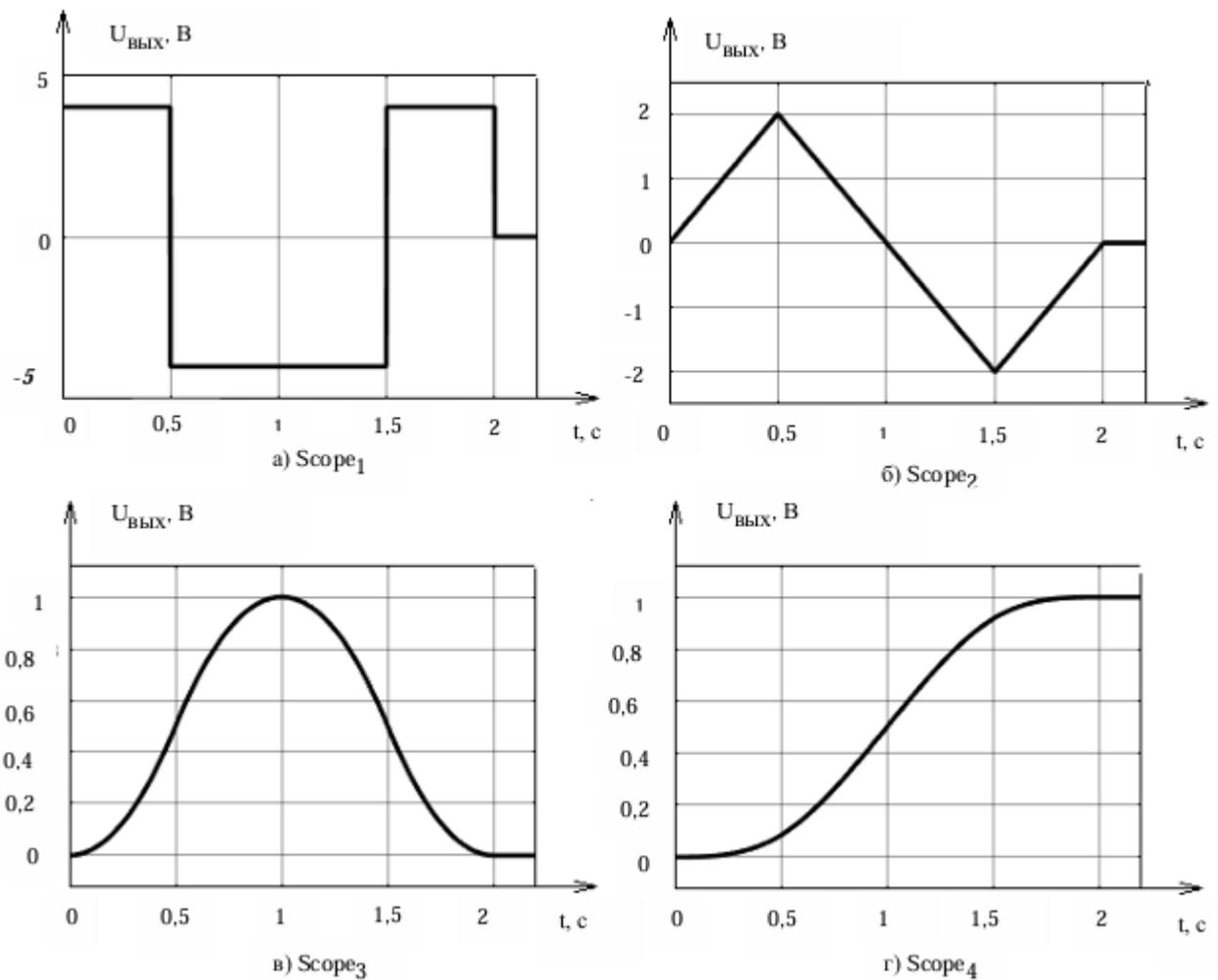


Рисунок 2.3 – Тимчасові функції, що пояснюють формування сигналу завдання

Кінематична схема приводу подачі складається з електродвигуна, муфти, що з'єднує двигун і кулькову гвинтову передачу, супорта.

Нестандартний задатчик інтенсивності, розглянутий раніше, подає керуючий сигнал на контур положення.

У першому розділі цієї роботи зазначалося, що найбільш поширеним системам управління ставляться зокрема векторні з сенсорами зворотного зв'язку.

На рисунку 2.4 приведено векторну систему управління приводом поздовжньої подачі верстата з контурами струму, швидкості та положення, виконана в математичному середовищі Matlab Simulink.

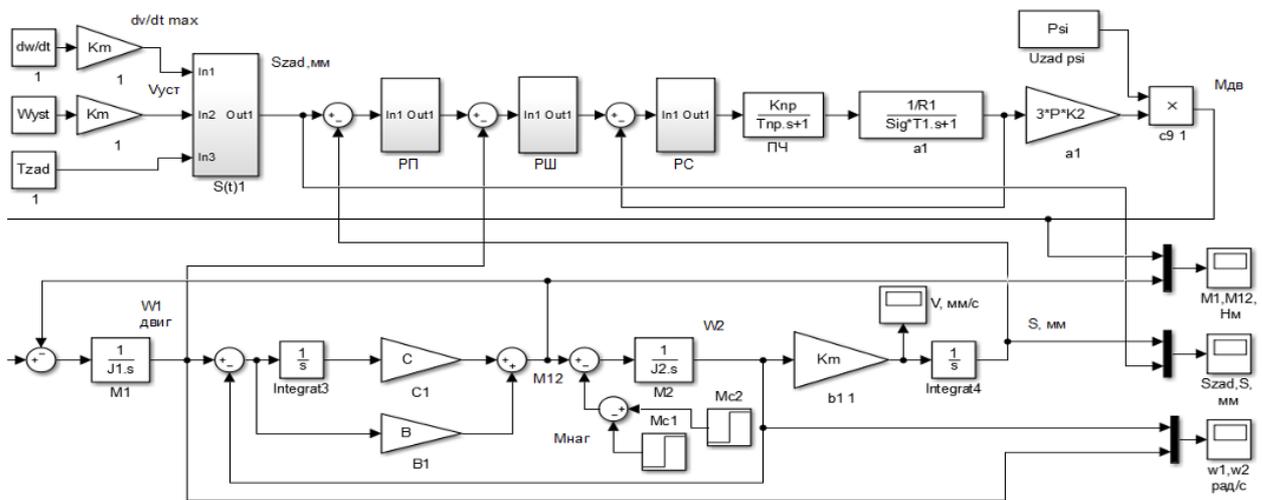


Рисунок 2.4 – Структурна схема двомасового електроприводу подачі

На рисунку 2.4 приведені такі умовні позначення: $K_{пр}$ та $T_{пр}$ – коефіцієнт посилення та постійна часу ПЧ; K_2 – коефіцієнт; P – кількість пар полюсів електродвигуна; J_1 , J_2 – моменти інерції мас; R_1 – активний опір роторної обмотки; $\text{Sig} \cdot T_1$ – постійна часу електродвигуна; Ψ – номінальне значення потокозчеплення; $S(t)1$ – задатчик інтенсивності.

В приводі поздовжньої подачі металорізального верстата, що досліджується, використовується асинхронний електродвигун АДЧР112МА8 з наступними параметрами: потужність $P=2,2$ кВт; номінальна напруга $U_{1n}=220$; номінальна лінійна напруга $U_s = 380$; частота мережі $f = 50$ Гц; число фаз $m=3$; номінальна кутова швидкість обертання ротора $\omega_2=74.3$ рад/с; момент інерції електродвигуна $J_1=0,024$ кг·м²; момент номінальний

$M_H = 29$ Нм; потокозчеплення двигуна номінальне $\Psi_i = 1.1272$ Вб; активний опір роторної обмотки електродвигуна $R_1 = 2,1344$ Ом; стала часу електродвигуна $\text{Sig} \cdot T_1 = 0.0167$; безрозмірний коефіцієнт $K_2 = 0,9192$.

Момент інерції супортної групи приводу подачі $J_2 = 0.0194$ кг м²; Коефіцієнт передачі $k_m = 0.445$.

Коефіцієнти жорсткості та демпфування електроприводу $c_{12} = 780$ Н·м², $b_{12} = 0.536$ Н·м·с/рад.

Перетворювач частоти представлений аперіодичною ланкою першого порядку. Постійна часу перетворювача $T_{\text{пр}} = 0,0001$, коефіцієнт підсилення $K_{\text{пр}} = 220$.

Коефіцієнт підсилення та постійна часу ПІ-регулятора струму: $K_{\text{рс}} = 0.82$, $T_{\text{рс}} = 0,0167$ с. Коефіцієнт підсилення ПІ-регулятора швидкості: $K_{\text{рш}} = 8,75$. Коефіцієнт підсилення та постійна часу ПІ-регулятора положення: $K_{\text{рп}} = 64.9$, $T_{\text{рп}} = 0,1384$ с.

На рисунку 2.5 приведені графіки перехідних процесів структурної схеми приводу поздовжньої подачі верстата.

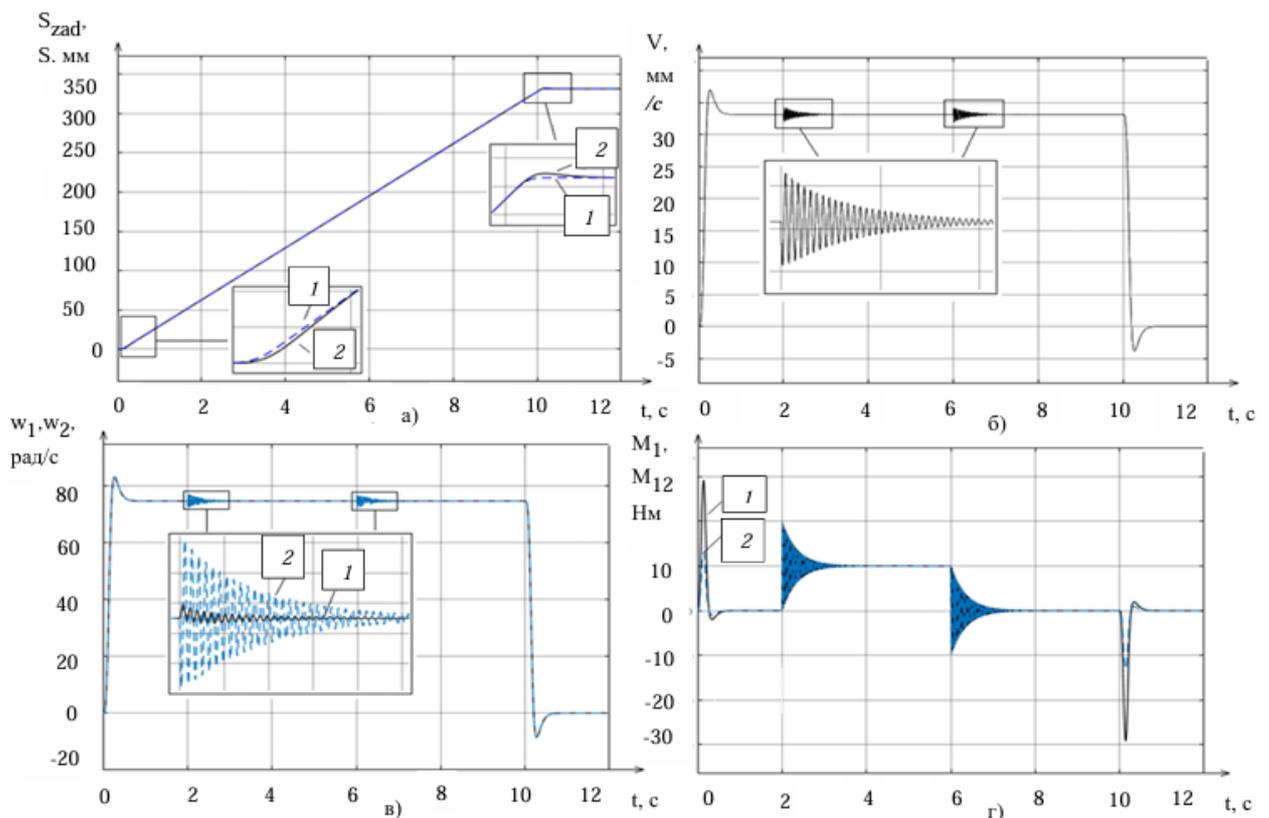


Рисунок 2.5 – Графіки перехідних процесів приводу подачі

На рисунку 2.5: а) завдання шляху S_{zad} , мм – 1; вихідна величина шляху S , мм – 2; б) лінійна швидкість переміщення супортної групи V , мм/с; в) кутова швидкість двигуна, рад/с – 1; кутова швидкість супортної групи, рад/с – 2; г) момент двигуна, Нм – 2; момент супортної групи, Нм – 1. При синтезі структурної схеми, наведеної малюнку 2.4 було взято такі параметри ЗІ: $\omega_{вст}=74,5$ рад/с (номінальна швидкість двигуна); прискорення приводу $d\omega/dt=668$ рад/с²; $T_{zad}=10$ с. З 2 по 4 секунди був поданий момент опору $M_c=10$ Нм, який імітує процес обробки різанням заготовки.

З графіків перехідних процесів можна зробити висновок, що розроблена СУ приводом подачі верстата забезпечує високі динамічні характеристики. Моделювання проводилося в математичному середовищі Matlab Simulink. Вихідний сигнал за положенням практично дорівнює заданому. Як видно з результатів моделювання, кутова швидкість обертання першої та другої маси змінюється плавно з невеликим перерегулюванням у процесі розгону та гальмування при керуванні. Величина електромагнітного моменту асинхронного приводу поздовжньої подачі металорізального верстата не виходить за допустимі межі протягом усього процесу моделювання. Наявність коливань моменту та швидкості у перехідних процесах по збуренню є недоліком розробленої системи керування верстатом.

2.3 Дослідження впливу пружностей елементів кінематичних кіл приводу головного руху верстату на динаміку та точність різання

Сила різання в процесі металообробки деталей на верстатах токарних складається з різних складових. Приводи основного руху мають найбільшу потужність, тому що завдяки їм створюється необхідне для металообробки зусилля різання [8].

На рисунку 2.6 приведена типова структурна схема кінематичного кола приводу основного руху верстата

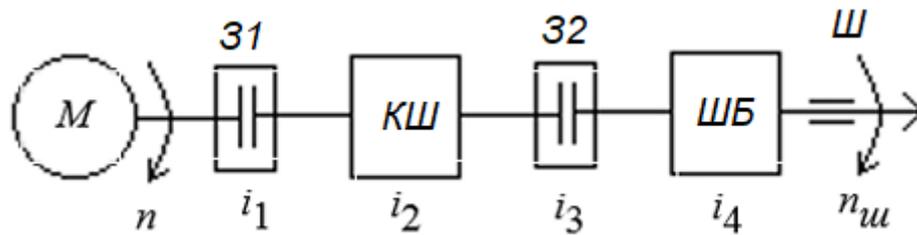


Рисунок 2.6 – Структурна схема приводу основного руху

На приведеному рисунку: n – швидкість двигуна, об/хв; $n_{ш}$ – швидкість шпинделя, об/хв; i_1, i_2, i_3, i_4 – передавальні відношення; Ш – шпиндель; ШБ – шпиндельна бабка; 31, 32 – з'єднання, які можуть бути виконані у вигляді ремінної, зубчастої передачі або муфти; КШ – коробка швидкостей приводу; М – приводний двигун.

Як приклад розглянемо електропривод, аналогічний приводу токарного верстата 16А20Ф3, загальний вигляд якого зображено малюнку 3.7.

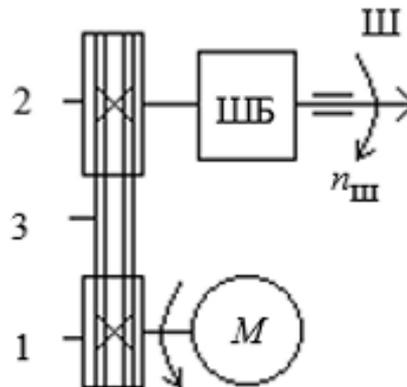


Рисунок 2.7 – Структурна схема кола головного приводу токарного верстата

На приведеному рисунку: 1 – провідний шків; 2 – ведений шків; 3 – ремінь.

Компонування електроприводів з ремінною передачею мають більш компактні осеві розміри. Ремінна передача також виконує функцію ізоляції шпинделя від вібрацій двигуна. При передачі зусиль ремені піддаються розтягуванню, що призводить до відмінностей у лінійних швидкостях шківів.

Співвідношення цих швидкостей залежить від величини зусилля, що передається.

На рисунку 2.8 приведена структурна схема двомасової системи, взаємопов'язаної через пружний ремінь, що заміщається.

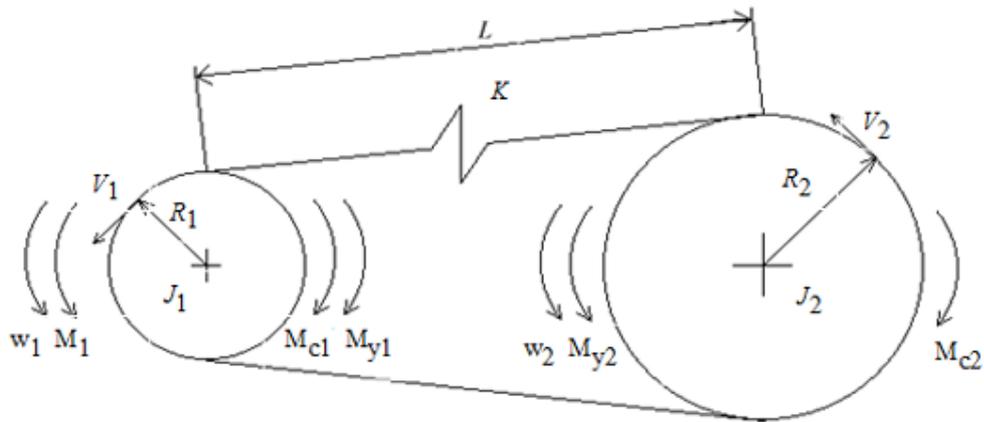


Рисунок 2.8 – Структурна схема двомасової системи

На рисунку 2.8: J_2 – сумарний момент інерції веденого шківів, заготовлі та патрона, наведений веденому шківу, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; J_1 – момент інерції двигуна та провідного шківів, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; R_1, R_2 – радіус провідного та веденого шківів, м; V_1, V_2 – лінійні швидкості, м/с; M_{y1}, M_{y2} – пружні моменти, Нм; M_{c1}, M_{c2} – моменти опору двох мас, Нм; M_1 – момент, створюваний провідним шківом, Нм; w_1, w_2 – кутові швидкості шківів, рад/с; K – коефіцієнт, що враховує жорсткість ременя, Н/м²; L – довжина пробігу провідної гілки ременя, м.

Розробка систем управління точністю обробки заготовок є актуальною проблемою в системах управління електроприводами верстатів, як це було зазначено раніше, у першому розділі цієї роботи.

Існуючі структурні схеми систем керування асинхронними електроприводами можуть бути представлені у вигляді спрощеної структурної схеми системи керування, яка аналогічна структурній схемі системи керування двигуном постійного струму.

Нижче наводиться математичний опис двомасової системи з пружністю другого роду [6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_1 - M_{y1} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M_{y1} = \varepsilon \cdot K \cdot R_1; \\ M_{y2} - M_{c2} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}; \\ M_{y2} = \varepsilon \cdot K \cdot R_2; \\ \varepsilon = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \cdot \frac{1}{T_p \cdot p + 1}; \\ T_p = \frac{L}{V_1}. \end{array} \right. \quad (2.2)$$

У наведених вище рівняннях: p – оператор Лапласа; T_p – постійна часу ременя; ε – відносне подовження ременя; t – час, с.

На рисунку 2.9 приведені системи векторного управління двомасовим приводом верстата, що відрізняються між собою тим, що в СУ, наведеній знизу, введено додатково блок обчислювача моменту опору M_{c2} і поправний коефіцієнт $K_{кор}$ для компенсації помилки швидкості при розтягуванні ременя.

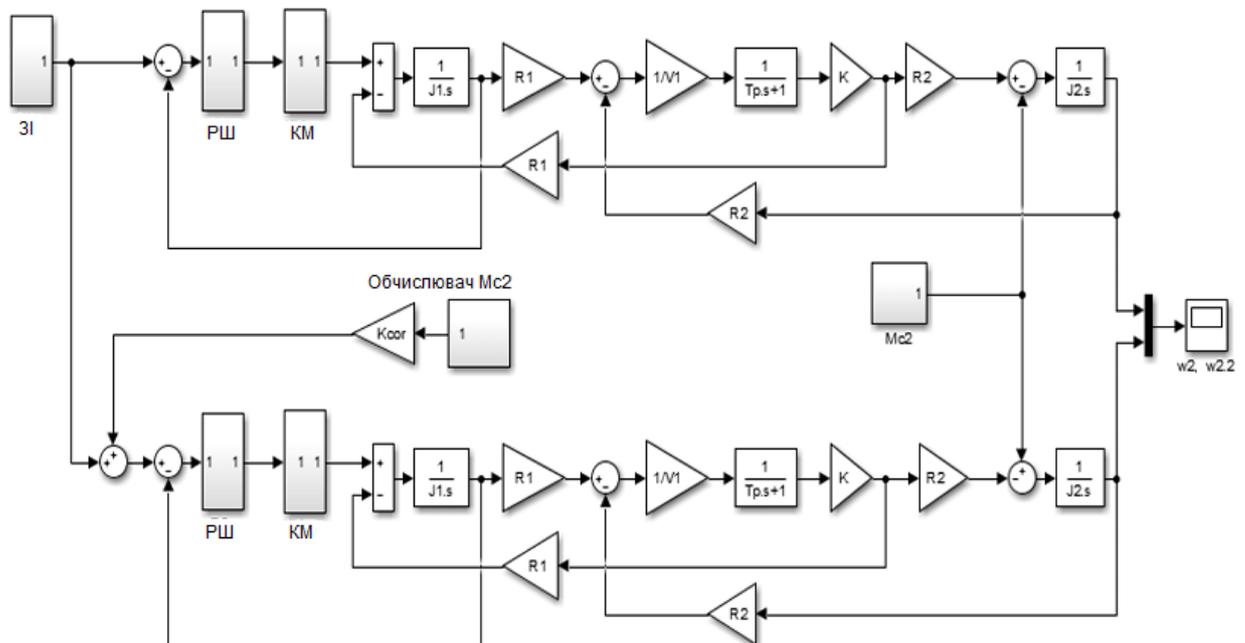


Рисунок 2.9 – Структурна схема привода головного руху верстата з урахуванням пружності ремінної передачі

На рисунку 2.9: w_2 , $w_{2.2}$ – кутові швидкості другої маси, рад/с; КМ – контур моменту, що розвивається двигуном; РШ – регулятор швидкості; ЗІ – задатчик інтенсивності; K_{cor} - коефіцієнт поправки.

