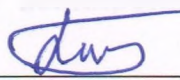


**Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова**

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматики
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри


(підпис)

I. С. Білюк

« 15 » 12 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва спеціальності)

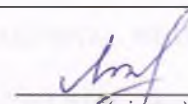
освітня програма Електромеханічні системи автоматизації та електропривод
(назва освітньої програми)

на тему: Автоматизований електропривод механізму нахилу
зварювального обертача

Виконав: студент групи 6371м

Лихой Дмитро Андрійович

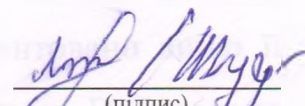
(прізвище, ім'я, по батькові)


(підпис)

Керівник

доц. каф. автоматики, к.т.н.,
доц. Зубарев А. А.

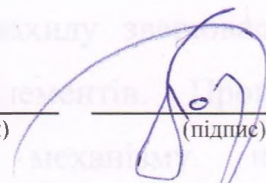
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)


(підпис)

Рецензент

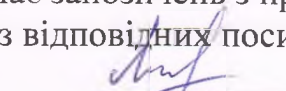
доц. каф. СЕЕС, к.т.н.,
доц. Новогрецький С. М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)


(підпис)

Засвідчую, що у цій кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент


(підпис)

м. Миколаїв – 2025 року

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 82 с., 4 р., 20 рис., 10 табл., 1 дод., 10 джерел.

Ключові слова: зварювальний обертач, моделювання, перехідна характеристика, привод нахилу, частотне керування.

Об'єкт дослідження – перехідні процеси в асинхронному електроприводі механізму нахилу зварювального обертача.

Мета роботи – синтез системи керування електропривода механізму нахилу зварювального обертача.

Методи дослідження – моделювання перехідних процесів в асинхронному електроприводі механізму нахилу зварювального обертача з використанням сучасної теорії автоматичного керування та електропривода, імітаційне моделювання в MATLAB, обробка та аналіз отриманих результатів.

У першому розділі розглянуто склад та призначення механічного зварювального обладнання. Наведено опис зварювального обертача М 11050А та проаналізовано склад його електрообладнання. Розділ 2 містить вибір та обґрунтування методу наукового дослідження, алгоритм дослідження та метод розв'язання поставленого завдання. У розділі 3 побудовано функціональну схему системи керування електропривода механізму нахилу та обґрунтовано вибір її елементів. Розроблено схему підключення перетворювача частоти. Побудовано модель системи керування електропривода механізму нахилу зварювального обертача та виконано розрахунок параметрів її елементів. Проведено моделювання системи керування електропривода механізму нахилу зварювального обертача в MATLAB та досліджено вплив параметрів регуляторів на якість керування. В розділі 4 розглянуті питання з охорони праці. Додаток містить слайди мультимедійної презентації.

ABSTRACT

Qualification work: 82 p., 4 p., 20 fig., 10 tab., 1 appendix, 10 sources.

Keywords: welding rotator, modeling, transient response, tilt drive, frequency control.

The object of research is transient processes in the asynchronous electric drive of the tilt mechanism of the welding rotator.

The purpose of the work is the synthesis of the control system of the electric drive of the tilt mechanism of the welding rotator.

Research methods are modeling of transient processes in the asynchronous electric drive of the tilt mechanism of the welding rotator using the modern theory of automatic control and electric drive, simulation modeling in MATLAB, processing and analysis of the obtained results.