Для синтезу СУ були прийняті параметри двигуна АДЧР160М4, що застосовується у верстаті в приводі головного руху: момент інерції ротора $J = 0,045$ кг м²; номінальний момент $M_n = 73$ Нм; номінальна швидкість $w_2 = 153$ рад/с. Постійна час напівпровідникового перетворювача прийнята рівною $T_{пч} = 0,0001$ с.

Приведений момент інерції другої маси становить $J_2 = 0,04$ кг м². Момент інерції першої маси, що включає момент інерції двигуна і ведучого шківів становить $J_1 = 0,045 + 0,005 = 0,05$ кг·м².

Постійна часу ременя береться усередненою $T_r = 0,2$ с.

Коефіцієнт підсилення та постійна часу ПП-регулятора швидкості: $K_{рш} = 62,5$, $T_{рш} = 0,0016$ с.

Коефіцієнт підсилення та постійна часу згорнутого контуру моменту КМ, представленого у вигляді аперіодичного ланки першого порядку: $K_{км} = 1$, $T_{км} = 0,0004$ с.

Момент опору другої маси системи $M_{с2}$ залежить від радіусу, а також матеріалу заготовки, налаштувань приводів подачі, таких як швидкість подачі та глибина різання.

Отримані графіки перехідних процесів систем управління приведені на рисунку 2.10.

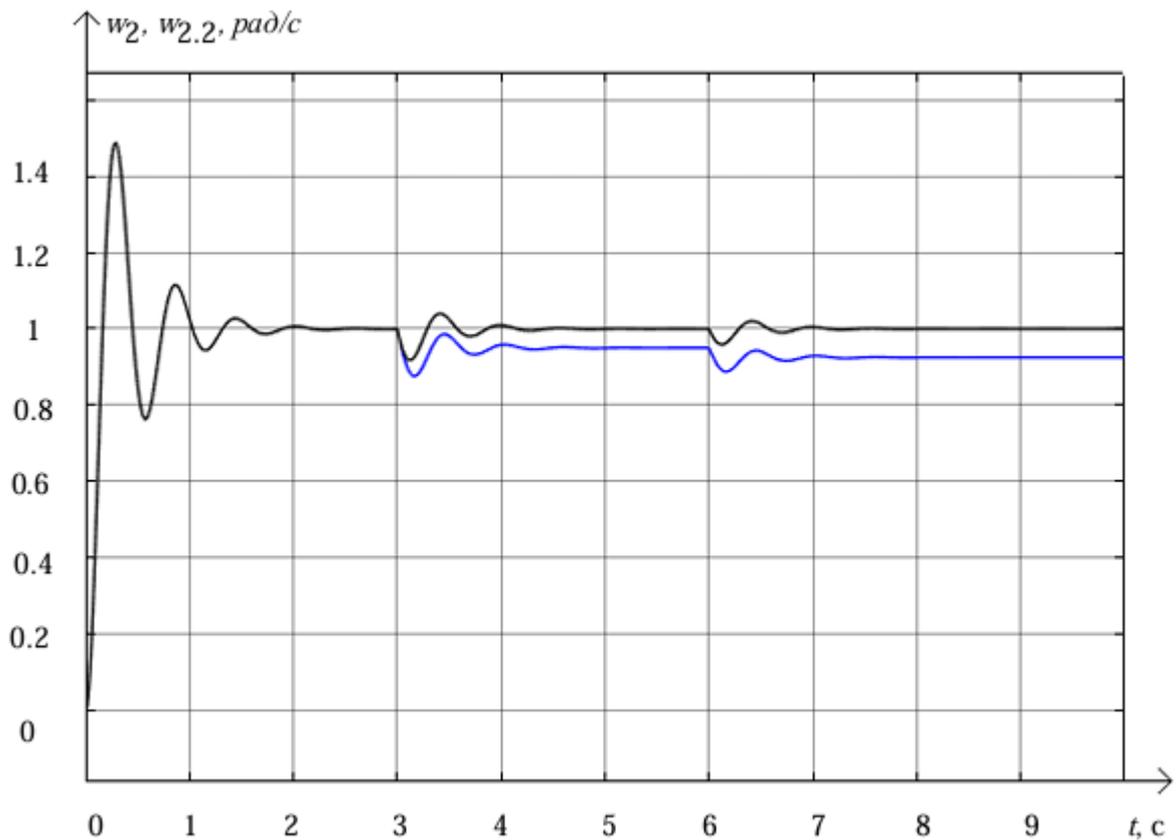


Рисунок 2.10 – Графіки перехідних характеристик базових моделей за швидкістю веденого шківа без поправочного коефіцієнта (синій графік) та з поправним коефіцієнтом $K_{cor}=1$ (чорний графік)

З приведенного рисунка можна зробити висновок, що в першому досвіді кутова швидкість другої маси обох систем управління досягає заданої кутової швидкості обертання $w_2, w_{2.2} = 1$ рад/с за час $t=2$ с. На 3 секунді подано момент опору як $M_{c2} = 0,05$ Нм. На 6 секунд додатково подається момент опору на другу масу $M_{c2} = 0,025$ Нм.

2.3 Висновки:

1. Система управління приводом поздовжньої подачі верстата з нестандартним задатчиком інтенсивності, розроблена в математичному середовищі Simulink, має високі динамічні характеристики електроприводу при керуючих впливах. Недоліком розробленої системи управління є наявність коливань при впливах, що обурюють, по другій масі, які не демпфуються системою управління.

2. Розроблена в математичному середовищі Matlab Simulink система управління двомасовим об'єктом, що дозволяє врахувати пружні властивості ременя з коригувальним коефіцієнтом забезпечує високі статичні характеристики електроприводу головного руху верстата. Практично відсутня статична помилка по кутовий швидкості обертання другої маси в установеному режимі електроприводу після подачі моментів опору. Наведений спосіб розрахунку коригуючого коефіцієнта може бути застосований до електроприводів верстатів, у структурі яких є ремінна передача.

3 СИНТЕЗ ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО МЕТОДУ ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ВЕРСТАТА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕЙРОКОНТРОЛЕРА

3.1 Синтез системи управління металорізального верстата із застосуванням нейроконтролера

Як було зазначено у першому та другому розділах цієї роботи, підвищення якості та точності обробки заготовок можливе завдяки розвитку електроприводної техніки, обробних матеріалів та СУ приводами, у тому числі за допомогою застосування штучних нейронних мереж.

Виконаємо синтез системи управління приводом головного руху верстата в математичному середовищі MATLAB/Simulink з використанням нейроконтролера, що дозволяє прогнозувати поведінку об'єкта — NN Predictive Controller. Такий контролер базується на попередньо ідентифікованій нейронній моделі електропривода, яка у реальному часі формує прогноз майбутніх значень швидкості та електромагнітного моменту на заданому горизонті прогнозування. На основі отриманих передбачених станів здійснюється оптимізація керуючої дії з урахуванням обмежень на струм, момент та швидкість, що забезпечує високу точність регулювання при змінних навантаженнях і наявності нелінійностей у механічній частині.

Нейроконтролер використовує багатошаровий перцептрон з нелінійними активаційними функціями, навчений на вибірці вхідно-вихідних сигналів привода, що дає змогу відтворювати реальну динаміку системи з урахуванням тертя, інерційних ефектів, люфтів та змінних характеристик процесу різання. Наявність внутрішнього оптимізаційного модуля дозволяє враховувати комплексні критерії якості — мінімізацію помилки відстеження, згладжування керуючого впливу та забезпечення стійкості при некерованих збуреннях. Такий підхід підвищує робостність системи, забезпечує скорочення перехідних процесів, зменшення перерегулювання та стабільне підтримання обертів шпинделя в усьому діапазоні технологічних режимів.

В таблиці 3.1 приведені параметри електродвигуна приводу та заготовки.

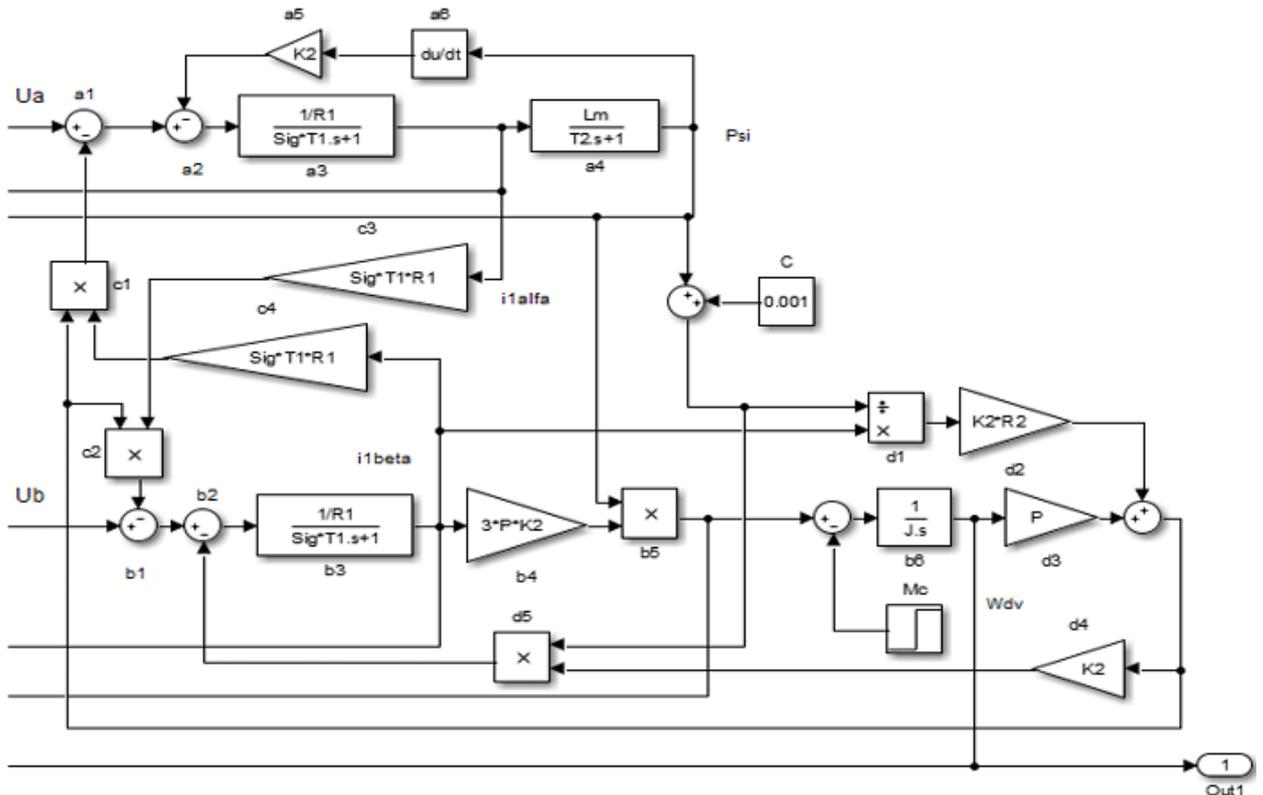
Таблиця 3.1 – Параметри досліджуваного АД системи керування

Найменування/позначення/од. вим.	Позначення	Значення
Тип електродвигуна	<i>АДЧР132М4</i>	—
Швидкість обертання поля статора, об/хв	<i>n₁</i>	1500
Номінальна кількість обертів ротора, об/хв	<i>n₂</i>	1460
Міжфазне значення напруги, В	<i>U_s</i>	380
Номінальне значення напруги, В	<i>U_{1н}</i>	220
Кратність пускового моменту	<i>m_k</i>	2,2
Здатність перевантаження по струму	<i>i_k</i>	7,3
Коефіцієнт корисної дії	<i>η</i>	0,88
Коефіцієнт потужності	<i>cosφ</i>	0,85
Кількість пар полюсів двигуна	<i>p</i>	2
Кількість фаз статора	<i>m</i>	3
Частота напруги мережі, Гц	<i>f</i>	50
Номінальна потужність, Вт	<i>P</i>	11000
Момент інерції ротора двигуна, кг/м ²	<i>J_{дв}</i>	0,045
Марка сталі деталі, яка обробляється	—	40х
Момент інерції деталі, кг/м ²	<i>J_{мех}</i>	0,023
Загальний момент інерції, кг/м ²	<i>J_Σ</i>	0,068

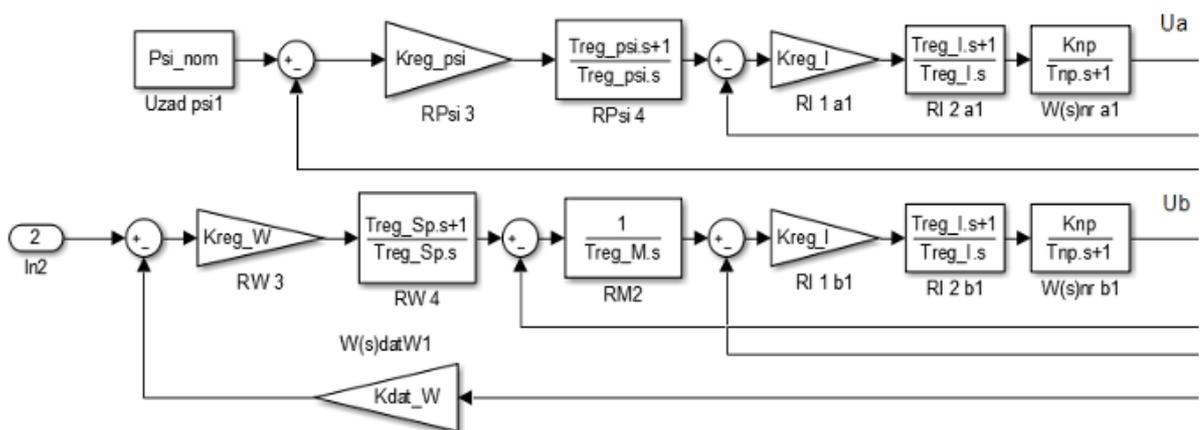
У структурному плані система містить модель електропривода, нейромережвий прогноуючий модуль, блок оптимізації керуючих сигналів, а також контури зворотного зв'язку за швидкістю та струмом. Інтеграція контролера у середовище Simulink дозволяє виконати покрокове моделювання, оцінити ефективність алгоритму при різних типах навантажень, перевірити стійкість при змінах параметрів та провести порівняльний аналіз з класичними ПД-регуляторами. Завдяки цьому забезпечується можливість визначення оптимальних параметрів нейроконтролера та обґрунтування доцільності його застосування в системах

головного приводу металорізальних верстатів. Об'єкт дослідження є приводом верстата 16A20Ф3. На шпинделі верстата встановлено заготовку зі сталі 40Х.

На рисунку 3.1 приведена структурна схема векторної системи управління з орієнтацією вектора потокочзчеплення ротора.



a



б

Рисунок 3.1 – Система векторного керування електроприводом:

а – структурна схема електродвигуна;

б – регулятори

На рисунку 3.1: K_{reg_I} і T_{reg_I} – коефіцієнт посилення та постійна часу K_c ; K_{pr} і T_{pr} – коефіцієнт посилення та постійна часу ПЧ; T_{reg_M} – постійна часу КМ; K_{reg_W} і T_{reg_W} – коефіцієнт посилення та постійна часу РШ; K_{reg_psi} і T_{reg_psi} – коефіцієнт посилення та постійна часу КПт; K_1, K_2 – коефіцієнти; T_2 – постійна часу намагнічувального контуру; L_m – індуктивність намагнічуючого контуру; p – кількість пар полюсов; $\text{Sig} \cdot T_1$ – постійна часу електричної машини; Psi_{nom} – номінальне потокозчеплення; R_1 – активний опір ротора; J – момент інерції.

Система векторного управління, що розглядається, має в своїй структурі регулятори струму, моменту, потокозчеплення і швидкості. Система виконується з допомогою принципу підлеглого регулювання.

Внутрішніми контурами є контури струму та моменту. Внутрішні контури струму та моменту налаштовуються на стандартне налаштування оптимум по модулю. Регулятори струму виконуються у вигляді ПІ-регуляторів, регулятор моменту у вигляді І-регулятора. Зовнішніми контурами є контури потокозчеплення та швидкості. Зовнішні контури швидкості та потокозчеплення налаштовуються на стандартне налаштування на симетричний оптимум. Регулятори потокозчеплення та швидкості виконуються у вигляді ПІ-регуляторів. Загальний момент інерції враховує моменти інерції двигуна та заготівлі, наведеної до двигуна.

На рисунку 3.2 приведені структурні схеми векторного управління електроприводом основного руху верстата з нейрорегулятором NN Predictive Controller та без нього.

У субблоках АД1 та АД2 реалізовані ідентичні векторні системи керування приводами. Ступінчасте завдання на обидві системи управління формуються у блоці W_{zad} .

Щоб налаштувати нейроконтроллер, необхідно активувати блок NN Predictive Controller, ввести необхідні параметри, після чого завершити налаштування підтвердивши введені дані натисканням кнопки ОК.

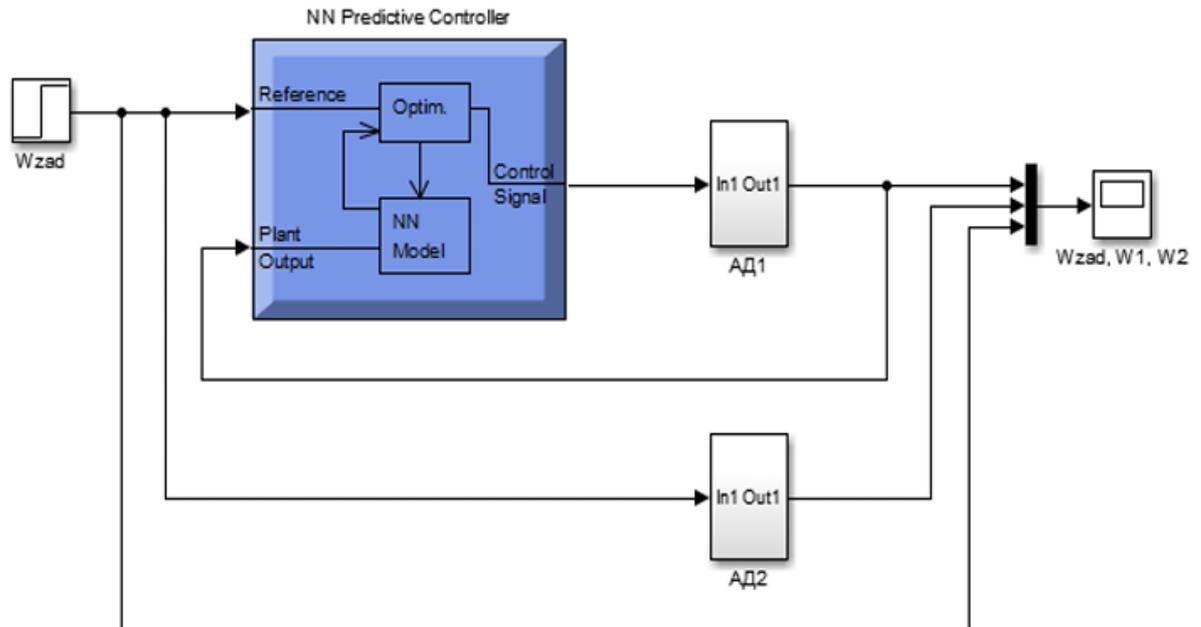


Рисунок 3.2 – Структурна схема векторного управління приводом верстата з нейрорегулятором та без нього

Оптимальні параметри досліджуваного об'єкта та нейроконтролера, які використовуються при налаштуванні нейроконтролера з прогнозом, приведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Оптимальні параметри досліджуваного об'єкта та нейроконтролера

Параметр	Позначення	Значення
Кількість циклів навчання	—	200
Функція навчання	—	trainlm
Кількість тимчасових інтервалів для оцінювання потужності управління	Nu	2
Кількість тимчасових інтервалів при передбаченні	N2	2
Коефіцієнт ваги	p	0,05
Поріг одномірного пошуку показника якості	a	0,001
Алгоритм пошуку	—	csrchbac
Кількість ітерацій алгоритму оптимізації за 1 такт	γ	2
Кількість елементів запізнення на вході та виході моделі	Ni, Nj	2; 4
Кількість нейронів в прихованому прошарку	S	14
Часовий інтервал збору даних	Δt	0,0015
Діапазон вхідних сигналів керованого об'єкта	—	1; -1
Довжина навчальної вибірки	Nb	1000
Інтервали ідентифікації об'єкта	tmax, tmin	0.015; 0.0015

Як показало дослідження, наведені вище параметри нейроконтролера: ρ , α , γ не мають значного впливу на динаміку об'єкта.

Параметр інтервалу збору даних Δt пов'язаний з параметром довжини навчальної вибірки N_b значно впливає на якість перехідних процесів приводу верстата. Параметр Δt визначає тривалість сигналу, що управляє, на виході нейроконтролера. Інтервал збору даних для приводу, що розглядається верстата слід вибирати на порядок менше часу перехідного процесу аналізованого об'єкта при ступінчастому впливі, тобто $t = 0,0015$ с. Якщо інтервал збору даних менший за перехідний процес досліджуваного електроприводу верстата більш ніж у 10 разів, збільшується довжина навчальної вибірки для якісного навчання нейронної моделі об'єкта.

Обмеження вихідного сигналу нейроконтролера нормоване та встановлюється на рівні 1; -1.

Мінімальний інтервал ідентифікації вибирається значно менше часу перехідного процесу досліджуваного об'єкта. Максимальний інтервал відповідає часу реакції приводу верстата на одиничний ступінчастий вплив.

Кількість нейронів внутрішнього шару S визначає можливості нейроконтролера виконувати покладені на нього завдання.