The first section considers the composition and purpose of mechanical welding equipment. The M 11050A welding rotator is described and the composition of its electrical equipment is analyzed. Section 2 contains the selection and justification of the method of scientific research, the research algorithm and the method of solving the task. Section 3 builds a functional diagram of the control system of the electric drive of the tilt mechanism and justifies the choice of its elements. A connection diagram of the frequency converter is developed. A model of the control system of the electric drive of the tilt mechanism of the welding rotator is built and the parameters of its elements are calculated. The control system of the electric drive of the tilt mechanism of the welding rotator is simulated in MATLAB and the influence of the parameters of the regulators on the quality of control is investigated. Section 4 considers issues of labor protection.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ	6
1.1 Склад та призначення механічного зварювального обладнання	6
1.2 Універсальні зварювальні обертачі та позиціонери	12
1.3 Опис зварювального обертача М 11050А.....	13
1.4 Електрообладнання зварювального обертача	19
1.5 Висновки до розділу 1	25
2 ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ І ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	26
2.1 Вибір та обґрунтування методу наукового дослідження.....	26
2.2 Розробка алгоритму дослідження.....	28
2.3 Вибір методів розв’язання поставленої задачі.....	30
2.4 Висновки до розділу 2	33
3 АНАЛІЗ І УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	34
3.1 Побудова функціональної схеми системи керування та обґрунтування вибору її елементів	34
3.2 Математичний опис об’єкта керування та елементів системи керування	45
3.3 Дослідження динаміки системи керування	55
3.4 Висновки до розділу 3	66
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	67
4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів	67
4.2 Техніка безпеки	75
4.3 Висновки до розділу 4	78
ВИСНОВКИ.....	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	82
ДОДАТОК А. Мультимедійна презентація.....	83

ВСТУП

Актуальність теми. Технічні можливості електроприводів багато в чому визначають реалізацію технологічних можливостей і прийомів роботи зварювального устаткування і обладнання для суміжних технологій. Від технічних характеристик електроприводів зварювального устаткування залежать його техніко-технологічні можливості, а в результаті, застосування і конкурентоспроможність на ринку. Крім цього, слід зазначити, що сучасні електроприводи з новими характеристиками регулювання і керування істотно впливають на питання ціноутворення і тому вибір електропривода для зварювального обладнання – багатофакторне завдання.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є синтез системи керування електропривода механізму нахилу зварювального обертача. Щоб досягти поставленої мети, слід розв'язати наступні завдання:

- 1) розглянути склад та призначення механічного зварювального обладнання. Скласти опис зварювального обертача М 11050А та проаналізувати склад його електрообладнання;
- 2) побудувати функціональну схему системи керування електропривода механізму нахилу зварювального обертача та обґрунтувати вибір її елементів. Розробити схему підключення перетворювача частоти;
- 3) побудувати модель системи керування електропривода механізму нахилу зварювального обертача та виконати розрахунок параметрів її елементів;
- 4) провести моделювання системи керування електропривода механізму нахилу зварювального обертача в MATLAB та дослідити вплив параметрів регуляторів на якість керування.

Об'єкт дослідження. Перехідні процеси в асинхронному електроприводі механізму нахилу зварювального обертача.

Предмет дослідження. Структура та параметри регуляторів асинхронного електропривода механізму нахилу зварювального обертача, які впливають на якість керування.

Методи дослідження. Моделювання перехідних процесів в асинхронному електроприводі механізму нахилу зварювального обертача з використанням сучасної теорії автоматичного керування та електропривода, імітаційне моделювання в MATLAB, обробка та аналіз отриманих результатів.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Склад та призначення механічного зварювального обладнання

1.1.1 У комплект обладнання електрозварювального цеху сучасного машинобудівного заводу або будівельного підприємства входить обладнання двох видів: а) електротехнічне, тобто власне зварювальне обладнання, яке здійснює процес зварювання і його регулювання; до його складу входять зварювальні головки, автомати і напіваавтомати, зварювальні трансформатори та інші джерела живлення, контактні машини і т.д.; б) механічне обладнання, за допомогою якого здійснюються не зварювальні операції: складальні, транспортні, кантування, робоче і установче переміщення зварювальних органів, різні допоміжні операції. Поєднання, або агрегування, обладнання першого та другого видів дозволяє отримати комплексну механізовану установку або (при виконанні ряду послідовних операцій) потокову складально-зварювальну лінію, що складається з декількох машин і установок, розташованих в технологічній послідовності виготовлення зварюваного виробу і пов'язаних загальною системою міжопераційного транспорту.

Для поширених способів електрозварювання серійно випускають електротехнічне обладнання в вигляді зварювальних апаратів і машин, універсального типу та загального призначення. Ці машини і апарати, як правило, здійснюють механізацію (а іноді і автоматизацію) тільки основних зварювальних операцій, і то не в повній мірі, а допоміжні і суміжні операції (наприклад, складальні і транспортні) не виконують. Отже, для комплексної механізації і автоматизації зварювального виробництва наявності таких машин і апаратів явно недостатньо. Лише деякі спеціалізовані машини, що випускаються в індивідуальному і дрібносерійному виробництві, охоплюють більш повний комплекс операцій складально-зварювального циклу.

Функціональна обмеженість серійного електротехнічного зварювального обладнання особливо характерна для електродугових зварювальних автоматів і напівавтоматів, які не забезпечують виконання деяких зварювальних операцій, наприклад спрямування дуги за швом; початкового збудження дуги (при зварюванні на малій густині струму); заварка кратерів на початку і в кінці шва; включення подачі флюсу і його відсмоктування або увімкнення та вимикання захисного газу (в необхідній послідовності або синхронності з вмикання і вимиканням зварювального струму і руху по шву) і т.д. Без автоматичного виконання цих операцій комплексна автоматизація зварювального процесу і тим більше всього зварювального виробництва неможлива.

У багатьох випадках дугові зварювальні автомати не можуть виконувати основну функцію – зварювальний рух за швом. Це, в першу чергу, відноситься до завдань зварювання кільцевих швів, коли потрібно обертати виріб із заданою швидкістю відносно нерухомої зварювальної головки. У цих випадках, крім зварювального апарату, необхідно мати спеціальний механічний пристрій для обертання виробу, заблоковані з електросхемою всієї зварювальної установки.

Нерідко і прямолінійний зварювальний рух доцільно проводити спеціальними візками або пристроями, що не входять в комплект серійного зварювального автомата. Доводиться мати справу із ситуаціями, коли для безперервності та поточності технологічного процесу доцільно повідомляти зварювальний рух виробу, а не зварювальній голівці.

Слід згадати і про те, що серійне обладнання для дугового зварювання під флюсом, як правило, не забезпечено апаратами для відсмоктування флюсу і його рециркуляції. Тому установки для зварювання під флюсом повинні бути обладнані відповідною флюсового апаратурою.

Відносно функціональної обмеженості аналогічний стан справи і з обладнанням для багатьох інших видів зварювання – електронно-променевого, дифузійного у вакуумі, індукційного та радіочастотного, електрошлакового та ін.

Отже, цілком очевидно, що за допомогою серійного зварювального обладнання неможливо здійснювати комплексну механізацію не тільки зварювального

виробництва в цілому, але навіть і зварювальних процесів. Для цього потрібно ще ряд пристроїв і механізмів, що виконують як допоміжні операції зварювального процесу, так і деякі основні – складальні та зварювальні.

1.1.2 Механічне зварювальне обладнання поділяється на три основні групи (таблиця 1.1), кожна з яких охоплює кілька типів обладнання [1].

Таблиця 1.1 – Класифікація механічного зварювального обладнання

Група	Функціональне призначення	Тип обладнання
1	Складання зварних конструкцій і виробів (листових, корпусних, балкових та ін.)	А. Найпростіші переносні складальні пристрої (струбцини, домкрати, універсальні пристрої УСП та ін.) Б. Неповоротні складальні стенди та кондуктори В. Неповоротні складально-зварювальні кондуктори та стенди Г. Поворотні складально-зварювальні кондуктори Д. Складально-зварювальні комбайни
2	Установка, поворот і обертання зварюваних виробів	А. Неповоротні пристрої: стелажі, плити, столи і т.п. Б. Кантувачі та позиціонери В. Зварювальні обертачі і обертачі Г. Роликові стенди Д. Поворотні столи Е. Автооператори

Продовження таблиці 1.1

Група	Функціональне призначення	Тип обладнання
3	Установка і переміщення зварювальних апаратів (головок та ін.)	А. Несучі підйомно-поворотні колони Б. Зварювальні візки В. Спеціальні пристрої для переміщення зварювальної головки (каретки, багатокординатні супорти, контурні, копірні і т.д.)