Елементи запізнення нейромережевої моделі об'єкта N_i , N_j визначають час та характер перехідних процесів керованого об'єкта.

При синтезі систем управління з нейроконтролером NN Predictive Controller і без нього використовувалися дані електродвигуна та механізму, а також параметри нейроконтролера, наведені у таблицях 3.1 та 3.2.

Графіки перехідних процесів систем векторного управління приводом основного руху верстата з нейроконтролером NN Predictive Controller представлені на малюнку 3.3.

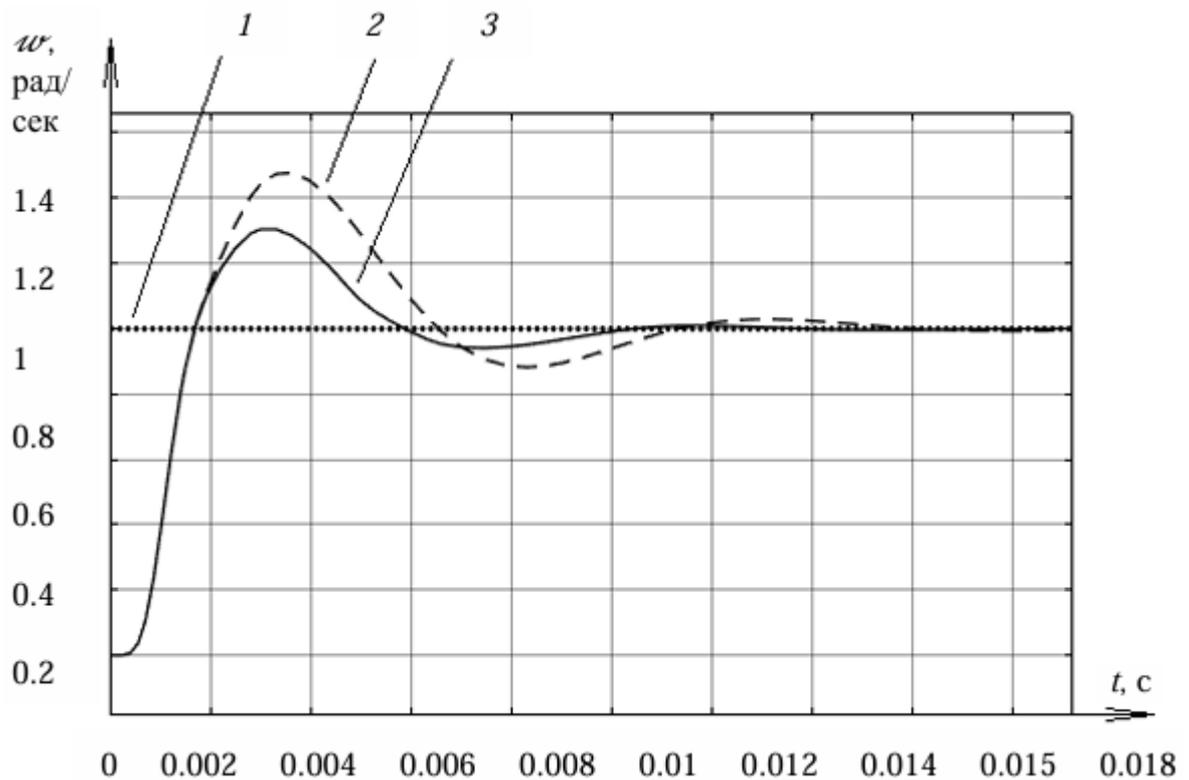


Рисунок 3.3 – Графіки перехідних процесів систем векторного управління з нейроконтролером та без нього:

1 - завдання; 2 - АД; 3 - АД з НМ

Показники якості перехідних процесів систем управління з нейрорегулятором NN Predictive Controller і без нього вихідної кутової швидкості наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Порівняльні результати моделювання

Показник якості	Позначення	Різнovid СУ	
		АД	АД з НМ
Час перехідного процесу	t_p	0,0144	0,0095
Перерегулювання, %	σ	48	30
Час встановлення (першого узгодження), с	t_n	0,0017	0,0017
Час досягнення першого мінімуму, с	t_m	0,0035	0,0030

Як видно з таблиці 3.3, система векторного керування приводом основного руху верстата з нейроконтролером, що дозволяє передбачати поведінку об'єкта, перевершує класичну систему керування АД з ПІ-регулятором швидкості за часом перехідного процесу, перерегулювання та

часу досягнення першого максимуму. Недоліком нейроконтролера з прогнозом є тривалий час навчання.

3.2 Синтез системи управління швидкістю приводу поздовжньої подачі з використанням нейроконтролера

Виконаємо синтез системи управління швидкістю приводу поздовжньої подачі верстата.

Привід поздовжньої подачі є нелінійною двомасовою системою, в якій до першої маси відноситься електродвигун, муфта і гвинтова передача. До другої маси належить супортна група верстата. Математичне опис приводу поздовжньої подачі з пружними зв'язками було приведено ранніше в 2 розділі, в якості системи рівнянь 2.1.

У таблиці 3.4 подано вихідні дані, які використовувалися при синтезі системи керування приводом поздовжньої подачі.

В якості двигуна поздовжньої подачі було взято двигун типу АДЧР112МА8 потужністю $P=2,2$ кВт і кутовою номінальною швидкістю $\omega_2=74,3$ рад/с.

Напівпровідниковий перетворювач виконується у вигляді аперіодичного ланки першого порядку, у якого $K_{пр} = 220$ і $T_{пр} = 0.0001$ с.

Регулятор струму (РС) виконаний у вигляді ПІ-регулятора, налаштованого на оптимум за модулем, коефіцієнт підсилення та постійна часу РС: $K_{рс} = 0,82$, $T_{рс} = 0,0167$ с. Регулятор швидкості (РШ) виконаний у вигляді ПІ-регулятора, налаштованого на симетричний оптимум, коефіцієнт підсилення та постійна часу РШ: $K_{рш} = 4,84$, $T_{рш} = 0,0008$ с.

При синтезі системи управління приводом поздовжньої подачі використовувався нейроконтролер із еталонною моделлю Model Reference Controller (MRC).

Таблиця 3.4 – Вихідні дані для синтезу системи керування приводом поздовжньої подачі

Найменування/позначення/од. вим.	Значення
Діаметр заготовки до обробки, D , мм	68
Діаметр заготовки після обробки, d , мм	62
Довжина заготовки, L , мм	500
Модуль нормальної пружності, E , МПа	$2,1 \cdot 10^5$
Швидкість різання, v , м/хв	67
Швидкість повздовжньої подачі, S , мм/об	0,8
Глибина різання, h , мм	3
Швидкість обертання шпинделя, N , об/хв	315
Кутова швидкість обертання приводу поздовжньої подачі, ω , рад/с	9,43
Показники степені режимів подач x , y , n	1; 0.5; -0.4
Коефіцієнт, C_p	339
Коефіцієнт, K_p	1.0545
Коефіцієнт жорсткості, C_1 , Н·м ²	780
Коефіцієнт демпфування, b_1 , Н·м·с/рад	0,536
Коефіцієнт, K_{pm}	0.445
Коефіцієнт перерахунку, V (мм/с) в S (мм/об)	0,19
Момент інерції двигателя, J , кг·м ²	0,024
Момент інерції другої маси, J , кг·м ²	0,0194
Число пар полюсів, R_p	2
Постійна часу ПЧ, $T_{пр}$	0,0001
Коефіцієнт підчлення ПЧ, $K_{пр}$	220
Постійна часу двигуна, $Sig \cdot T_1$	0,0167
Опір двиуна R_1 , Ом	2,1344
Коефіцієнт K_2	0,9192
Постійна часу РС, $T_{рс}$	0,0167
Коефіцієнт підчлення РС, $K_{рс}$	0,82
Постійна часу РШ, $T_{рш}$	0,0016
Коефіцієнт підчлення РШ, $K_{рш}$	4,84

Вікно налаштування параметрів моделі об'єкта Plant Identification, що знаходиться в нейроконтролері, включало наступні параметри, представлені в таблиці 3.5

Таблиця 3.5 – Параметри моделі об'єкту

Параметр	Позначення	Значення
Навчальна функція	—	trainlm
Кількість циклів навчання	—	300
Інтервали ідентифікації об'єкту	tmax, tmin	0.5; 0.01
Діапазон вхідних сигналів	—	1;0
Довжина навчальної вибірки	N _v	15000
Кількість елементів запізнювання	N _i , N _j	2;2
Часовий інтервал збору даних	Δt	0,01
Кількість нейронів в прихованому прошарку	S	12

В якості еталонної моделі у цій роботі використовувалося аперіодична ланка першого порядку з коефіцієнтом посилення, рівним одиниці та постійної часу, що дорівнює 0,02. Еталонна ланка вибирається з урахуванням бажаного перехідного процесу системи керування приводом поздовжньої подачі верстата при керуючих та впливах, що обурюють.

Параметри нейрорегулятора, що знаходиться в нейроконтролері Model Reference Controller, які використовуються при моделюванні, представлені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Параметри налаштувань нейрорегулятора

Параметр	Позначення	Значення
Кількість циклів навчання	—	15
Інтервали ідентифікації об'єкту	tmax, tmin	0.5; 0.01
Діапазон вхідних сигналів	—	1;0
Довжина навчальної вибірки	N _v	15000
Кількість елементів запізнення на вході та виході контролера та моделі об'єкта	N _i , N _j	4;2;2
Часовий інтервал збору даних	Δt	0,01
Кількість нейронів в прихованому прошарку	S	14

На рисунку 3.4 приведена структурна схема розрахунку моменту опору та осьового зусилля різання приводу поздовжньої подачі.

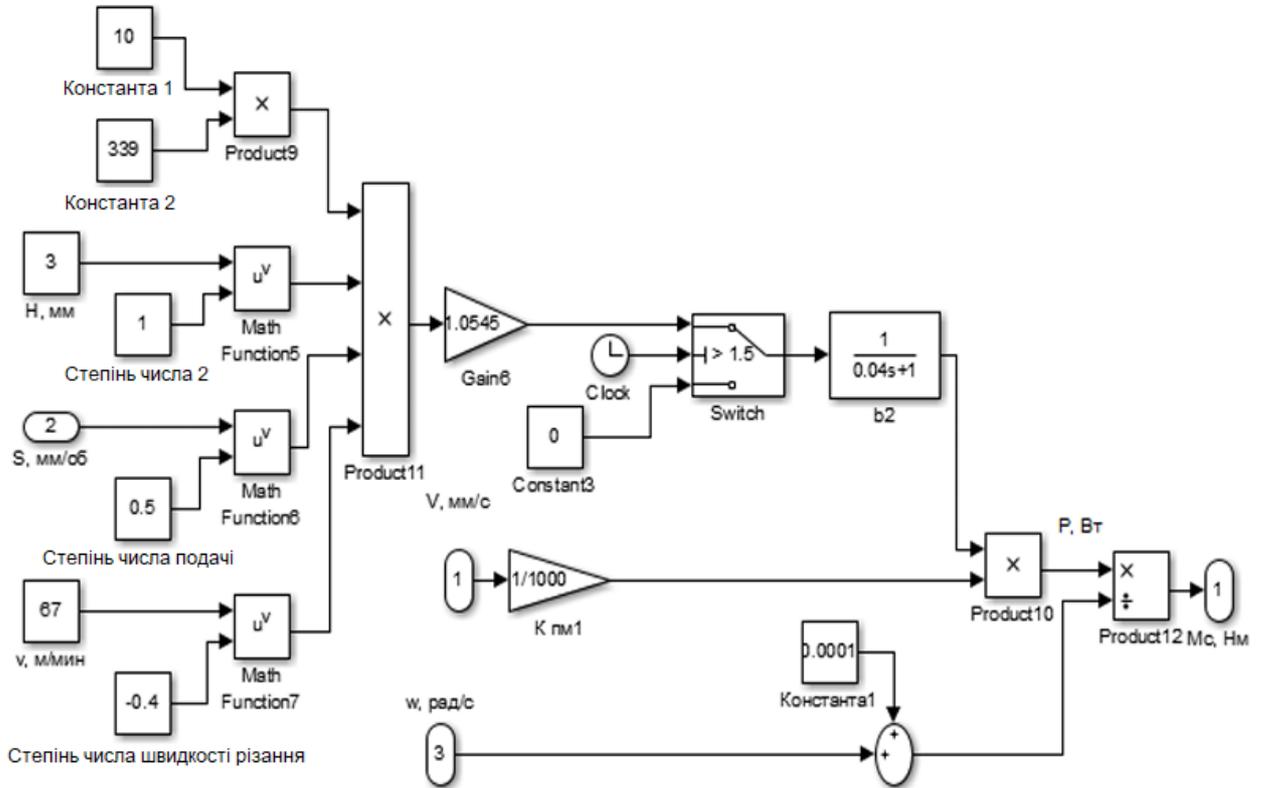


Рисунок 3.4 – Структурна схема розрахунку моменту опору та осьового зусилля різання

На рисунку 3.5 приведена структурна схема системи керування приводом поздовжньої подачі з нейроконтролером.

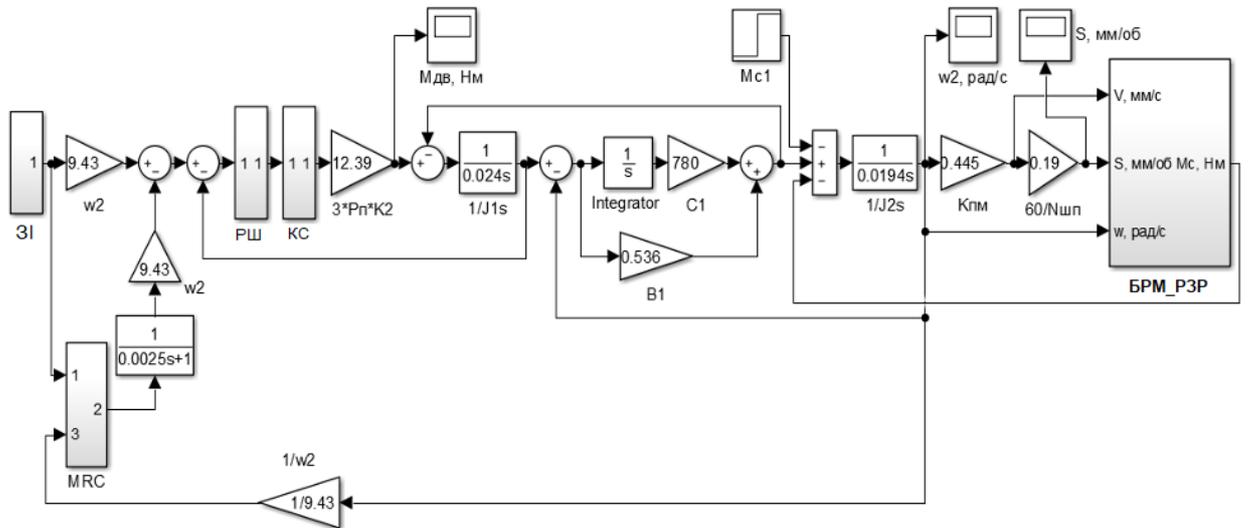


Рисунок 3.5 – Система керування приводом поздовжньої подачі

В блоці розрахунку моменту опору та радіального зусилля різання (БРМ_РЗР) реалізовано структурну схему розрахунку моменту опору та радіальної сили різання, приведена на рисунку 3.4. Контур струму (КС) являє собою послідовно включені ПІ-регулятор струму, а також перетворювач частоти та передатну функцію двигуна, виконані у вигляді двох послідовно включених аперіодичних ланок першого порядку.

Передавальний механізм приводу поперечної подачі, виконаний у вигляді кулько-гвинтової передачі, враховується коефіцієнтом $K_{пм}$.

На виході нейроконтролера МРС встановлений фільтр у вигляді аперіодичної ланки першого порядку з коефіцієнтом підсилення та постійною часу: $KФ = 1$, $Tрш = 0,0025$ с. У системі управління фільтр застосовується для згладжування вихідного сигналу нейроконтролера, що дозволяє зменшити пульсації моменту електродвигуна.

На рисунку 3.6 приведені графіки перехідних характеристик структурної схеми системи управління приводом поздовжньої подачі по моменту електродвигуна $M_{дв}$ (рис.3.6, а), по кутовій швидкості другої маси 2 (рис.3.6, б), швидкості поздовжньої подачі S (рис.3.6, в), і по осьовому зусиллю різання P_x (рис.3.6, г).

Завдання на кутову швидкість електроприводу подається через лінійний задатчик інтенсивності (ЗІ), що обмежує час розгону приводу, щоб уникнути виникнення неприпустимо великих динамічних навантажень на привід. У блоці РШ реалізовано ПІ-регулятор швидкості. У блоці контуру струму (КС) знаходиться регулятор струму, перетворювач частоти, двигун.

З отриманих перехідних процесів можна зробити висновок, що система управління відпрацьовує все управляючі і обурюючі впливу. Момент двигуна при дії не перевищує допустимих значень.

Система стабілізації сумарного зусилля різання складається з трьох електроприводів верстата: головного руху, поздовжньої та поперечної подач.

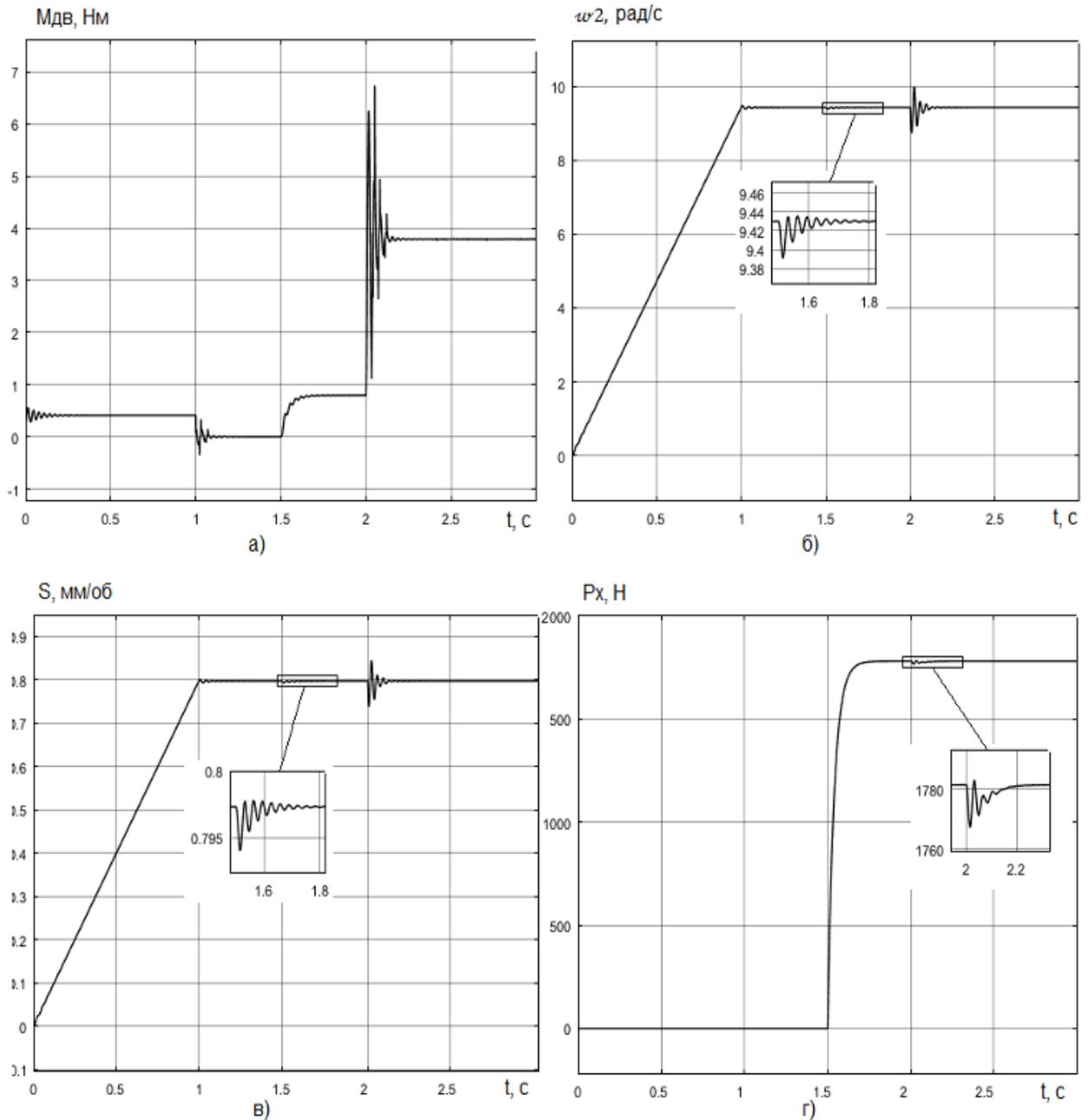


Рисунок 3.6 – Графіки перехідних характеристик структурної схеми системи управління приводом поздовжньої подачі: а) на момент електродвигуна Мдв; б) за кутовою швидкістю другої маси, ω_2 ; в) за швидкістю поздовжньої подачі, S; г) по осьовому зусиллю різання P_x

Структурна схема стабілізації сумарного зусилля різання, побудована в математичному середовищі Matlab and Simulink, що включає привод головного руху з урахуванням розтягування ремінної передачі і

нейроконтролером з еталонною моделлю, привод поперечної подачі з урахуванням вигину заготовки, а також привод поздовжньої подачі з нейроконтролером приведена на рисунку 3.7.

Графіки перехідних процесів систем стабілізації зусилля різання при керуючих і збурюючих впливах приведені на рисунку 3.8.

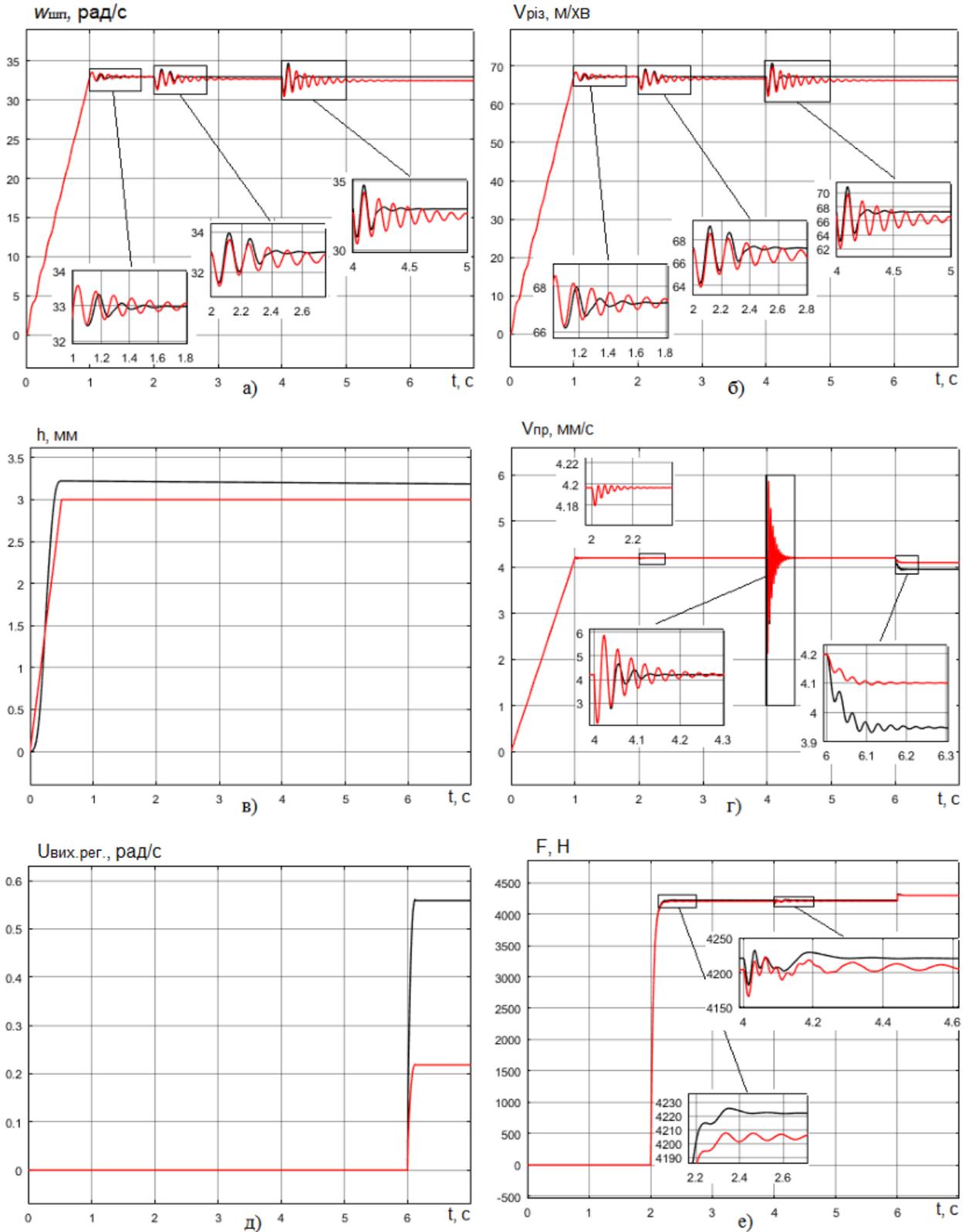


Рисунок 3.8 – Графіки перехідних процесів систем стабілізації зусилля різання

На рисунку 3.8: чорною лінією представлені графіки перехідних процесів структурної схеми, приведеної на рисунку 3.7; червоною лінією

представлені графіки перехідних процесів структурної схеми, приведеної на рисунку 3.7.

На рисунках 3.8, а и 3.8, б приведені графіки перехідних процесів з кутової швидкості шпинделя та лінійної швидкості різання. Час розгону приводу до встановленого значення швидкості $\omega=33$ рад/с або $V_{різ}=67,2$ м/хв при пуску електродвигуна за завданням лінійного задатчика інтенсивності становить 1 с. Фактично електропривод головного руху з нейрорегулятором і врахуванням розтягування ремінної передачі виходить зону режиму, що встановився, по кутовій швидкості шпинделя і лінійної швидкості різання з точністю 0,5% за 0,28 с. Електропривод головного руху без нейроконтролера та обліку розтягування ремінної передачі виходить зону режиму, що встановився, з точністю 0,5 % за 0,49 с. Тут і далі як час перехідного процесу приймається час, що дорівнює входженню в 0,5% зону режиму, що встановився. У момент часу, що дорівнює 2 с починається процес обробки заготовки. У приводах головного руху спостерігається коливальний процес. Час перехідного процесу з кутової швидкості шпинделя та лінійної швидкості різання приводу нейрорегулятором та врахуванням розтягування ремінної передачі становить 0,36 с. Час перехідного процесу приводу без нейроконтролера та обліку розтягування ремінної передачі становить 0,83 с, статична помилка по кутовій швидкості становить $\Delta\omega=0.3$ рад/с, статична помилка по лінійній швидкості різання складає $\Delta V_{різ}=0.6$ м/хв. На 4 з подано обурюючу дію ступінчастого характеру на всі приводи одночасно у вигляді опору рівного $M_c=20$ Нм. Час перехідного процесу приводу нейрорегулятором та врахуванням розтягування ремінної передачі становить 0,22 с. Час перехідного процесу приводу без нейроконтролера та обліку розтягування ремінної передачі становить 1 с, а статична помилка за швидкістю становить $\Delta\omega=0,54$ рад/с, за лінійною швидкістю різання помилка складає $\Delta V_{різ}=1.1$ м/хв.

На рисунку 3.8, в приведені графіки перехідних процесів по глибині різання приводів поперечної подачі з врахуванням та без врахування вигину

заготовки. У приводі без урахування вигину заготовки помилка по діаметру заготовки на початку обробки, коли різець знаходиться в протилежному кінці від шпинделя і не закріплений становитиме $\Delta D=0,44$ мм. В приводі із врахуванням вигину заготовки помилка по діаметру заготовки буде відсутня, оскільки завдання на глибину різання формується виходячи з обліку матеріалу, довжини та параметрів різання. Спочатку завдання на глибину різання становить обох систем управління становить $h = 3$ мм. У приводі з урахуванням вигину внаслідок добавки до завдання підсумкове завдання становить $h = 3,22$ мм на початку процесу різання, а потім зменшується у процесі переміщення різця вздовж заготовки до шпинделя.

На рисунку 3.8, г приведені графіки перехідних процесів лінійної швидкості переміщення різця приводів поздовжньої подачі з нейрорегулятором і без нього. Завдання лінійну швидкість поздовжнього переміщення різця становить $V_{пр}=4,2$ мм/с. Різець виходить лінійну швидкість за завданням за 1 с. На 1 с і на 2 с спостерігаються незначні коливання швидкості внаслідок пружних властивостей двомасової системи приводу, а також внаслідок початку процесу обробки заготівлі (на 2 с). На 4 с подано збурювальну дію, внаслідок чого спостерігається коливальний процес у приводах з нейрорегулятором і без нього. Час перехідного процесу у приводі з нейрорегулятором становить 0,15 с. Час перехідного процесу у приводі без нейроконтролера становить 0,35 с. На 6 секунді подано ступінчастий вплив на сумарну силу різання, що склало $F=100$ Н. В результаті зусилля різання перевищило допустиме, яке встановлено в блоці 1 нелінійного елемента аналізованих систем управління (див. рис. 3.7). Уставка обмеження сумарного зусилля різання становить $F=4300$ Н.

Як видно з графіків, приведених на рисунку 3.8, г лінійна швидкість приводів зменшилася для того, щоб зменшити сумарну силу різання.

На рисунку 3.8, д приведені вихідні сигнали регуляторів зусилля. Як видно з графіків, на 6 секунді у приводі з нейрорегулятором з'являється сигнал зменшення швидкості поздовжнього переміщення різця на $w=0,56$

рад/с, у приводі без нейроконтролера завдання зменшення швидкості становить $\omega=0,22$ рад/с.

На рисунку 3.8, є приведені графіки перехідних процесів сумарного зусилля різання структурних схем, приведених на рисунку 3.7. Сумарне зусилля різання виникає, коли різець стикається з заготівлею, на 2 с і становить $F=4221$ Н для структурної схеми, що включає привід головного руху з урахуванням розтягування ремінної передачі і нейрорегулятором, привід поперечної подачі з урахуванням вигину заготовки, а також привід поздовжньої подачі з нейрорегулятором. Для структурної схеми, що включає привід головного руху без урахування розтягування ремінної передачі і нейроконтролера, привід поперечної подачі без урахування вигину заготовки, а також привід поздовжньої подачі без нейроконтролера сумарне зусилля різання становить $F=4205$ Н. Сумарне зусилля різання більше у системі стабілізації зусилля різання, у якій враховано вигин заготовки. На 4 з спостерігаються коливання зусилля, що виникають внаслідок того, що на всі три приводи подано збурюючу дію ступінчастого характеру. На 6 секунді подано ступінчастий вплив, що обурює, у вигляді зміни сумарного зусилля різання на 100 Нм. На виході нелінійного елемента (блок 1 на рисунку 3.7) з'являється сигнал корекції, що зменшує завдання на привід поздовжньої подачі так, щоб сумарне зусилля різання зменшилося до допустимого значення.

3.3 Висновки:

1. Для керування електроприводом головного руху верстата може ефективно використовуватися нейроконтролер із передбаченням керуючого сигналу.

2. Розроблена система управління електроприводом головного руху металорізального верстата з нейроконтролером у своїй структурі дозволяє покращити динамічні характеристики верстата при розгоні, порівняно з СУ без нього. З результатів моделювання в математичному середовищі Matlab Simulink видно, що в СУ з NN Predictive Controller час перехідного процесу за швидкістю зменшився на 34%, а перерегулювання на 18% порівняно з СУ з класичним ПІ-регулятором швидкості.

3. Розроблена система управління приводом поздовжньої подачі верстата з нейроконтролером дозволяє зменшити пружні коливання в приводі при впливах, що обурюють. Зменшення коливань відбувається за рахунок нейроконтролера з еталонною моделлю Model Reference Controller (MRC), на виході якого формуються дії імпульсного характеру, що дозволяють покращити динамічну якість приводу поздовжньої подачі.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Визначення величини витрат запропонованого варіанту

Сучасний автоматизований електропривод є складною системою автоматичного керування, яка не лише генерує механічну енергію, але й здійснює збір даних про параметри технологічного процесу, їх обробку та формування керуючих сигналів для вихідного пристрою, що забезпечує належний перебіг процесу [1]. Будь-яку систему керування електроприводом (СКЕП) можна розглядати як систему, що приймає і обробляє сигнали. Виділяють три основні типи систем керування: замкнені зі зворотним зв'язком, розімкнені та комбіновані, які поєднують елементи обох попередніх типів [2].

У розімкнених системах відсутні вимірювання та контроль вихідного сигналу або параметра. У таких системах сигнал керування визначається вихідною величиною [3]. Вони мають лише один канал для завдання необхідного регульованого параметра. СКЕП цього типу відзначаються низькою точністю регулювання та переважно застосовуються в системах керування пуском і гальмуванням двигунів або в системах регулювання швидкості в обмеженому діапазоні [4, 5, 6].

Системи векторного керування знайшли широке поширення в промисловості, проте не завжди можливо застосувати принцип їхньої побудови в електроприводах. Наприклад, не можна використовувати векторне управління при паралельному підключенні двох і більше двигунів до одного частотного перетворювача. Також не застосовують векторне керування при керуванні занурювальними насосами, що здійснюють механізований видобуток нафти, оскільки між частотним перетворювачем та асинхронним двигуном встановлений підвищуючий трансформатор. Крім того, системи векторного управління мають ряд недоліків: велика складність обчислювальних алгоритмів, які застосовуються при технічній реалізації,

необхідність введення параметрів електродвигуна та наявність пульсацій швидкості при незмінному моменті навантаження [8].

У зв'язку з цим, у сучасних частотних перетворювачах є можливість застосування так званого скалярного управління з різними законами зміни амплітуди (діючої напруги) функції частоти. Як правило, це розімкнуті системи з невеликим діапазоном регулювання швидкості.

В якості базового варіанту системи електропривода досліджуваного механізму приймається ПЧ-АД, яка розглядається як така, що підлягає модернізації.

У зв'язку з цим, у сучасних частотних перетворювачах є можливість застосування так званого скалярного управління з різними законами зміни амплітуди (діючої напруги) функції частоти. Як правило, це розімкнуті системи з невеликим діапазоном регулювання швидкості.

Однак для отримання великого діапазону регулювання застосовують і замкнуті системи, наприклад, скалярного частотно-струмового управління, які також відрізняються великою складністю технічної реалізації [12, 13-14]. Тому набули розвитку та інші принципи побудови електроприводів стабілізації швидкості асинхронного двигуна зі скалярним керуванням.

Дослідження в роботі виконувались на основі дослідного зразка системи електропривода, побудованого на основі асинхронного двигуна з КЗ ротором. Відповідно економічний розрахунок пропонується виконати на основі цієї ж досліджуваної системи електроприводу в порівнянні із її морально та фізично застарілим аналогом – релейноконтакторної схеми.

В таблиці 5.1 приведено розрахунок капітальних вкладень на модернізацію електропривода степенів рухомості промислового робота.

Таблиця 4.1 – Капітальні витрати на електроустаткування базового та нового варіантів

Найменування електрообладнання	Кошторисна вартість варіанту	
	Базова СК ПЧ-АД	Нова ПЧ-АД з NN Predictive Controller
Вартість двигуна АДЧР132М4 (АИР 132 М4) P=11000 Вт)	14028	14028
Вартість системи керування	48000	48000
Енкодер (позиційний/абсолютний)	5200	5200
Додаткові датчики/захисти (струмові трансформатори, фільтри, реле, ПЗВ тощо)	7400	7400
Щит/шкаф монтаж + кабелі/клеми/компоненти панелі	17300	19200
Налагодження / технічна інтеграція (налаштування ПД, параметризація V/F або ФОС, тестування під навантаженням)	15600	18300
Контролер на базі MCU / DSP (наприклад TI C2000) + спеціалізована плата розробки	—	14480
Оптимізація моделі (pruning, quantization), інтеграція в C/C++/ONNX runtime/real-time middleware.	—	7240
Спеціалізований інструментарій	5750	5750
Разом капіталовкладення:	113278	139598
Транспортні витрати 10%	11327,8	13959,8
Всього ціна обладнання	124605,8	153557,8
Монтажні роботи 13%	16198,8	19962,5
Капітальні витрати	140804,6	173520,3

Отже, $K_6 = 140804,6$ грн.; $K_H = 173520,3$ грн.

4.2 Розрахунок експлуатаційних витрат

Експлуатаційні витрати включають витрати на забезпечення нормального функціонування певного технічного рішення в період його експлуатації в розрахунку на рік .

Експлуатаційні витрати включають такі складові:

1. Амортизаційні відрахування E_a .
2. Заробітна плата $E_{зп}$ обслуговуючого персоналу (основна, додаткова, нарахування на заробітну плату).
3. Витрати на силову електроенергію E_e .
4. Витрати на поточний ремонт $E_{пр}$.
5. Інші витрати $E_{ін}$.

Вираз, який включає в себе усі вище перераховані складові експлуатаційних витрат, має вигляд:

$$З = E_a + E_{зп} + E_e + E_{пр} + E_{ін}. \quad (4.1)$$

4.2.1 Розрахунок амортизаційних відрахувань

Річні амортизаційні відрахування для базового та нового варіантів становлять (норма амортизації становить 10 % в рік):

$$E_{аб} = 140804,6 \text{ грн.} \cdot 0,10 = 14080,5 \text{ грн.};$$

$$E_{ан} = 173520,3 \text{ грн.} \cdot 0,10 = 17352,0 \text{ грн.}$$

4.2.2 Розрахунок заробітної плати обслуговуючого персоналу

Згідно ПУЕ обслуговувати установки до 1000 В може робітник, у якого розряд не нижче четвертого, група допуску не нижча третьої групи по електробезпеці.

Таблиця 4.1 – Тарифна сітка погодинників

Тарифні розряди	I	II	III	IV	V	VI
Тарифні коефіцієнти	1	1,5	1,8	2,03	2,33	2,7

Витрати на заробітну плату обслуговуючого персоналу розраховуємо за формулою:

$$E_з = E_{з0} + E_{зд}, \quad (4.2)$$

де $E_{з0}$ – основна заробітна плата по тарифу;

$E_{зд}$ – додаткова заробітна плата;

$$E_{зо} = N \cdot T_1 \cdot K \cdot \Phi_{еф} \cdot K_c \cdot \beta, \quad (4.3)$$

де N – кількість робітників, що обслуговують систему електропривода металорізального верстату ($N = 1$ чол.);

T_1 – погодинна тарифна ставка робітника 1-го розряду станом на 2025р. (45 грн./год);

K – тарифний коефіцієнт ($K_б = 2,03$, $K_н = 2,33$);

$\Phi_{еф}$ – ефективний фонд робочого часу за рік (приймаємо рівним 220 год.);

K_c – коефіцієнт співвідношень, встановлений Генеральною угодою між профспілками і урядом ($K_c = 1$);

β – частка часу, який витрачає робітник на обслуговування установки в загальному часі своєї роботи ($\beta = 1$ для базового варіанту, $\beta = 0,9$ для нового варіанту).

Розрахуємо $E_{зо}$ для базового та нового варіантів.

$$E_{зо б} = 1 \cdot 45 \cdot 2,03 \cdot 220 \cdot 1 \cdot 1 = 20097,0 \text{ (грн.)},$$

$$E_{зо н} = 1 \cdot 45 \cdot 2,33 \cdot 220 \cdot 1 \cdot 0,9 = 20760,3 \text{ (грн.)}.$$

Додаткова заробітна плата $E_{зд}$ (за професійну та майстерну діяльність) становить 10 % основної заробітної плати. $E_{зд}$ для базового та нового варіантів відповідно становить:

$$E_{зд б} = 20097,0 \cdot 0,10 = 2009,7 \text{ (грн.)},$$

$$E_{зд н} = 20760,3 \cdot 0,10 = 2076,0 \text{ (грн.)}.$$

Розрахунок нарахувань на заробітну плату для базового та нового варіантів зведемо в таблицю 4.2.

Таким чином в результаті виконання підстановки у вираз (5.2) маємо:

$$E_{з б} = 20097,0 + 2009,7 = 22106,7 \text{ (грн.)},$$

$$E_{з н} = 20760,3 + 2076,0 = 22836,3 \text{ (грн.)}$$

Таблиця 4.2 – Розрахунок нарахувань на заробітну плату

Показник	Базовий варіант	Новий варіант
Основна заробітна плата, $E_{зо}$, грн.	20097,0	20760,3
Додаткова заробітна плата, $E_{зд}$, грн.	2009,7	2076,0
ВСЬОГО з нарахуванням, грн.	22106,7	22836,3

4.2.3 Розрахунок витрат на силову електроенергію

Витрати на силову електроенергію знаходимо за формулою:

$$E_e = \frac{P}{\eta} \cdot V \cdot \Phi_{\text{еф}} \cdot K_{\text{вм}} \cdot K_3, \quad (4.4)$$

де V – вартість електроенергії. Ціна на універсальні послуги для небутових споживачів, електроустановки яких приєднані до електричних мереж згідно з класом напруги та групою електроспоживання (група А чи В), яка включає в себе вартість кВт год електричної енергії та вартості розподілу, з ПДВ складає приблизно 9,5 грн/кВт·год. ($\approx 7,08$ грн/кВт·год – вартість кВт/год; $\approx 2,42$ грн/кВт·год – вартість розподілу кВт/год з ПДВ).

P – встановлена потужність приводного двигуна (11 кВт);

η – ККД установки;

$\Phi_{\text{еф}}$ – ефективний фонд часу роботи в рік;

$K_{\text{вм}}$ – коефіцієнт ввімкнення (використання за часом);

K_3 – коефіцієнт завантаження (використання за потужністю).

Коефіцієнт корисної дії обчислено як добуток ККД двигуна і силового перетворювача. Для базового варіанту ККД складає 0,84, для нового варіанту ККД приймаємо рівним 0,9. Коефіцієнт ввімкнення приймаємо рівним 0,74 та 0,7 відповідно, а коефіцієнт завантаження для базового варіанту рівний 0,72, а для нового – 0,74.

Ефективний фонд робочого часу для двох варіантів при режимі роботи в 1 зміну протягом 90 % часу за рік становить:

$$\Phi_{\text{еф}} = 250 \text{ днів} \cdot 8 \text{ год.} \cdot 0,9 = 1800 \text{ (год.)}$$

Отже, з виразу (4.4) для базового та нового варіантів маємо:

$$E_{\text{ЕБ}} = \frac{P}{\eta} \cdot B \cdot \Phi_{\text{ЕФ}} \cdot k_B \cdot k_3 = \frac{11}{0,84} \cdot 9,5 \cdot 1800 \cdot 0,74 \cdot 0,72 = 119352,5 \text{ (грн.)}$$

$$E_{\text{Ен}} = \frac{P}{\eta} \cdot B \cdot \Phi_{\text{ЕФ}} \cdot k_B \cdot k_3 = \frac{11}{0,9} \cdot 9,5 \cdot 1800 \cdot 0,72 \cdot 0,74 = 111426,1 \text{ (грн.)}$$

4.2.4 Розрахунок витрат на поточний ремонт обладнання

Поточний ремонт електроустаткування здійснюється на місці встановлення з його відключенням і зупинкою силами змінного ремонтного персоналу.

Витрати на проведення ремонтних робіт включають витрати на комплектуючі і запасні частини та інші елементи, які підлягають заміні та витрати на оплату праці персоналу, який проводить ремонтні роботи. Для визначення витрат на оплату праці робітників-ремонтників необхідно розрахувати трудомісткість ремонтних робіт. Трудомісткість ремонтних робіт визначається згідно графіка планово-попереджувальних ремонтів, у якому зазначено тривалість міжремонтних періодів та трудомісткість кожного виду ремонту.

Графік планово-попереджувальних ремонтів для базового та нового варіантів наведено в таблицях 4.3 та 4.4.