1.1.2.1 Складальне обладнання призначене для фіксування і закріплення деталей зварюваної конструкції або її вузлів і забезпечення необхідної точності і якості збираних і зварюваних виробів. Залежно від функціонального призначення обладнання, що розглядається, поділяється власне на складальне, в якому виконуються тільки складальні операції, і складально-зварювальне, в якому здійснюються не тільки складальні, а й зварювальні операції. Крім того, розрізняють універсальне і спеціалізоване обладнання, стаціонарне і переносне, поворотне і неповоротне, з ручним і механізованим затискачем деталей. Зазвичай складальний пристрій містить основу і ряд фіксуючих і закріплюючих елементів. При цьому в якості основи часто застосовуються неповоротні пристрої: стелажі, плити, столи тощо; кантувачі і позиціонери; зварювальні обертачі і обертачі; роликові стенди; поворотні столи; автооператори для установки і повороту виробів, що зварюються. Обов'язковими елементами всіх складальних пристроїв є всілякі фіксатори і притискачі. До фіксаторів відносяться упори (постійні, поворотні, відкидні, висувні і знімні); установчі пальці (постійні, вставні і відкидні); призми (жорсткі і регульовані); шаблони. До закріплюючих елементів відносяться притискачі з ручним приводом (гвинтові, важільні, важільно-гвинтові, ексцентрикові) і з механізованим приводом (пневматичні, гідравлічні і магнітні). У сучасному механізованому зварювальному виробни-

цтві ці затискні пристрої (див. таблицю 1.1 – група 1, тип А) рідко використовуються у вигляді окремих, автономно діючих пристроїв. У переважній більшості представники цієї групи обладнання є складовими елементами більш складних комплексних складальних або складально-зварювальних пристроїв і кондукторів.

1.1.2.2 Обладнання, призначене для установки і повороту зварюваних виробів, об'єднує шість типів, з яких тип А представляють найпростіші неповоротні пристрої у вигляді стелажів, плит, столів та ін. Ці неповоротні пристрої призначені для укладання виробів при складанні, зварюванні, обробці або правленні. Більш складні поворотні пристрої призначені не тільки для первинної установки зварюваного виробу, але й для його оперативних поворотів при складанні, зварюванні, обробці, контролі та випробуваннях. Це обладнання поділяється за призначенням на обертачі, позиціонери, обертачі, кантувачі, роликові стенди і поворотні столи.

Звичайні зварювальні обертачі мають дві взаємно перпендикулярні осі повороту і призначені для нахилу виробів у зручне для зварювання положення і обертання їх зі зварювальною швидкістю при автоматичному, напівавтоматичному та ручному зварюванні кільцевих швів. Для механізації допоміжних робіт в зварювальному виробництві застосовуються багатокоординатні обертачі або автооператори, які автоматично виконують необхідні транспортно-підйомні і допоміжні операції при складанні і зварюванні виробів. Вони застосовуються, головним чином, в механізованих і автоматичних складально-зварювальних лініях.

Особливу категорію становлять спеціальні обертачі, якими зварник або складальник маніпулює, коли доводиться вести дистанційне зварювання або складання, тобто проводити операції складання або зварювання (або керувати ними) на відстані, наприклад, при складанні та зварюванні виробів в закритих камерах з радіоактивною атмосферою.

Позиціонери призначені для повороту і обертання виробів щодо двох взаємно перпендикулярних осей з установною (маршовою) швидкістю, а також для нахилу їх в зручну позицію при складанні, зварюванні або обробці. Таким чином, позиціонери, на відміну від зварювальних обертачів, не мають регульованої зварювальної швидкості обертання.

Зварювальні обертачі призначені для обертання виробів зі зварювальною швидкістю навколо однієї вісі при автоматичному, напівавтоматичному або ручному зварюванні кільцевих швів. Кантувачі потрібні для повороту (кантування) виробів і установки їх в зручне положення при складанні, зварюванні і обробці. Роликові стенди застосовуються для обертання циліндричних виробів зі зварювальною або маршовою швидкістю при складанні, зварюванні, обробці, контролі та випробуваннях зварних конструкцій. Поворотні столи призначені для обертання виробів з маршовою швидкістю навколо однієї вісі й установки їх в зручну позицію для збірки, зварювання або обробки.