Таблиця 4.3 – Графік ремонтів для базового варіанту

Найменування обладнання	Види ремонтів по місяцях												Трудо- місткість, люд-год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Система керування ПЧ	7			6			7			6		7	33
АД з КЗ		5			5			5			6		21
Кабельна мережа	5					5				5		6	21
Апарати ком-ії та захисту		10				10				11			31
Сенсори	5				6				5			2	18
Загальна трудомісткість												124	

Вважаємо, що ремонтні роботи проводить електромонтер п'ятого розряду для базового варіанту та шостого – для нового (система на базі новітнього обладнання потребує вищої кваліфікації працівника). Із врахуванням того, що нам відома трудомісткість робіт, (4.3) прийме вигляд:

$$E_{zo} = T_1 \cdot K \cdot \Phi_{\text{эф}}, \quad (4.5)$$

Таблиця 4.4 – Графік для нового варіанту

Найменування обладнання	Види ремонтів по місяцях												Трудо- місткість, люд-год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Система керування ПЧ	5			5			6			5		6	27
АД з КЗ		5			5			5			6		21
Контролер на базі MCU / DSP	3					3				3			9
Кабельна мережа	4					4					5		13
Апарати ком-ії та захисту		8				9				9			26
Сенсори		4				4				4			12
Загальна трудомісткість												108	

З попередніх розрахунків відомо, що $T_1 = 45$ грн./год, отже, маємо:

$$E_{\text{зо б}} = 45 \cdot 2,7 \cdot 124 = 15066,0 \text{ (грн.)},$$

$$E_{\text{зо н}} = 45 \cdot 2,33 \cdot 108 = 11323,8 \text{ (грн.)}.$$

Нарахування на заробітну плату (38 %):

$$E_{\text{зн б}} = 15066,0 \cdot 0,38 = 5725,1 \text{ (грн.)},$$

$$E_{\text{зн н}} = 11323,8 \cdot 0,38 = 4303,0 \text{ (грн.)}.$$

Всього витрати на заробітну плату для проведення ремонтних робіт становлять:

- для базового варіанту: $15066,0 + 5725,1 = 20791,1$ (грн.),
- для нового варіанту: $11323,8 + 4303,0 = 15626,8$ (грн.).

Витрати на матеріали, комплектуючі та запасні частини для поточного ремонту приймаємо рівними 15 % витрат на основну заробітну плату. Тобто, витрати на матеріали для ремонтів становлять:

- для базового варіанту: $20791,1 \cdot 0,15 = 3118,7$ (грн.);
- для нового варіанту: $15626,8 \cdot 0,15 = 2344,0$ (грн.).

Всього витрати на поточний ремонт обладнання становлять:

$$E_{\text{пр б}} = 20791,1 + 3118,7 = 23909,8 \text{ (грн.)},$$

$$E_{\text{пр н}} = 15626,8 + 2344,0 = 17970,8 \text{ (грн.)}.$$

4.2.5 Інші витрати

Розмір інших витрат приймаємо рівним 5% від загальної суми попередніх витрат. Тобто:

$$E_{\text{ін б}} = (1543,8 + 22106,7 + 2289,8 + 23909,8) \cdot 0,05 = 1132,5 \text{ (грн.)},$$

$$E_{\text{ін н}} = (2148,4 + 22836,3 + 2166 + 17970,8) \cdot 0,05 = 921 \text{ (грн.)}.$$

Розрахунок загальної суми експлуатаційних витрат за (4.1) наведемо у вигляді таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Експлуатаційні витрати

Найменування витрат	Базовий варіант	Новий варіант
Амортизаційні відрахування E_a , грн.	14080,5	17352
Заробітна плата $E_{зп}$ обслуговуючого персоналу, грн.	22106,7	22836,3
Витрати на електроенергію E_e , грн.	119352,5	111426,1
Витрати на поточний ремонт $E_{пр}$, грн.	23909,8	17970,8
Інші витрати $E_{ін}$, грн.	8972,475	8479,26
Всього експлуатаційні витрати Z, грн.	188 421,98	178 064,46

Оскільки ми розраховуємо ефективність нової системи після модернізації, то необхідно порівняти експлуатаційні витрати, використовуючи відносні показники.

Для порівняння експлуатаційних витрат розрахуємо показник відносної економії (зменшення) витрат:

$$\lambda_B = \frac{Z_B - Z_H}{Z_B} \cdot 100\%, \quad (4.6)$$

$$\lambda_B = \frac{188421,98 - 178064,46}{188421,98} = 5,5\%$$

З результатів наведених розрахунків робимо висновок, що модернізація системи електропривода є економічно доцільною. При цьому досягається економія річних експлуатаційних витрат у розмірі 5,5 %, що в об'ємах заагальної вартості капіталовкладень та вартості обладнання є досить вагомою сумою.

4.3 Визначення терміну окупності проекту

При оцінці ефективності використання нового варіанта визначаються і порівнюються також термін окупності додаткових капітальних затрат, рік:

$$T_{ок} = (K_H - K_б) / (Z_{еб} - Z_{ен}), \quad (4.7)$$

$$T_{ок} = (173520,3 - 140804,6) / (188421,98 - 178064,46) = 3,16 \text{ (року)}.$$

Отже, отримане значення терміну окупності свідчить про цілком виправдану економічну доцільність модернізації досліджуваної системи ЕП, підвищенню ефективності якої присвячені дослідження в даній роботі.

Висновки: Вдосконалення системи електропривода за рахунок переобладнання та модернізації системи електропривода є економічно доцільним та виправданим. При цьому досягається економія річних експлуатаційних витрат у розмірі 5,5 %. Це підтверджує правильність виконаних досліджень та економічну доцільність впровадження даного технічного рішення.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі магістерської кваліфікаційної роботи розглянуті питання з охорони праці, що були враховані під час розробки заходів з підвищення ефективності частотного асинхронного електропривода. На електротехнічний персонал, що буде здійснювати оперативне обслуговування системи управління електроприводом, впливають такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори [30-34].

Фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо); іонізація повітря. Хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (нетоксичний пил). Фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта

5.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць під час оперативного обслуговування електроустановок

Оперативне обслуговування електроустановок може здійснюватися як місцевими оперативними чи оперативно-ремонтними працівниками, за якими закріплена ця електроустановка, так і виїзними, за якими закріплена група електроустановок. Вид оперативного обслуговування, кількість оперативних працівників в зміну чи на електроустановці визначаються особою,

відповідальною за електрогосподарство, за узгодженням з керівництвом підприємства (організації) і зазначається в місцевих інструкціях. До оперативного обслуговування електроустановок допускаються працівники, які знають оперативні схеми, посадові і експлуатаційні інструкції, інструкції з охорони праці, особливості обладнання і пройшли навчання, дублювання та перевірку знань ПБЕ ЕЕС та ПТЕ ЕЕС.

Оперативні працівники, які обслуговують електроустановки одноосібно, та ті старші в зміні чи бригаді оперативні працівники, за якими закріплені електроустановки, повинні мати групу з електробезпеки IV в електроустановках напругою понад 1000 В і III – в електроустановках напругою до 1000 В. Оперативні працівники повинні працювати за графіком, затвердженим особою, відповідальною за електрогосподарство підприємства чи структурного підрозділу.

Оперативні працівники, які заступають на чергування, мають прийняти зміну від попереднього чергового, здати зміну наступному черговому у відповідності з графіком. Припинення чергування без здачі зміни забороняється. У виняткових випадках залишення робочого місця є припустимим з дозволу оперативного працівника вищої посади. Під час приймання зміни оперативний працівник зобов'язаний:

- ознайомитися зі схемою і станом та режимом роботи устаткування на своїй ділянці особистим оглядом в обсязі, встановленому інструкцією;
- одержати від чергового, який здає зміну, інформацію про стан устаткування, за яким необхідно вести ретельний нагляд для запобігання аваріям та неполадкам, а також про стан устаткування, що перебуває в ремонті або резерві;
- перевірити і прийняти інструмент, матеріали, ключі від приміщень, засоби захисту, оперативну документацію та інструкції;
- ознайомитися з усіма записами та розпорядженнями за час, що минув з його останнього чергування;
- оформити приймання зміни записом у журналі, відомості, а також в

оперативній схемі власним підписом та підписом працівника, який її здає;

- доповісти старшому зміни про початок чергування та про неполадки, виявлені під час прийняття зміни.

Забороняється прийняття та здача зміни у випадках, коли на дільниці, яка обслуговується, робочі місця не прибрані, устаткування забруднене. Прийняття зміни, коли устаткування несправне чи є відхилення від нормального режиму його роботи, допускається тільки з дозволу особи, відповідальної за електрогосподарство підприємства, або оперативного працівника вищого рівня, про що робиться запис в оперативному журналі. Оперативні працівники під час свого чергування є відповідальними за правильне обслуговування та безаварійну роботу всього устаткування на закріпленій за ними дільниці.

В разі порушення режиму роботи, пошкодженні чи аварії електроустаткування оперативний працівник зобов'язаний негайно вжити заходів з відновлення схеми нормального режиму роботи і повідомити про те, що сталося, безпосередньо старшому у зміни працівнику або особі, відповідальній за електрогосподарство. У випадку неправильних дій оперативних працівників під час ліквідації аварії старший в зміні оперативний працівник зобов'язаний прийняти на себе керівництво і відповідальність за подальший перебіг ліквідації аварії.

Оперативні працівники повинні проводити обходи та огляди устаткування і виробничих приміщень на закріпленій за ним дільниці. Огляд електроустановок може виконуватись одноосібно: адміністративно-технічним працівником з групою V в електроустановках понад 1000 В і з групою IV – в електроустановках до 1000 В; оперативним працівником, який обслуговує цю електроустановку.

Список адміністративно-технічних працівників, яким дозволяється одноосібний огляд, встановлюється особою, відповідальною за електрогосподарство і затверджується керівником підприємства.

Забороняється під час огляду електроустановок виконувати будь-яку

роботу. Огляди, виявлення та ліквідація несправностей в електроустановках без місцевих чергових працівників виконуються централізовано виїзними працівниками, що здійснюють нагляд і роботи на об'єкті (чи групі об'єктів). Періодичність цих робіт встановлюється особою, відповідальною за електрогосподарство, залежно від місцевих умов. Результати оглядів фіксуються в оперативному журналі.

Двері приміщень електроустановок (щитів, збірок тощо) мають бути постійно замкнені. Для кожного приміщення має бути не менше двох комплектів ключів, один з яких є запасним. Ключі від приміщень РУ не повинні пасувати до дверей комірок і камер. Ключі підлягають поверненню щоденно після закінчення роботи.

5.1.2 Електробезпека

Проектування та експлуатація електричних мереж і установок повинна здійснюватися за умови дотримання вимог з їхньої електробезпеки [30-32]. Живлення силового обладнання заводу та системи освітлення здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі 380 х 220В (фазна напруга (фаза – "0") – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В).

Категорія умов по небезпеці електротравматизму – особливо небезпечні, так як роботи виконуються назовні приміщень. Технічні рішення щодо запобігання електротравмам [33]: для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмопровідними елементами електроустаткування, потрібно: розміщувати неізольовані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки; підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги; електрозахисні засоби захисту (до 1000В) поділяються на основні (ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками) та допоміжні (діелектричні калоші; діелектричні

килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки).

5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Категорія робіт, що виконується оперативним персоналом – Па – пов'язано з постійною ходою і перенесенням невеликих вантажів масою до 1 кг [33]. За ступенем впливу на тепловий стан людини мікрокліматичні умови визначаємо як допустимі (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1 – Допустимі параметри мікроклімату

Період року	Категорія робіт	Температура, °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний	Середньої важкості: Па	17-23	75	не > 0,3
Теплий	Середньої важкості: Па	18-27	65 при 26 °С	0,2-0,4

Необхідно, щоб в приміщеннях, що будуються, була постійна циркуляція повітря або встановлений кондиціонер [34]. Влітку при значних вологовтратах і значному часі опромінення інфрачервоною радіацією споживають охолоджену до 15-20°C підсолену (0,5 % HCl) газовану воду. Вживання підсоленої води запобігає згущенню крові, сприяє утриманню її в організмі, покращує самопочуття й підвищує працездатність. Із заходів особистої профілактики після теплових навантажень рекомендуються гідропроцедури.

5.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³ [30].

Для нормалізації складу повітря робочої зони потрібно здійснювати щоденне прибирання робочого місця. Нагромадження пилу на будь-якій ділянці вказує на необхідність у вживанні заходів з її очищення. Необхідно підкреслити, що будь-яке нагромадження пилу може привести до загоряння. Чим дрібніше пил (зернистість), тим вище небезпека.

Таблиця 5.2 – Можливі забруднювачі повітря можуть і їх ГДК

Найменування речовини	ГДК, мг/куб.м		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньодобова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Вуглецю оксид (СО)	3	1	4

Тому необхідно здійснювати наступні заходи: очищувати пил якнайчастіше, щодня протирати запилені поверхні обладнання з використанням продувки або пилососа. Потрібно планувати прибирання так, щоб воно приходилось на час коли устаткування вимкнене, зокрема в другу половину дня п'ятниці або на вихідні.

5.2.3 Виробниче освітлення

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [31], роботи з обслуговування електроустановок, потребують освітлення, яке характеризується розрядом зорової роботи III, підрозряд «в». Нормовані значення штучного, природного та суміщеного освітлення наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Харак-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Високої точності	Від 0,3 до 0,5 включно	III	в	малий середній великий	світлий середній темний	600	200	-	3,0

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітленням, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 2,5 метра.

5.2.4 Виробничий шум

Шум вище гранично допустимих рівнів несприятливо діє на людину. Шум у приміщенні широкопasmовий. Нормуємо шум на робочому місці. Рівні звукового тиску в октавних смугах частот, рівні звуку та еквівалентні рівні звуку на робочих місцях мають відповідати вимогам СН 3223-85, ГОСТ 12.1.003-85, ГР 2411-81 [30, 31] і наведені в табл. 6.4.

Таблиця 5.4 – Допустимі рівні звуку, еквівалентні рівні звуку і рівні звукового тиску в октавних смугах частот

Вид трудової діяльності, робочі місця	Рівні звукового тиску в дБ в октавних смугах із середньгеометричними частотами, Гц									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виконання усіх видів робіт на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях та на території підприємства	107	95	87	82	78	75	73	71	69	

Устаткування, що є джерелом шуму (вентилятори, електроінструмент, технологічне обладнання), слід використовувати поза межами приміщень.

Для забезпечення допустимих рівнів шуму на робочих місцях слід застосовувати засоби звукопоглинання, вибір яких має обґрунтовуватись спеціальними інженерно-акустичними розрахунками.

Акустична обробка приміщень – це облицювання частини внутрішніх поверхонь огорожень звукопоглинаючими матеріалами, а також розміщення в приміщенні штучних звукопоглиначів, які представляють собою вільно підвішені об'ємні поглинаючі тіла довільної форми. Найбільший ефект при акустичній обробці можливо отримати в точках, які розташовані в зоні відбитого звуку; в зоні прямого звуку акустичний ефект від застосування облицювання набагато менший. Звукопоглинаючі облицювання розміщують на стелі і в верхніх частинах стін при висоті приміщення не більше 6-8 м таким чином, щоб акустично оброблена поверхня складала не менше 60 % від загальної площі обмежуючих приміщення поверхонь. У вузьких і дуже високих приміщеннях доцільно облицювання розміщувати на стінах, залишаючи нижні частини стін (до 2 м висотою) не облицьованими, або проектувати конструкцію звукопоглинаючої підвісної стелі.

5.2.5 Виробнича вібрація

Джерелами вібрацій є технологічне устаткування, електроінструмент і вентилятори. Норми виробничої вібрації на постійних робочих місцях в приміщеннях об'єктів будівництва, визначені за [33-34], наведено в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5– Допустимі рівні вібрації на постійних робочих місцях

Вид вібрації	Октавні полоси з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	32	63	125	250	500	1000
Загальна вібрація: на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях	1,3* 108	0,45 99	0,22 93	0,2 92	0,2 92	0,2 92	-	-	-	-

В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, $\text{м/с}^* 10''$, в знаменнику – логарифмічні рівні вібрації, дБ.

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено: створення амортизаторів в яких використовують пружини, гуму та інші пружні матеріали; розміщення будівельних конструкцій на масивних фундаментах; встановлення додаткових реактивних опорів. Також серед технічних заходів уникнення шкідливого впливу вібрації – створення нових конструкцій інструментів і машин, вібрація яких не може виходити за безпечні для людини межі, а зусилля не повинні перевищувати 15- 20 кг. Усі деталі машин та агрегатів, що рухаються, повинні ретельно врівноважуватися, а для зменшення динамічних сил, які спричинюють вібрації, слід застосовувати змащування та ін.

5.2.6 Психофізіологічні фактори

а) Класи умов праці за показниками важкості праці:

Загальні енергозатрати організму (кг/м): Зовнішнє фізичне динамічне навантаження, виражене в одиницях механічної роботи за зміну, $\text{кг}/(\text{Вт})$; При регіональному навантаженні (для чоловіків) – 12000(40); При загальному навантаженні (за участю м'язів рук, тулуба, ніг) – 40000(80); Маса вантажу, що постійно підіймається – до 25.

Стереотипні робочі рухи: При локальному навантаженні (участь м'язів кистей та пальців рук)- до 60 000; При регіональному навантаженні(участь

рук та плечового суглоба) – до 30 000; Статичне навантаження (кг/с): Двома руками (чоловіки) – до 70 000; За участю м'язів тулуба та ніг – до 200 000.

Робоча поза: Періодичне перебування в незручній позі (робота з поворотом тулуба, незручним розташуванням кінцівок) до 25% часу зміни.

Нахил тулуба: Вимушені нахили протягом зміни – 150 разів; Переміщення у просторі(переходи задля технологічного процесу) – більше 12

б) Класи умов праці за показниками напруженості праці:

Інтелектуальні навантаження: Зміст роботи – рішення складних завдань з вибором за алгоритмом; Сприймання інформації та їх оцінка - сприймання інформації з наступною корекцією дій та операцій; Розподіл функцій за ступенем складності завдання - обробка, контроль, перевірка завдання.

Сенсорні навантаження: Зосередження (%за зміну) – до 50; Щільність сигналів (звукові за 1 год) – до 150; Навантаження на слуховий аналізатор (%) – розбірливість слів та сигналів від 50 до 80; Навантаження на голосовий апарат (протягом тижня) – від 20 до 25.

Емоційне навантаження: Ступінь відповідальності за результат своєї діяльності – є відповідальним за функціональну якість основної роботи; Ступінь ризику для власного життя – вірогідний; Ступінь відповідальності за безпеку інших осіб – є відповідальним за безпеку інших.

Режим праці: Тривалість робочого дня – більше 8 год; Змінність роботи – однозмінна (без нічної зміни).

5.3 Види захисту електродвигуні та систем електропривода

Поломка електродвигуна може призвести до виникнення аварійних ситуацій та виходу з ладу багатьох інших пристроїв, пов'язаних у єдину енергетичну мережу з джерелом живлення. Своєчасний та якісний захист електродвигунів суттєво збільшує робочий ресурс агрегату та забезпечує безпеку обладнання й операторів, що обслуговують його. Установка додаткових пристроїв дозволяє запобігти частим ремонтам електродвигуна та підвищити його ККД.

Оскільки захист електродвигуна робить його суттєво дорожчим, необхідність і доцільність встановлення слід ретельно прорахувати. Велика кількість елементів захисту робить використання електродвигуна економічно не вигідним, а їхня відсутність або неправильно підібрані заходи запобігання перепадам напруги та температур можуть призвести до поломок і передчасного аварійного виходу електромотора з ладу.

Серед видів захисту електродвигунів найважливішим є запобігання: зниженню напруги, зникненню однієї із фаз (фазочутливий захист);

- теплового перегріву;
- короткому замиканню;
- перевантаженню струмом.

Підбирається захист для електродвигуна таким чином, щоб урахувати умови функціонування агрегату, його потужність, передбачуване навантаження, режими роботи, можливість присутності підготовленого персоналу. Однією з найчастіших причин несправності електричного двигуна є перегрів через:

1. перевищення допустимої тривалості безперервної експлуатації; надлишкове навантаження;
2. заклинювання обертового валу внаслідок порушення техніки експлуатації агрегату
3. потрапляння сторонніх предметів; коротке замикання на обмотках;
4. знос частин двигуна; невідповідні умови експлуатації.

Для механічного захисту асинхронних електродвигунів від перевантажень застосовується біметалеве реле, чутливий до нагрівання елемент якого вигинається зі збільшенням температури. Цей елемент замикає/розмикає контакт реле, після чого сигнал про відключення надходить на силовий агрегат.

У роботі з асинхронними електродвигунами слід враховувати можливе зниження напруги в мережі або пропадання однієї фази. У такому разі напруга на обмотках зменшується, а струм збільшується. Щоб захистити

електродвигуни від негативних наслідків такої зміни вольтажу та амперажу, застосовуються реле та теплові сенсори, що встановлюються в обмотки.

Для моментального захисту від короткого замикання використовуються:

1. автомати-вимикачі з електромагнітним роз'єднанням;
2. реле (електронні чи електромеханічні);
3. запобіжники з плавкими одноразовими вставками.

Якщо потужність електродвигуна за нормальних умов роботи не перевищує номінальну, зазначену в технічній документації до агрегату, частина реле може не застосовуватися. Тоді захисні елементи можна налаштувати на нижчий робочий струм.

Перегрів трифазних асинхронних електродвигунів може бути спровокований збільшенням температури:

1. на обмотці статора;
2. на підшипниках;
3. у роторі;
4. у точці електричного підключення.

Зазвичай теплові датчики встановлюються на обмотці – найчастішому джерелі перегріву електродвигуна, розташованому в меншій частині мотора, що обдувається вентилятором. Датчиками перегріву виступають напівпровідникові терморезистори РТС – термістори чи позистори.

Висока ефективність термісторного захисту обумовлена тим, що вона має високу швидкість відповіді на будь-яку з причин перегріву електродвигуна:

1. заклинювання підшипників;
2. навантаження;
3. обрив фази;
4. низька якість вентиляції й охолодження.

Автомати та температурні реле застосовуються для захисту від перевантаження струмом. У цьому випадку захист електродвигунів

налаштовується так, щоб відсікати тривале протікання великого струму, що призводить до перегріву та швидкого зношування ізоляції.

Перетворювачі частоти дозволяють змінювати швидкість обертання валу, регулюючи таким чином частоту напруги та вольтаж. Робочі точки, коректно встановлені на вольтчастотній характеристиці мотора, забезпечують захист силового агрегату від навантаження.