1.1.2.3 Обладнання, призначене для закріплення і переміщення виконавчого органу зварювальної установки – зварювальної головки або апарату. При цьому переміщення може проводитися як з установною – маршовою швидкістю, так і з робочою – зварювальною. Обладнання цієї групи поділяється на три типи в залежності від конструкції несучого пристрою і ступеня його універсальності. Типи А і Б об'єднують механічні пристрої універсального призначення, тип В – спеціалізовані пристрої для переміщення зварювальних головок.

Механічні складально-зварювальні пристрої, які отримали найбільшого поширення в промисловості і в той же час найбільш складні за своєю конструкцією, в даний час об'єднані єдиним типажом. Це дозволило організувати серійне виробництво типового механічного зварювального устаткування в централізованому порядку.

Рекомендований типаж охоплює понад сто моделей механічного зварювального устаткування і засобів механізації, за допомогою яких компонуються різні механізовані складально-зварювальні установки. Його можна також вбудовувати в механізовані поточкові лінії. Багато моделей цього обладнання в свою чергу скомпоновані з уніфікованих типових вузлів і механізмів, які також випускаються в централізованому порядку.

1.2 Універсальні зварювальні обертачі та позиціонери

Під зварювальним обертачем розуміється такий механічний пристрій, за допомогою якого здійснюються повороти, нахил і обертання виробу зі зварювальною швидкістю при автоматичному і напівавтоматичному зварюванні кругових швів або при наплавленні циліндричних і конічних поверхонь. Обертач виконує також функції кантувача для установки виробів в положення, зручне для зварювання всіх швів в човник, або в горизонтальне положення.

Універсальні зварювальні обертачі побудовані по одному принципу. Він заснований на тому, що обертач, забезпечений кріпильною планшайбою або плитою, має дві взаємно перпендикулярні осі, навколо яких планшайба із закріпленням на ній виробом може повертатися або нахилитися. Одна з них є віссю обертання планшайби і являє собою шпindel обертача, а інша – горизонтальна і їй перпендикулярна – є віссю нахилу планшайби на кут до $90-135^\circ$. Привод планшайби забезпечує регулювання числа її оборотів в необхідних для зварювання межах, тобто забезпечує зварювальне обертання виробу при зварюванні кругових швів із заданою швидкістю. У приводі нерідко передбачається також перемикання на маршову, настановну швидкість обертання.

Позиціонери, на відміну від обертачів, не розраховані на зварювальне обертання виробу і призначені тільки для установки і повороту (кантування) виробу в зручну для зварювання позицію. Таким чином, їх можна було б віднести до категорії двохосових кантувачів, оскільки поворот (кантування) виробу можна здійснювати відносно двох взаємно перпендикулярних осей.

У конструктивному відношенні позиціонери відрізняються від обертачів головним чином тим, що в них відсутні пристрої для регулювання швидкості обертання планшайби. Повороти навколо обох осей позиціонера здійснюються тільки з настановною, маршовою швидкістю. У зв'язку з цим схема живлення і привод позиціонера значно простіше в порівнянні з приводом обертача, особливо якщо врахувати, що при автоматичному зварюванні на обертачі його схема живлення і привод обертання планшайби повинні бути заблоковані із зварювальною апаратурою та

органами керування всієї зварювальної установки, чого не потрібно для позиціонерів.

З точки зору комплексної механізації суттєва перевага обертачів перед позиціонерами полягає в їх більш високому ступені механізації, так як обертачі виконують не тільки допоміжні операції по кантуванню виробу, а й одну з основних зварювальних операцій – обертання виробу під час зварювання кругових швів.

За своїм призначенням зварювальні обертачі можна розділити на дві основні групи: універсальні обертачі загального призначення, в яких типорозміри зварювального виробу обмежені лише масою і габаритами, і спеціалізовані, призначені для зварювання однотипних виробів масового або серійного виробництва.

Універсальні обертачі випускаються різних типорозмірів, що відрізняються між собою вантажопідйомністю, розмірами планшайби і величиною допустимих моментів – вантажного (перекидального) і обертального, який викликається дисбалансом виробу. До числа універсальних обертачів можна віднести деякі багатокоординатні зварювальні обертачі, які, крім механізмів обертання і нахилу планшайби, мають ще механізми прямолінійного переміщення планшайби – супорти.