Частотні перетворювачі реалізують захист електричного двигуна програмно й апаратно за допомогою датчиків, виключаючи необхідність у механічному захисті за допомогою редукторів або муфт.

Завдяки частотним перетворювачам контроль роботи електродвигуна відбувається постійно незалежно від присутності технічного персоналу. При зміні навантаження та надходженні відповідних сигналів з датчиків електроживлення двигуна переводиться у відповідний режим, перешкоджаючи перегріву та гарантуючи захист від короткого замикання або заклинювання електродвигуна [32-34].

ВИСНОВКИ

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи на тему «Високоєфективний метод управління електроприводом металорізального верстату» були запропоновані рішення щодо підвищення ефективності функціонування частотного електропривода верстату та отримано такі результати досліджень:

1. Проведено аналіз сучасних систем керування електроприводами верстатів. Системи керування з нейрорегуляторами у своїй структурі та системи керування з вентильним двигуном є найбільш перспективними, оскільки забезпечують необхідні динамічні характеристики верстатів, а також широкий діапазон регулювання швидкості.

2. Розглянуто загальні вимоги до електроприводів головного руху та руху подач, та приватні, що належать до конкретного типу приводу. Серед розглянутих вимог слід відзначити широкий діапазон регулювання, високу жорсткість, швидкодію, продуктивність, компактність, а також високу плавність та точність руху. Виконання зазначених вимог дозволить підвищити довговічність приводних систем верстата, покращити якість обробки заготовок, знизити шпаруватість.

3. В математичному середовищі Simulink розроблена система управління приводом поздовжньої подачі верстата з нестандартним задатчиком інтенсивності, яка має високі динамічні характеристики електроприводу при керуючих впливах. Недоліком розробленої системи управління є наявність коливань при впливах, що обурюють, по другій масі, які не демпфуються системою управління.

4. Розроблена в математичному середовищі Matlab Simulink система управління двомасовим об'єктом, що дозволяє врахувати пружні властивості ременя з коригувальним коефіцієнтом забезпечує високі статичні характеристики електроприводу головного руху верстата. Практично відсутня статична помилка по кутовій швидкості обертання другої маси в

установленому режимі електроприводу після подачі моментів опору. Наведений спосіб розрахунку коригуючого коефіцієнта може бути застосований до електроприводів верстатів, у структурі яких є ремінна передача.

5. Для керування електроприводом головного руху верстата може ефективно використовуватися нейроконтролер із передбаченням керуючого сигналу.

6. Розроблена система управління електроприводом головного руху металорізального верстата з нейроконтролером у своїй структурі дозволяє покращити динамічні характеристики верстата при розгоні, порівняно з СУ без нього. З результатів моделювання в математичному середовищі Matlab Simulink видно, що в СУ з NN Predictive Controller час перехідного процесу за швидкістю зменшився на 34%, а перерегулювання на 18% порівняно з СУ з класичним ПІ-регулятором швидкості.

7. Розроблена система управління приводом поздовжньої подачі верстата з нейроконтролером дозволяє зменшити пружні коливання в приводі при впливах, що обурюють. Зменшення коливань відбувається за рахунок нейроконтролера з еталонною моделлю Model Reference Controller (MRC), на виході якого формуються дії імпульсного характеру, що дозволяють покращити динамічну якість приводу поздовжньої подачі.

8. Виконано техніко-економічний розрахунок величини витрат запропонованого варіанту системи електропривода. Визначено, що за рахунок впровадження запропонованих рішень досягається економія річних експлуатаційних витрат. Це підтверджує правильність виконаних досліджень та економічну доцільність впровадження даного технічного рішення.

9. Визначено основні положення щодо безпечної експлуатації досліджуваного електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих чинників оточуючого середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Леві Л. Електропривод та автоматизація верстатів: навчальний посібник / Л. Леві. — Полтава: ПолтНТУ, 2023. — 210 с.
2. Електроустаткування металорізальних верстатів: навчальний матеріал / кол. авт. — К.: 2018. — 95 с.
3. Автоматизований електропривод: навчальний посібник / КПІ ім. І. Сікорського, каф. АЕМС. — К.: КПІ, 2020. — 150 с.
4. Долганов В. Автоматизований електропривод у металорізальних верстатах: навчальні матеріали / В. Долганов. — К.: КПІ, 2018. — 42 с.
5. Маринич І. Застосування нейронних регуляторів при моделюванні керування / І. Маринич // Інформаційні технології та суспільство. — 2022. — №1. — С. 45–50.
6. Степанець О. Neural Network Predictive Controller в системах керування / О. Степанець // Молодий вчений. — 2020. — №3. — С. 120–125.
7. Автоматизований електропривод металорізальних верстатів: навчальний посібник / ДДМА, каф. ЕПП. — Краматорськ: ДДМА, 2019. — 130 с.
8. Синтез нейрорегулятора NN Predictive Controller для керування електромеханічними системами: тези доповідей / кол. авт. — К.: 2025. — 6 с.
9. Чернодуб А., Кузнецов С. Методи нейромережевого управління в електроприводах / А. Чернодуб, С. Кузнецов // Електротехніка і електромеханіка. — 2021. — №2. — С. 30–38.
10. Zhilevski M., et al. Study of spindle drives for boring machines / M. Zhilevski // MATEC Web of Conferences. — 2019. — №290. — С. 1–6.
11. ACE MACHINE TOOLS. Китайський виробник станків. Електронний ресурс. Режим доступу: <http://www.acemachinetools.com/>
12. Han, X., Ouyang, H., Wang, M., Hassan, N., & Mao, Y. (2012). Self-excited vibration of workpieces in a turning process. Proceedings of the Institution

of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 226(8), 1958-1970. doi:10.1177/0954406211435880.

13. K. Khalili, M. Danesh. Investigation of overhang effect on cutting tool vibration for tool condition monitoring. *Virbroengineering*. ISSN PRINT 2335-2124, ISSN Online 2424-4635, Kaunas, Lithuania. 2013.

14. Kaminski M., Slowinski M., et al. Neural Network Applications in Electrical Drives—Trends, Challenges and Opportunities / M. Kaminski, M. Slowinski // *Energies*. — 2023. — Vol. 16, №11. — P. 1–25. — DOI:10.3390/en16114441.

15. Zhang S., Wallscheid O., Pormann M. Machine Learning for the Control and Monitoring of Electric Machine Drives: Advances and Trends / S. Zhang, O. Wallscheid, M. Pormann. — arXiv Preprint, 2021. — 45 p.

16. Lin F. J. RFNN Controlled Sensorless Induction Spindle Motor Drive / F. J. Lin // *Electric Power Systems Research*. — 2004. — Vol. 71. — P. 1–10.

17. Peng D., et al. Prediction of Milling Force Based on Spindle Current Signal Using Neural Network / D. Peng // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. — 2022. — Vol. 120. — P. 125–139.

18. Paprocki M., Wawrzak A., Grzesiak L. Neural Network Contour Error Predictor in CNC Control Systems / M. Paprocki, A. Wawrzak, L. Grzesiak. — ResearchGate, 2020. — 12 p.

19. Şahin İ. Model Predictive Control for Electrical Drive Systems: Dissertation / İ. Şahin. — Ankara: Middle East Technical University, 2021. — 180 p.

20. Review of Electric Drive Techniques: Power Enhancement and Intelligent Drive Techniques / КОЛ. АВТ. // *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*. — 2020. — Vol. 15. — P. 1000–1015.

21. Winkler A., et al. Integrating Recurrent Neural Networks into Model Predictive Control / A. Winkler // *Procedia Computer Science*. — 2023. — Vol. 219. — P. 15–22.

22. Cao J., Xia X., Wang L., Zhang Z., Liu X. A Novel CNC Milling Energy Consumption Prediction Method Based on Program Parsing and Parallel Neural Network / J. Cao, X. Xia, L. Wang, Z. Zhang, X. Liu // Sustainability. — 2021. — Vol. 13, №9. — P. 1–18.

23. Altintas Y. Machine Tool Feed Drives / Y. Altintas // CIRP Annals — Manufacturing Technology. — 2011. — Vol. 60, №2. — P. 779–796.

24. Молла К.Е. Нейронні регулятори в середовищі MATLAB/Simulink: методичні матеріали / К.Е. Молла. — Київ: НТУУ «КПІ», 2022. — 48 с. — Електронний ресурс. Режим доступу (URL): <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/3015546e-e1db-4280-b255-02b18088f1ff/content?utm>

25. Математичне моделювання системи електроприводу: метод. вказівки / Харків. політех. ін-т (публ.). — Харків: 2014. — 72 с. — Електронний ресурс. Режим доступу (URL): <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/74/66/15st-11.pdf?utm>

26. Аналіз сучасних систем керування електроприводами металообробних верстатів / В.О. Некрутенко, В.В. Богачук – Матеріали конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026)», [Електронний ресурс]. URL:

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn20256>, – Вінниця : ВНТУ, 2026. – 4 с.

27. Karpliuk L.F. Моделювання процесів розгону та роботи електромеханічних приводів у MATLAB/Simulink / Л.Ф. Карплюк // Збірник наук. праць. — Львів: 2018. — С. 19–25. — Електронний ресурс. Режим доступу (URL): <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2019/oct/19348/900maket2018original-19-25.pdf?utm>

28. Model Predictive Torque Control of Induction Motor Using SVPWM / Patidar A., Sarvate D., Nimonkar Y. — Journal of Management Information and Decision Sciences, 2021. — Електронний ресурс. Режим доступу (URL):

Додаток А

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри КЕМСК

к.т.н., доц.

 Микола МОШНОРИЗ

«21» 10 20__ р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

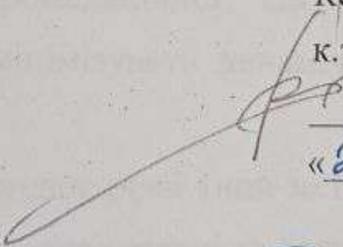
на магістерську кваліфікаційну роботу

**ВИСОКОЕФЕКТИВНИЙ МЕТОД УПРАВЛІННЯ
ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ВЕРСТАТУ**

08-24.МКР.007.00.000 ТЗ

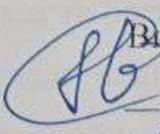
Керівник роботи

к.т.н., доц.

 Володимир БОГАЧУК

«21» 10 2025 р.

Виконав: ст. гр. ЕПА-25м

 Вячеслав НЕКРУТЕНКО

«21» 10 2025 р.

1 Загальні відомості

Повне найменування розробки «Високоєфективний метод управління електроприводом металорізального верстату».

Скорочене найменування розробки – «Високоєфективний метод управління електроприводом металорізального верстату».

Замовник – Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів.

2 Підстави для розробки

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем магістерських кваліфікаційних робіт.

3 Призначення розробки і галузь використання

Розробка призначена для створення високоєфективної системи управління електроприводом металорізального верстата, здатної забезпечувати підвищену точність, швидкодію та енергоефективність роботи обладнання в умовах сучасного високотехнологічного виробництва. Запропонований метод базується на застосуванні інтелектуального нейроконтролера типу **NN Predictive Controller**, що дозволяє здійснювати прогнозування стану електромеханічної системи в реальному часі, оптимізувати керуючі дії та мінімізувати динамічні похибки під час зміни режимів обробки.

Галузь використання охоплює різні типи металорізальних верстатів — токарні, фрезерні, шліфувальні, свердлильні та багатоцільові обробні центри, обладнані асинхронними або синхронними електроприводами головного руху. Розроблений метод керування ефективний у системах ЧПК, адаптивних та інтелектуальних верстатах, де висуваються підвищені вимоги до динаміки, точності та стабільності процесу обробки.

Також дана система може застосовуватися у модернізації існуючих верстатів, у роботизованих комплексах металообробки, лабораторних стендах для дослідження електромеханічних систем та при впровадженні

технологій «цифрового двійника» для прогнозування роботи приводу й оптимізації виробничих процесів.

4 Вимоги до розробки

Основними вимогами до розробки є:

- підвищення точності позиціювання та стабільності різання;
- зменшення коливань і пульсацій швидкості головного руху;
- адаптація параметрів керування до змін навантаження, властивостей оброблюваного матеріалу та технічного стану приводу;
- забезпечення високої якості обробки поверхонь та зниження зносу інструменту;
- зменшення енергоспоживання та збільшення ресурсу електропривода.

5 Комплектація розробки

Апаратна частина:

- Електропривод головного руху верстата (асинхронний або синхронний двигун відповідної потужності, наприклад АДЧР132М4).
- Перетворювач частоти (інвертор) для регулювання швидкості та напрямку обертання приводу.
- Датчики швидкості, струму та положення (енкодери, тахогенератори) для реалізації зворотного зв'язку.
- Блоки захисту електромеханічної системи (автоматичне відключення, аварійне гальмування, захист від перегріву і перевантаження).

Програмна частина:

- Модель електропривода та верстата, створена у середовищі MATLAB/Simulink для моделювання динаміки приводу і обробки сигналів.
- NN Predictive Controller — нейропередбачувальний контролер, що реалізує прогнозування поведінки приводу та оптимізацію керуючих впливів у реальному часі.

- ПЗ для налаштування та ідентифікації параметрів приводу, моніторингу стану системи та відображення графіків переходу параметрів.

6 Джерела розробки

1. Лєві Л. Електропривод та автоматизація верстатів: навчальний посібник / Л. Лєві. — Полтава: ПолтНТУ, 2023. — 210 с.
2. Електроустаткування металорізальних верстатів: навчальний матеріал / кол. авт. — К.: 2018. — 95 с.
3. Автоматизований електропривод: навчальний посібник / КПІ ім. І. Сікорського, каф. АЕМС. — К.: КПІ, 2020. — 150 с.
4. Долганов В. Автоматизований електропривод у металорізальних верстатах: навчальні матеріали / В. Долганов. — К.: КПІ, 2018. — 42 с.
5. Молла К.Е. Нейронні регулятори в середовищі MATLAB/Simulink: методичні матеріали / К.Е. Молла. — Київ: НТУУ «КПІ», 2022. — 48 с. — Електронний ресурс. Режим доступу (URL): <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/3015546e-e1db-4280-b255-02b18088f1ff/content?utm>
5. Математичне моделювання системи електроприводу: метод. вказівки / Харків. політех. ін-т (публ.). — Харків: 2014. — 72 с. — Електронний ресурс. Режим доступу (URL): <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/74/66/15st-11.pdf?utm>

7 Технічні характеристики

Електропривод головного руху верстата (АДЧР132М4):

- Потужність: 11 кВт
- Напруга живлення: 380 В, 50 Гц
- Номінальна частота обертання: 1450 об/хв
- Номінальний струм: 24 А
- Клас ізоляції: F
- Ступінь захисту: IP54

- Тип: асинхронний короткозамкнений двигун
- Максимальний момент: 70 Н·м

Перетворювач частоти (інвертор):

- Вхідна напруга: 380 В, 50 Гц
- Потужність: відповідно до двигуна (11 кВт)
- Діапазон регулювання частоти: 0–400 Гц
- Режими керування: V/f, векторне керування з/без датчиків
- Інтерфейси: Modbus, Profibus, CAN

Система керування з NN Predictive Controller:

- Програмне середовище: MATLAB/Simulink
- Частота дискретизації контролера: 1–5 мс
- Прогнозний горизонт: 20–50 тактів дискретизації
- Кількість нейронів у прихованих шарах: 10–50 (залежно від моделі)
- Тип навчання: адаптивне online/online-offline
- Функції: прогнозування динаміки приводу, оптимізація керуючих впливів, компенсація навантажень та похибок

Сенсори та зворотний зв'язок:

- Енкодери для вимірювання обертів і положення (роздільна здатність до 5000 імп./об)
- Сенсори струму та напруги для контролю стану приводу
- Сенсори температури для моніторингу нагріву двигуна

Енергетичні та експлуатаційні характеристики:

- ККД електроприводу: 92–94 %
- ККД системи керування: ≥ 95 %
- Діапазон робочих температур: 0–40 °С
- Ресурс двигуна: $\geq 20\ 000$ годин

8 Етапи виконання

Основна частина	
Графічна частина	

9 Елементна база

Елементна база розробки включає асинхронний короткозамкнений двигун АДЧР132М4 для головного руху верстата, перетворювач частоти для регулювання швидкості та напрямку обертання, систему заземлення і блоки захисту, датчики зворотного зв'язку (енкодери, тахогенератори, датчики струму, напруги та температури), комп'ютер або промисловий контролер для реалізації NN Predictive Controller, програмне забезпечення MATLAB/Simulink із Deep Learning та Model Predictive Control Toolbox, комунікаційні інтерфейси (Modbus, Profibus, CAN), панель оператора для моніторингу та налаштування параметрів, а також методичну документацію із схемами підключень, алгоритмами керування та інструкціями з безпеки.

10 Конструктивне виконання

Система управління електроприводом реалізована як інтегрована конструкція, що поєднує апаратні та програмні компоненти: електропривод головного руху встановлений на станині верстата та з'єднаний із перетворювачем частоти через захисні блоки і контактори; датчики зворотного зв'язку (енкодери, тахогенератори, датчики струму і температури) розташовані на моторі та механічних вузлах для точного контролю параметрів; нейроробототехнічний контролер реалізовано на промисловому контролері або комп'ютері, який через комунікаційні інтерфейси (Modbus, Profibus, CAN) взаємодіє з інвертором та панеллю оператора; програмне забезпечення MATLAB/Simulink забезпечує моделювання, тренування і налаштування контролера, а блоки захисту і аварійного відключення гарантують безпечну експлуатацію системи в промислових умовах.

11 Показники технологічності

Розроблена система управління електроприводом забезпечує високу технологічність експлуатації завдяки простоті інтеграції з існуючими металорізальними верстатами, мінімальним змінам конструкції станини та приводу, легкому налаштуванню параметрів через інтерфейс MATLAB/Simulink, можливості адаптивного навчання нейроконтролера без

тривалого простою обладнання, зменшенню часу переходу між режимами обробки та підвищенню стабільності головного руху, що забезпечує підвищену точність різання, менший знос інструменту та зниження енергоспоживання при серійному виробництві.

12 Технічне обслуговування і ремонт

Система управління електроприводом передбачає планове технічне обслуговування, яке включає перевірку стану двигуна, перетворювача частоти та датчиків, очищення та змазку механічних вузлів, контроль і калібрування енкодерів та тахогенераторів, оновлення та переналаштування параметрів нейропередбачувального контролера у середовищі MATLAB/Simulink, а також тестування роботи всіх захисних блоків і аварійних систем; ремонтні роботи проводяться шляхом заміни пошкоджених компонентів або модулів, заміни електричних з'єднань та елементів захисту, при цьому конструкція системи дозволяє швидкий доступ до вузлів для скорочення часу простою верстата.

13 Живлення електропривода

Живлення електропривода повинно бути виконано напругою 380 В від силової мережі підприємства.

14 Порядок контролю та прийняття

Виконання етапів графічної та розрахункової документації магістерської кваліфікаційної роботи контролюється керівником згідно з графіком виконання роботи. Прийняття роботи здійснюється комісією затвердженою зав. кафедрою згідно з графіком захисту.

Додаток Б
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

ВИСОКОЕФЕКТИВНИЙ МЕТОД УПРАВЛІННЯ
ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ МЕТАЛОРИЗАЛЬНОГО ВЕРСТАТУ

Об'єкт, предмет, мета та задачі дослідження

Актуальність теми дослідження. Важливим напрямом розвитку в машинобудуванні є збільшення продуктивності верстатів, а також підвищення якості та точності виробів, що обробляються на верстаті. На точність обробки впливають такі фактори, як вібрації в верстаті через обертові приводні системи, пружні деформації в довгих валах і ремінних передачах, режими різання, знос обробного інструменту, похибка установки заготовки та обробного інструменту, геометрична точність обладнання, нелінійності, пов'язані з люфтами струму електродвигуна і т.д.

Об'єктом є математичні моделі та структури, режими роботи, динамічні характеристики асинхронних електроприводів змінного струму головного руху, поздовжньої та поперечної подачі токарного металообробного верстата, а також способи покращення цих характеристик.

Предметом є високоефективний метод управління, який дозволяє підвищити ефективність електропривода стабілізації швидкості асинхронного двигуна зі скалярним керуванням та частотний перетворювач із синусоїдальною широтно-імпульсною модуляцією.

Метою роботи є розробка високоефективного методу керування та алгоритмів модернізації електроприводів для підвищення якості та точності обробки деталей на металорізальних верстатах.

До **задач** магістерської кваліфікаційної роботи можна віднести:

- провести аналіз класичних методів модернізації приводів головного руху верстатів. Запропонувати спосіб модернізації, що дозволяє зменшити кількість використовуваних швидкостей обертання шпинделя, збільшуючи тим самим жорсткість та продуктивність верстата;
- провести аналіз систем управління електроприводами з використанням нейронних мереж у своїй структурі, що доводить актуальність, ефективність та перспективність цього напрямку;
- розробити математичні та комп'ютерні моделі в програмі Matlab Simulink приводу поздовжньої подачі з урахуванням вигину згину з урахуванням згину еталоною моделлю;
- виконати техніко-економічний розрахунок величини витрат запропонованого варіанту системи електроприводу та обґрунтувати правильність виконання досліджень та економічну доцільність впровадження технічних рішень;
- визначити основні положення щодо безпечної експлуатації досліджуваного електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих факторів оточуючого середовища

Аналіз вимог до електроприводів головного руху та руху подачі

Таблиця 1.1 – Вимоги до електроприводів верстатів

Вимоги до електроприводів верстатів		
Для всіх приводів верстатів	Для конкретного типу приводу	
	Подачі	Головного руху
<ul style="list-style-type: none"> - низька вартість приводу - невеликі вага та габарити - простота управління та обслуговування - висока надійність і схибленість - висока швидкодія - стабільність і повторюваність характеристик - висока максимальна швидкість - висока продуктивність - значний запас стійкості 	<ul style="list-style-type: none"> - швидкий час відпрацювання керуючого впливу при аперіодичному характері перехідних процесів розгону та гальмування - високий крутний момент - здатність витримувати великі навантаження - висока жорсткість - висока швидкодія - висока точність позиціонування - Інші 	<ul style="list-style-type: none"> - висока точність та плавність - забезпечення необхідних значень потужності, моменту, швидкості різання - широкий діапазон регулювання швидкості - інші

Проблеми в системах управління електроприводами верстатів

Методи збільшення продуктивності верстатів, а також якості та точності обробки заготовок умовно поділяються на три основні напрямки:

1. Підвищення жорсткості та вібростійкості окремих вузлів верстата.
2. Розробка систем керування точністю.
3. Розробка моделей розрахунку точності обробки.



Рисунок 1.1 – Системи керування точністю

Математичний опис системи векторного управління АД КЗ

Математичний опис системи векторного управління асинхронним коротко замкнутим двигуном при орієнтації системи координат векторам потокозчеплення ротора здійснюється наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} i_{1\alpha} = \frac{1}{\sigma T_1 p} (u_{1\alpha} - R_1 i_{1\alpha} + \omega_{0кл} \sigma T_1 R_1 i_{1\beta} - \frac{L_m}{L_2} p \psi_2), \\ i_{1\beta} = \frac{1}{\sigma T_1 p} (u_{1\beta} - R_1 i_{1\beta} + \omega_{0кл} \sigma T_1 R_1 i_{1\alpha} - \frac{L_m}{L_2} \omega_{0кл} \psi_2), \\ \psi_2 = \frac{1}{T_2 p} (L_m i_{1\alpha} - \psi_2), \omega_p = \frac{L_m}{L_2} R_2 \frac{i_{1\beta}}{\psi_2}, \omega_{0кл} = \omega_{pн} + \omega_p, \\ M_d = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \psi_2 i_{1\beta}, M_d - M_c = J p \omega, \\ u_{1\alpha}^* = W_{p1\alpha}(p) [u_{p1\alpha} - k_r i_{1\alpha}], u_{p1\alpha} = W_{p1\alpha}(p) [\psi_{зд} - k_{п1} \psi_2], \\ u_{1\beta}^* = W_{p1\beta}(p) [u_{p1\beta} - k_r i_{1\beta}], u_{p1\beta} = W_{p1\beta}(p) [u_{зд} - k_c \omega], \end{cases}$$

де $i_{1\alpha}, i_{1\beta}$ – складові струму статора; R_1, R_2 – активні опори фазних обмоток статора та ротора;

T_1, T_2 – постійні часу статора та ротора, $T_1 = L_1 / R_1, T_2 = L_2 / R_2$;

L_1, L_2 – індуктивності обмоток статора та ротора; σ – коефіцієнт розсіювання електродвигуна, $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_1 \cdot L_2)$; L_m – індуктивність намагнічує контуру;

$u_{1\alpha}, u_{1\beta}$ – складові напруги статора; $\omega_{0кл}$ – кутова швидкість обертової системи координат $\alpha - \beta$; p – оператор Лапласа; ψ_2 – потокозчеплення ротора; ω_p – частота роторної ЕРС; ω – кутова швидкість обертання ротора; p_n – число пар полюсів статора; M_d – момент, що розвивається двигуном; M_c – момент опору двигуна; J – момент інерції двигуна; $u_{1\alpha}^*, u_{1\beta}^*, u_{1ПТ}, u_{1РР}$ – вихідні напруги регуляторів струмів, потокозчеплення та швидкості;

$W_{1\alpha}, W_{1\beta}, W_{1ПТ}, W_{1РР}$ – передавальні функції регуляторів струму, потокозчеплення та швидкості;

$k_r, k_{п1}, k_{пш}$ – коефіцієнти передачі датчиків зворотних зв'язків контурів струму, потокозчеплення і швидкості відповідно;

$\psi_{зд}, u_{зд}$ – задані значення потокозчеплення та швидкості.

Аналіз сучасних систем керування ЕП металообробних верстатів

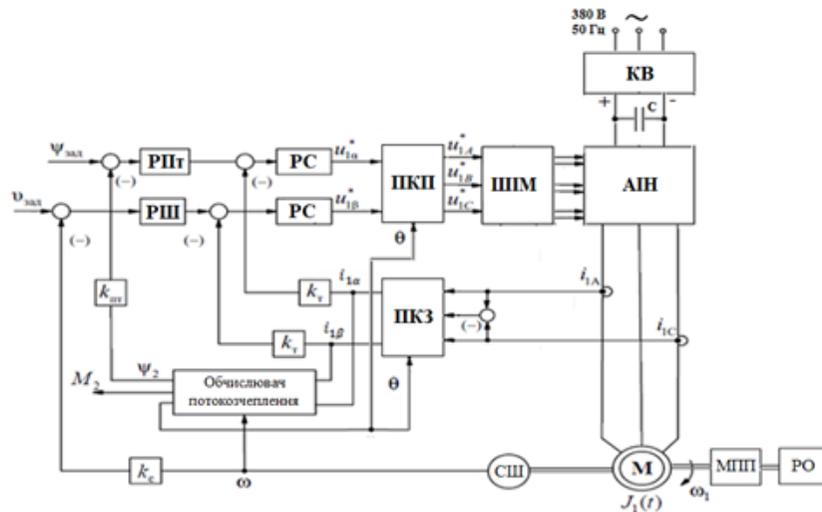


Рисунок 1.2 – Функціональна схема регулювання швидкості при векторному керуванні асинхронним двигуном з сенсором швидкості

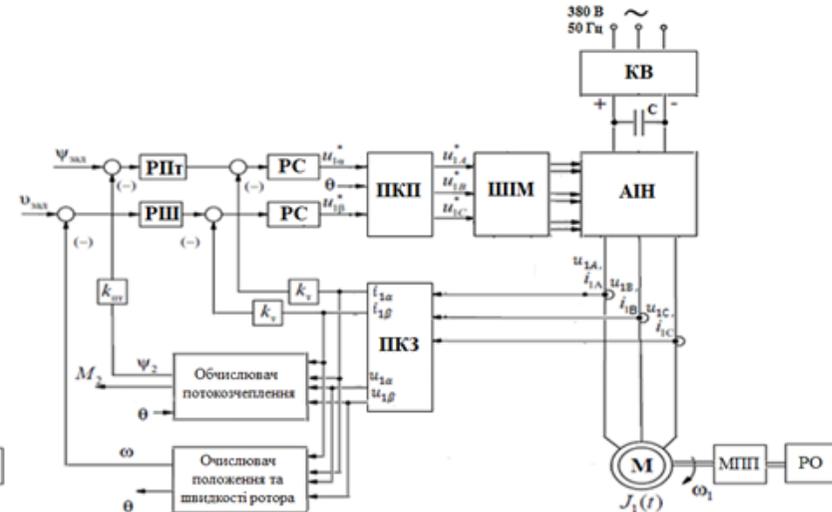
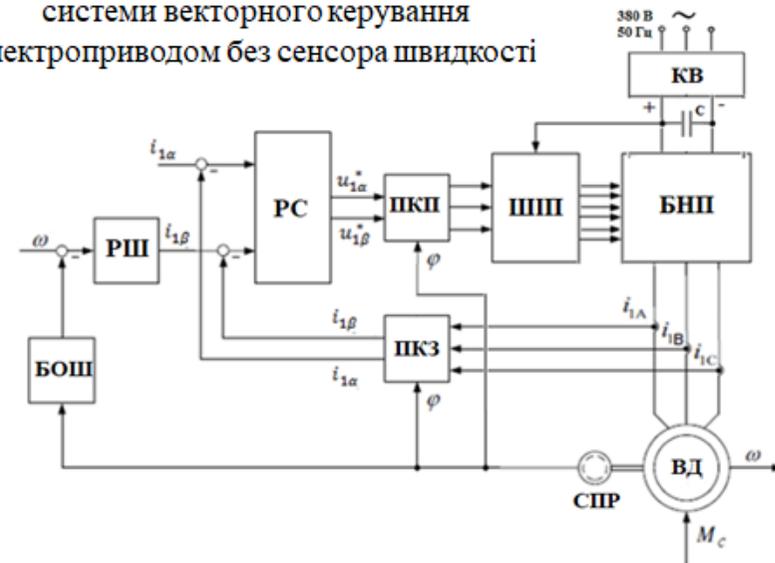


Рисунок 1.3 – Функціональна схема системи векторного керування електроприводом без сенсора швидкості

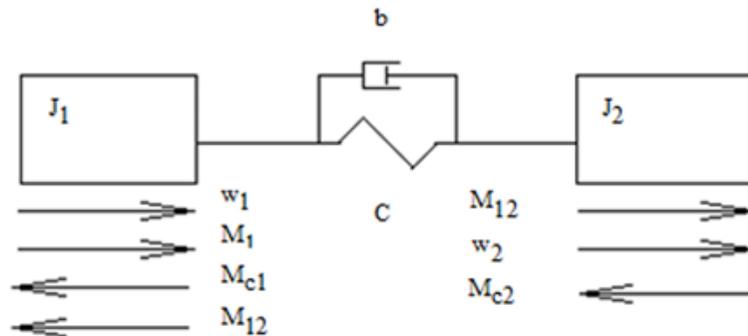
Рисунок 1.4 – Функціональна схема регульованого електроприводу з вентилювальним двигуном



Порівняння показників систем управління

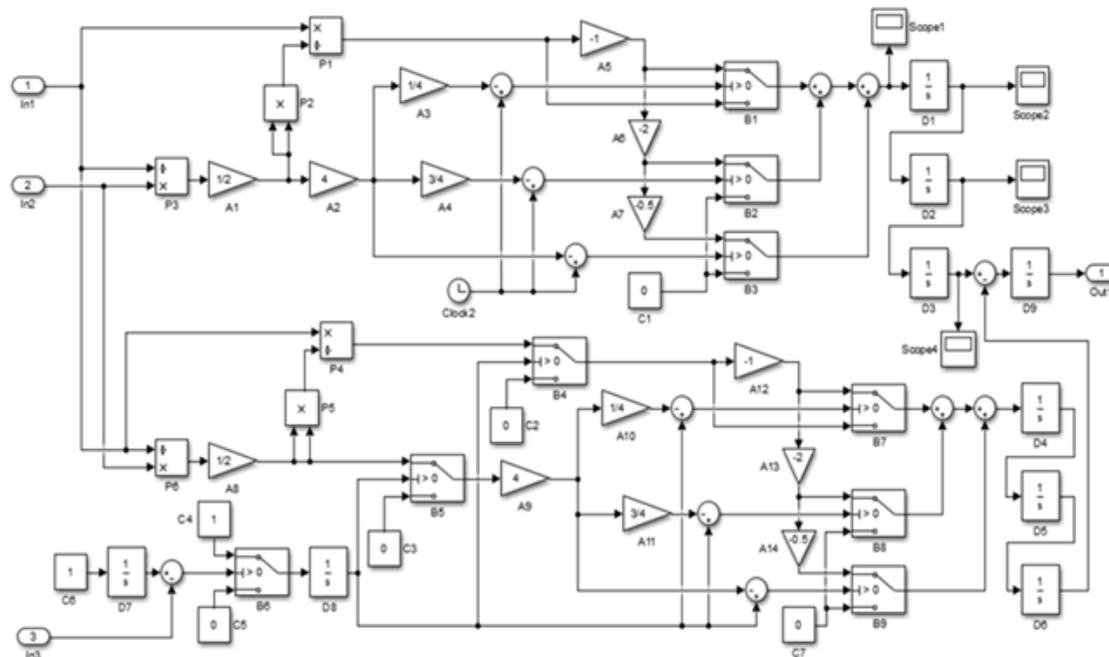
Метод управління / Показники якості	Векторне управління з сенсором швидкості АД	Векторне управління без сенсора швидкості АД	Векторне управління ВД	Векторне управління з НР АД
Діапазон регулювання швидкості	Високий діапазон регулювання швидкості $D \geq 100$	Діапазон регулювання швидкості нижче, ніж із сенсором $D \leq 100$	Високий діапазон Регулювання швидкості $D \leq 100000$	Високий діапазон Регулювання швидкості $D \geq 1000$
Полоса пропускання, Гц	100 і вище	до 100	500	500
Жорсткість механічної характеристики	Жорстка	Менш жорстка	Жорстка	Жорстка
Наявність додаткових звороних зв'язків	СС, СШ	СС	СС, СШ, СП	СС, СШ
Тип регуляторів	ПД	ПД	ПД	ПД, НР
Недоліки	Наявність проводів, що з'єднують ДЗЗ та СУ (іноді далеко)	невисока якість регулювання швидкості (залежить від ступеня відповідності моделі АД реальній машині)	висока вартість приводу, наявність проводів, що з'єднують ДЗЗ та СУ (іноді далеко)	складність навчання нейрорегулятора, наявність проводів, що з'єднують ДЗЗ та СУ (іноді далеко)

Синтез системи керування приводом поздовжньої подачі токарного верстата з пружними зв'язками із застосуванням нестандартного задавача інтенсивності



На рисунку 2.1: J_1, J_2 – моменти інерції двох мас; b – коефіцієнт, який характеризує демпфуючі властивості; C – коефіцієнт, що характеризує жорсткість системи; M_{12} – пружний момент взаємодії двох мас; M_{c1}, M_{c2} – моменти опору двох мас; w_1, w_2 – кутові швидкості обертання двох мас.

Рисунок 2.1 – Двомасова система



На рисунку 2.2 приведені наступні позначення: Scope1-Scope4 – відображення сигналів, що формуються; підсилювачі сигналів A1-A14; інтегральні ланки D1-D9; перемикачі B1-B9; блоки множення/розподілу P1-P6; постійних C1-C7; входних та вихідних величин In1-In3, Out1.

Рисунок 2.2 – Структура задавача інтенсивності

Синтез системи керування приводом поздовжньої подачі токарного верстата з пружними зв'язками із застосуванням нестандартного задавача інтенсивності

Приведений на рисунку 2.2 задавач інтенсивності генерує два протилежно спрямованих S-подібних сигнали. Для пояснення принципу роботи задавача інтенсивності на рисунку 2.3 приведений приклад ступінчастого сигналу, який подається на вхід S-подібного задавача і згодом кілька разів інтегрується, поки не стане S-подібним (рисунки 2.3 а-г).

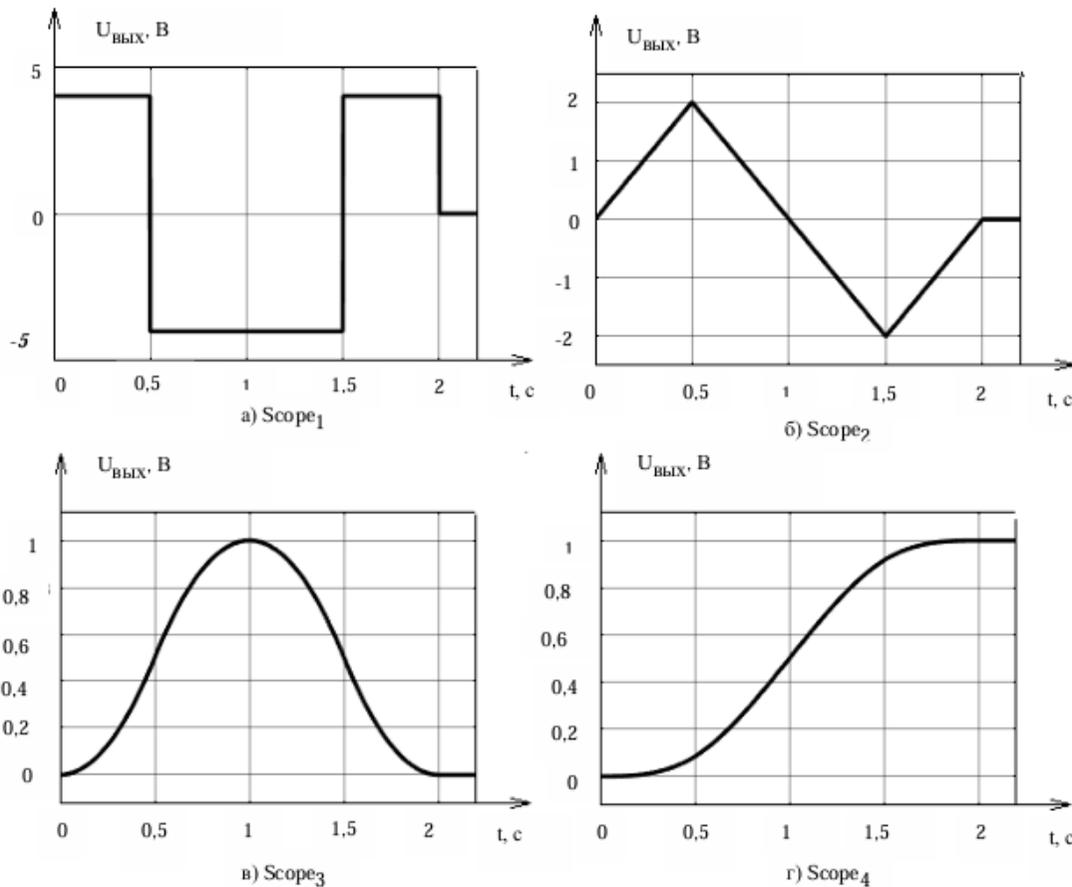


Рисунок 2.3 – Тимчасові функції, що пояснюють формування сигналу завдання

Синтез системи керування приводом поздовжньої подачі токарного верстата з пружними зв'язками із застосуванням нестандартного задавача інтенсивності

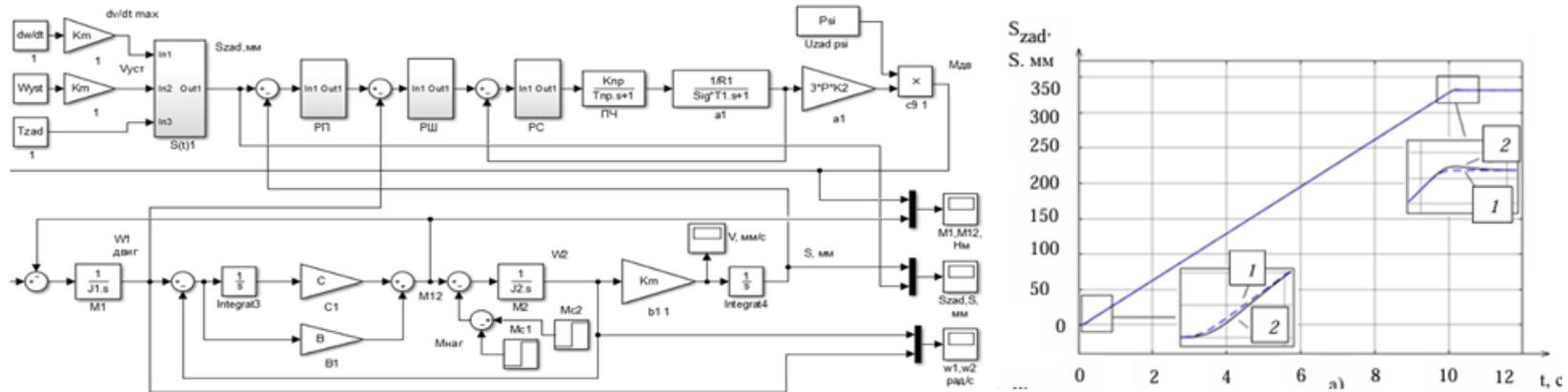
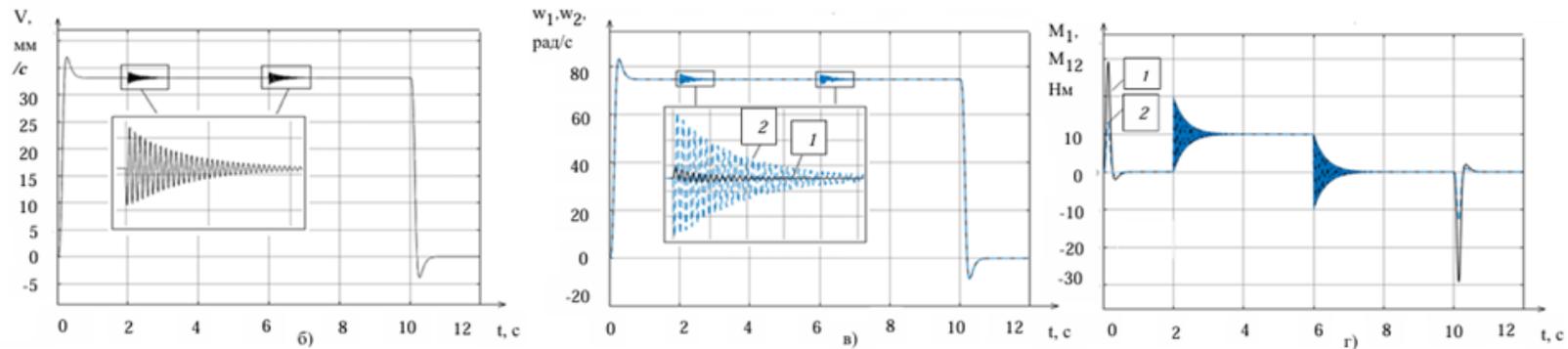


Рисунок 2.4 – Структурна схема двомасового електроприводу подачі



На рисунку 2.5: а) завдання шляху $S_{\text{зад}}$, мм – 1; вихідна величина шляху S , мм – 2; б) лінійна швидкість переміщення супортної групи V , мм/с; в) кутова швидкість двигуна, рад/с – 1; кутова швидкість супортної групи, рад/с – 2; г) момент двигуна, Нм – 2; момент супортної групи, Нм – 1. При синтезі структурної схеми, наведеної малюнку 2.4 було взято такі параметри ЗІ: $\omega_{\text{вст}}=74,5$ рад/с (номінальна швидкість двигуна); прискорення приводу $d\omega/dt=668$ рад/с²; $T_{\text{зад}}=10$ с. З 2 по 4 секунди був поданий момент опору $M_c=10$ Нм, який імітує процес обробки різанням заготовки.

Дослідження впливу пружностей елементів кінематичних кіл приводу головного руху верстату на динаміку та точність різання

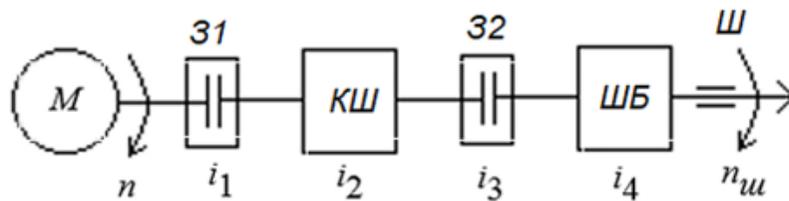


Рисунок 2.6 – Структурна схема приводу основного руху

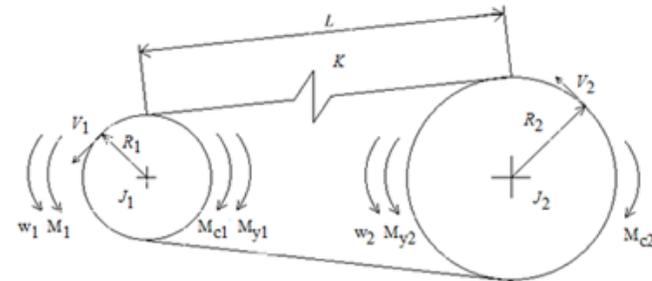


Рисунок 2.8 – Структурна схема двомасової системи

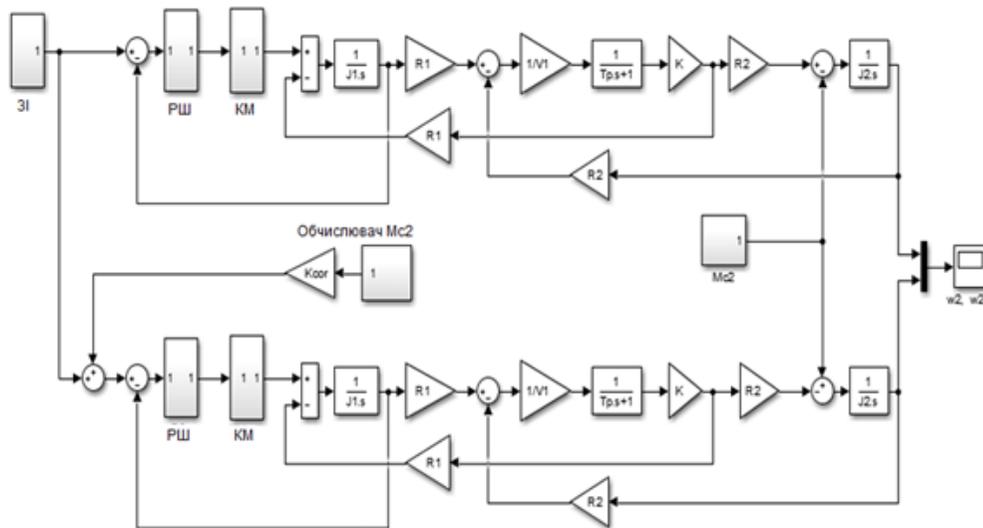


Рисунок 2.9 – Структурна схема приводу головного руху верстата із врахуванням пружності ремінної передачі

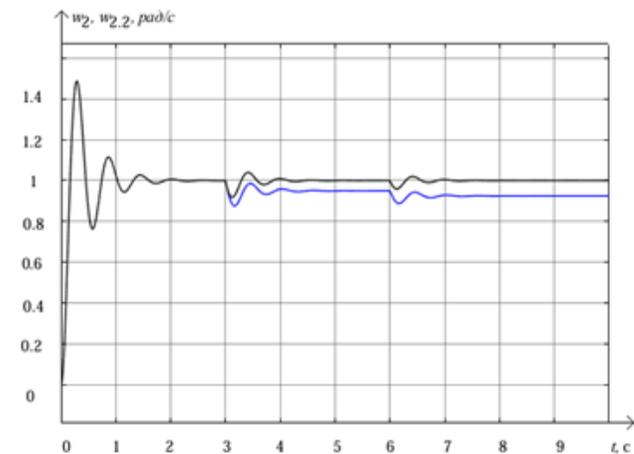


Рисунок 2.10 – Графіки перехідних характеристик базових моделей за швидкістю веденого шківa без поправочного коефіцієнта (синій графік) та з поправним коефіцієнтом $K_{cor}=1$ (чорний графік)

Синтез системи управління металорізального верстата із застосуванням нейроконтролера

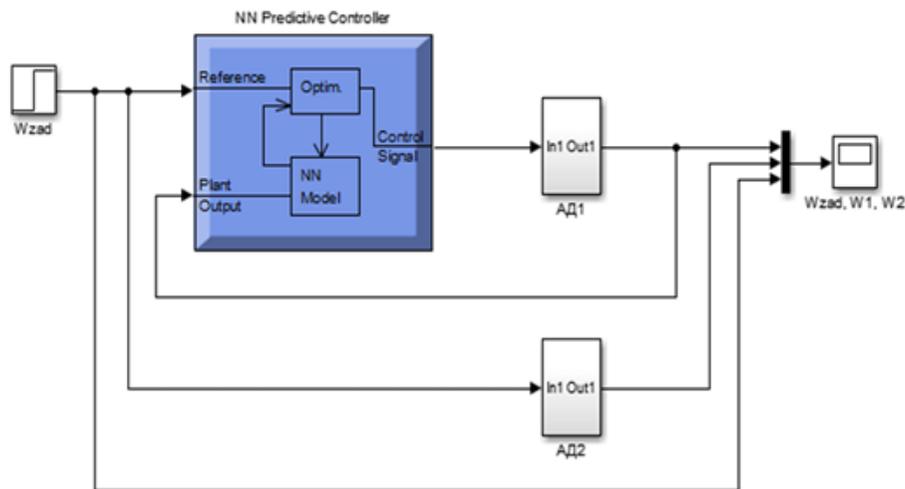


Рисунок 3.2 – Структурна схема векторного управління приводом верстата з нейрорегулятором та без нього

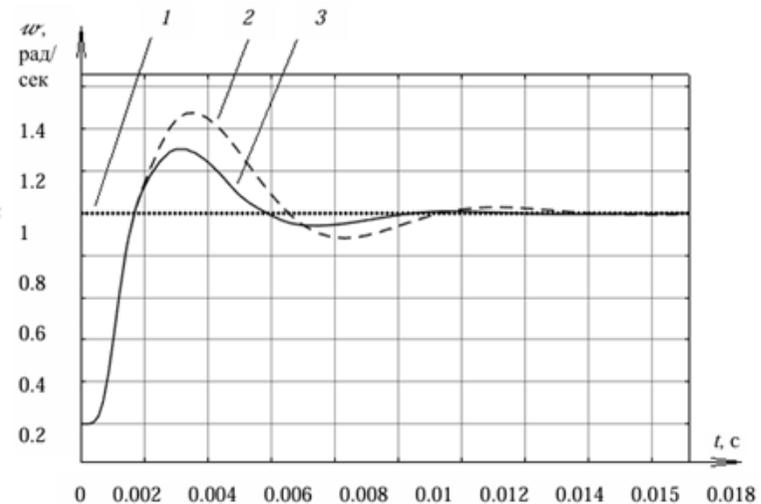


Рисунок 3.3 – Графіки перехідних процесів систем векторного управління з нейроконтролером та без нього: 1 - завдання; 2 - АД; 3 - АД з НМ

Показники якості перехідних процесів систем управління з нейрорегулятором NN Predictive Controller і без нього вихідної кутової швидкості наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Порівняльні результати моделювання

Показник якості	Позначення	Різнавид СУ	
		АД	АД з НМ
Час перехідного процесу	t_p	0,0144	0,0095
Перерегулювання, %	σ	48	30
Час встановлення (першого узгодження), с	t_n	0,0017	0,0017
Час досягнення першого мінімуму, с	t_m	0,0035	0,0030

Синтез системи управління швидкістю приводу поздовжньої подачі з використанням нейроконтролера

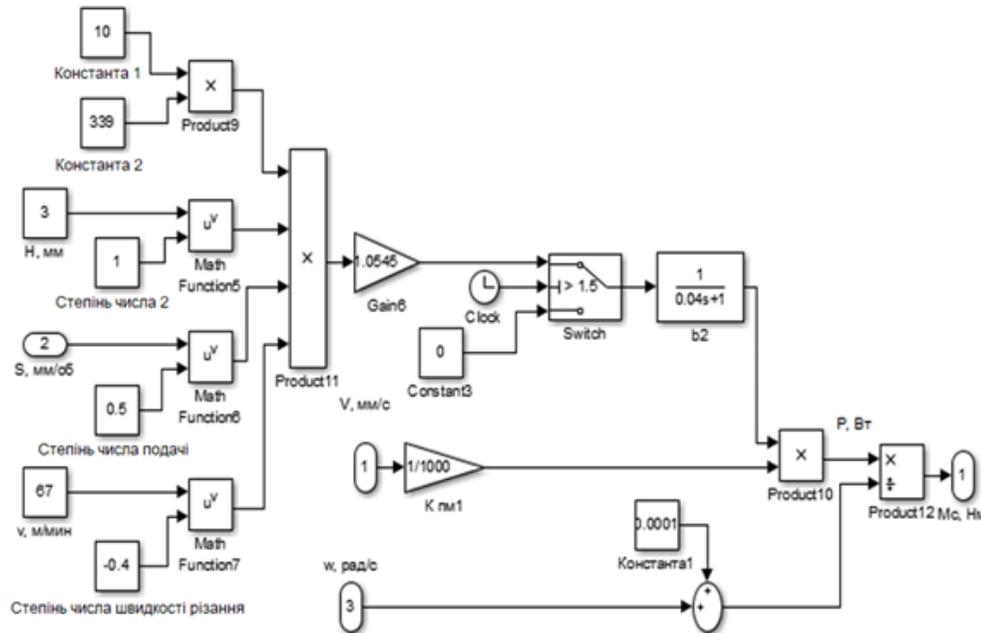
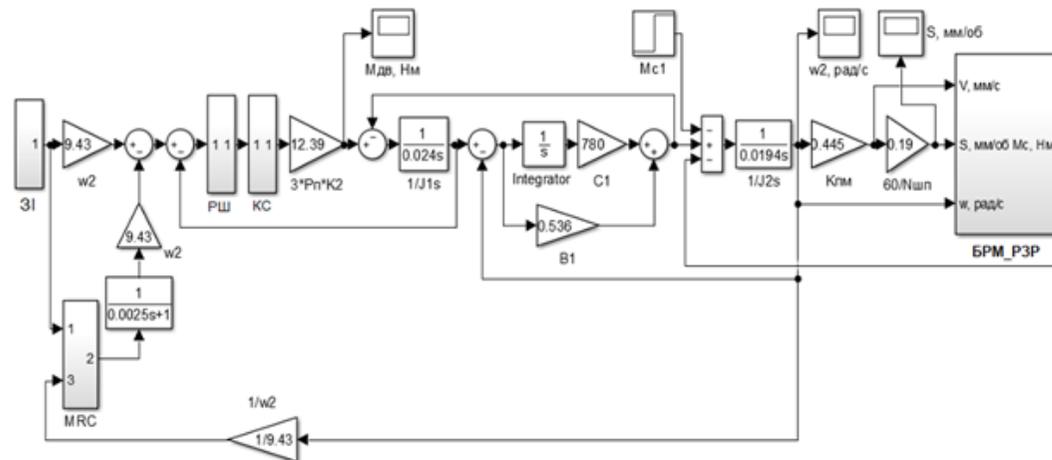


Рисунок 3.4 – Структурна схема розрахунку моменту опору та осевого зусилля різання

В блоці розрахунку моменту опору та радіального зусилля різання (БРМ_РЗР) реалізовано структурну схему розрахунку моменту опору та радіальної сили різання, приведена на рисунку 3.4. Контур струму (КС) являє собою послідовно включені ПІ-регулятор струму, а також перетворювач частоти та передатну функцію двигуна, виконані у вигляді двох послідовно включених аперіодичних ланок першого порядку.

Рисунок 3.5 – Система керування приводом поздовжньої подачі

Завдання на кутову швидкість електроприводу подається через лінійний задачник інтенсивності (ЗІ), що обмежує час розгону приводу, щоб уникнути виникнення неприпустимо великих динамічних навантажень на привід. У блоці РШ реалізовано ПІ-регулятор швидкості.



Синтез системи управління швидкістю приводу поздовжньої подачі з використанням нейроконтролера

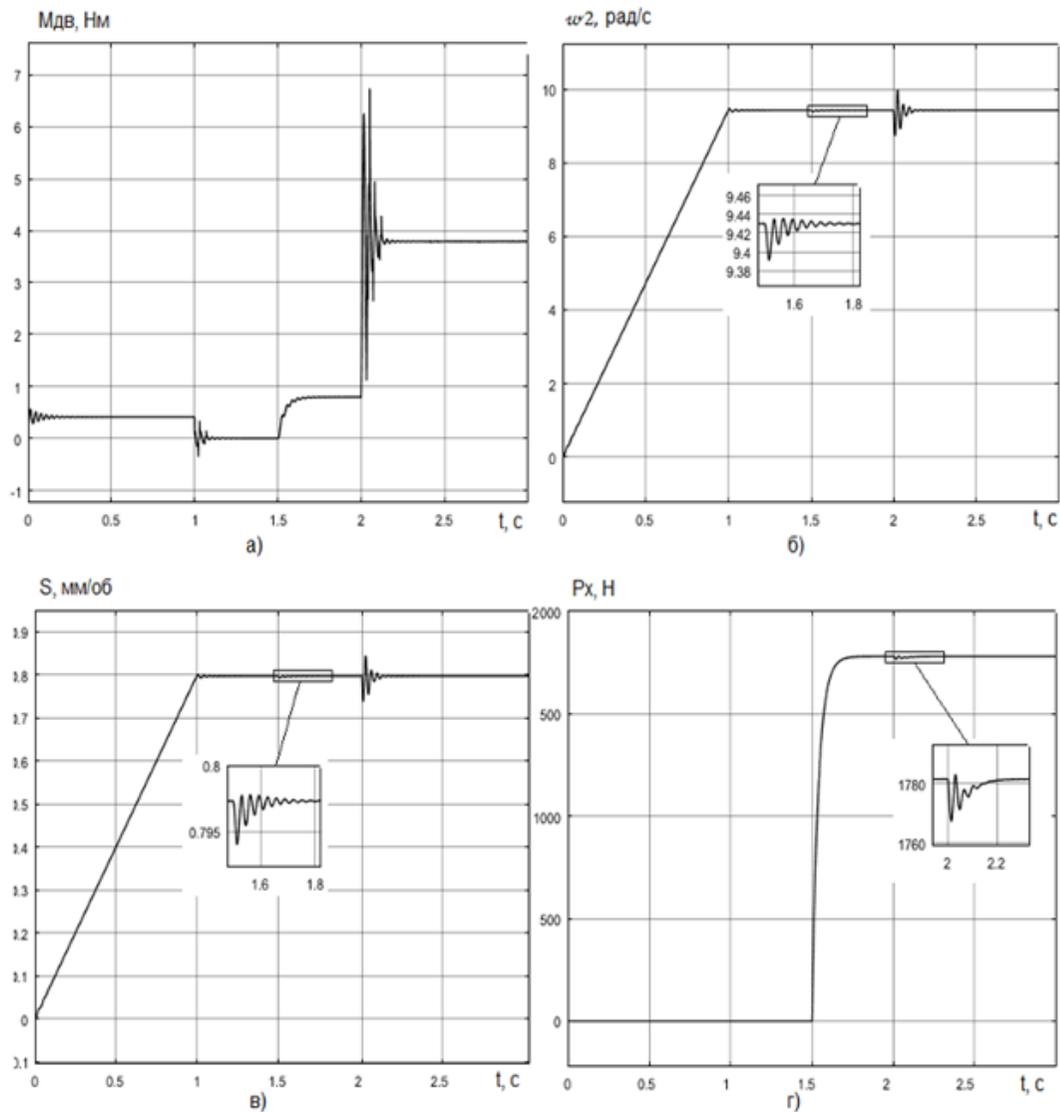


Рисунок 3.6 – Графіки перехідних характеристик структурної схеми системи управління приводом поздовжньої подачі: а) на момент електродвигуна $M_{дв}$; б) за кутовою швидкістю другої маси, ω_2 ; в) за швидкістю поздовжньої подачі, S ; г) по осьовому зусиллю різання P_x

Синтез системи управління стабілізації зусилля різання верстага

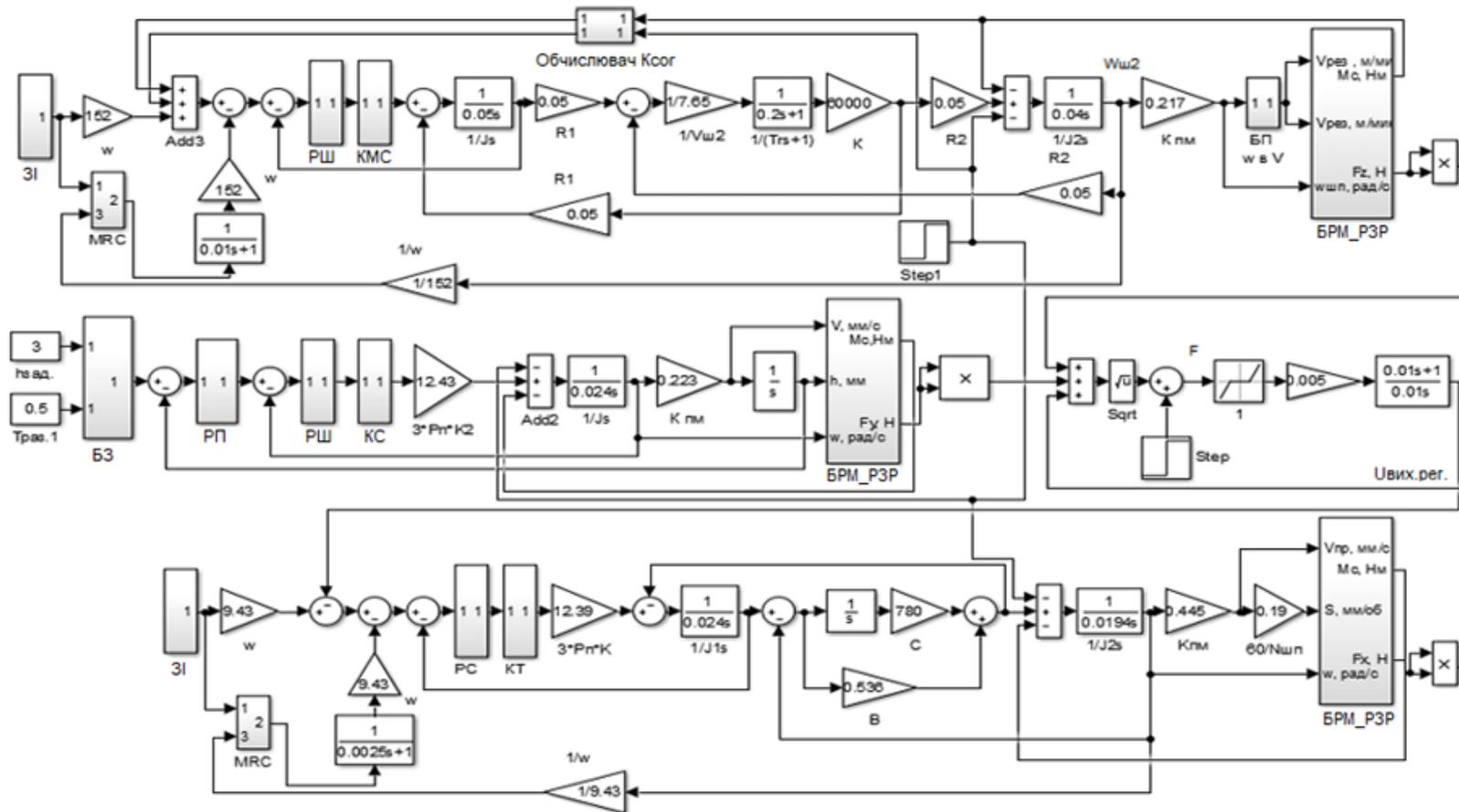


Рисунок 3.7 – Структурна схема стабілізації зусилля різання, що включає привод головного руху з урахуванням розтягування ремінної передачі і нейроконтроллером, привод поперечної подачі з урахуванням вигину заготовки, а також привод поздовжньої подачі з нейроконтроллером

ВИСНОВКИ

- Проведено аналіз сучасних систем керування електроприводами верстатів; найбільш перспективними визначено системи з нейрорегуляторами та вентильними двигунами завдяки високим динамічним характеристикам та широкому діапазону регулювання швидкості.
- Сформульовано основні вимоги до електроприводів головного руху та подачі: широкий діапазон регулювання, жорсткість, швидкодія, точність та плавність, що забезпечує підвищення довговічності та якості обробки.
- У Simulink розроблено систему керування приводом поздовжньої подачі з нестандартним задатчиком інтенсивності, яка демонструє хороші динамічні показники, але проявляє коливання при обурювальних впливах.
- Створено модель керування двомасовою системою з урахуванням пружності ремня та коригувальним коефіцієнтом, що забезпечує практично відсутню статичну похибку та дозволяє застосовувати метод до різних електроприводів із ремінною передачею.
- Доведено, що нейроконтролер є ефективним засобом керування електроприводом головного руху металорізального верстата.
- Розроблена система з NN Predictive Controller забезпечує покращені динамічні характеристики: час перехідного процесу зменшено на 34%, а перерегулювання — на 18% у порівнянні з класичним ПІ-регулятором.
- Система керування подачею з нейроконтролером (MRC) знижує пружні коливання та покращує динамічну якість приводу завдяки імпульсному характеру коригувальних дій.
- Виконано техніко-економічні розрахунки, які підтвердили економічну доцільність запропонованої системи та зменшення експлуатаційних витрат.
- Визначено основні вимоги щодо безпечної експлуатації електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих факторів навколишнього середовища.

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Високоєфективний метод управління електроприводом металорізального верстату

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕПА-24м

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 2,06 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Зав. кафедри КЕМСК Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

Гарант ОП

Проценко Д.П.

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Паянок О.А.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Богачук В.В.

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Некрутенко В.О.

(прізвище, ініціали)

08-24.МКР.007.00.000

Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Високоєфективний метод управління електроприводом металорізального верстату	Літ.	Маса	Масштаб
Розробляв:		Некрутенко В.О.	<i>[Signature]</i>	21.11				
Перевіряв:		Богачук В.В.	<i>[Signature]</i>	21.11				
1. контр.								
Оновив:		Розітченко Ю.	<i>[Signature]</i>	19.12				
Норм. кон.		<i>[Signature]</i>	<i>[Signature]</i>	24.11				
Затверд.		Монторіз М.М.	<i>[Signature]</i>	25.11				

Аркуш Аркушів
ВНТУ, гр. ЕПА-24м