1.3 Опис зварювального обертача М 11050А

1.3.1 Зварювальний обертач моделі М 11050А призначений для обертання виробів зі зварювальною швидкістю при автоматичному зварюванні кругових швів під шаром флюсу або в захисному середовищі вуглекислого газу, а також для встановлення виробів у зручне положення при автоматичному або ручному зварюванні. Загальний вигляд зварювального обертача наведено на рисунку 1.1.

Технічні характеристики зварювального обертача М 11050А наведено в таблиці 1.2 [2].



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд зварювального обертача М 11050А

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики зварювального обертача М 11050А

Найменування параметра	Значення
Найбільший крутильний момент, Н·м:	
– на вісі обертання планшайби	1000
– відносно опорної площини планшайби	1600
Найбільша вантажопідйомність, кг	1000
Висота від рівня підлоги до осі обертання планшайби, мм	800
Висота від рівня підлоги до опорної площини планшайби, мм	900
Частота обертання планшайби, об/хв	0,05-2,5
Номінальна сила зварювального струму, А	1000
Найбільший кут нахилу планшайби, град	135
Швидкість нахилу планшайби, об/хв	1
Габаритні розміри, мм	1260×1200×900

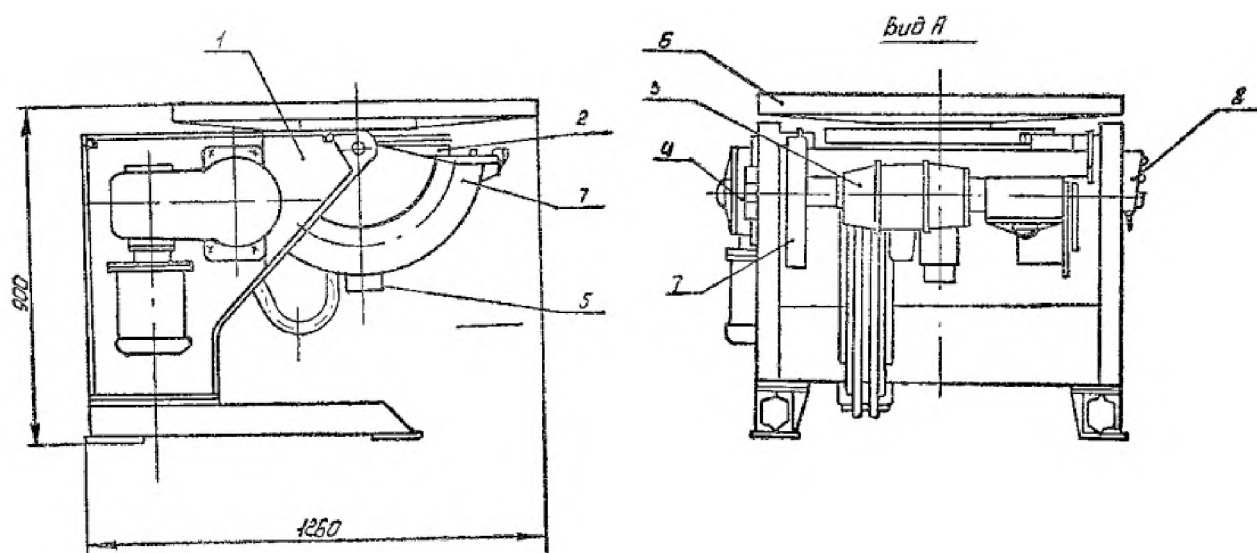
Продовження таблиці 1.2

Найменування параметра	Значення
Маса обертача (без електрошафи), кг	720
Розміри планшайби по діагоналі, мм	1240
Ширина Т-подібних пазів на планшайбі, мм	18
Діаметри отворів для приєднання пневматичних затискних пристроїв	1/8" ГОСТ 6111-52

1.3.2 Комплект поставки обертача М 11050А наведено в таблиці 1.3 [2]. Розташування складових частин обертача М 11050А наведено на рисунку 1.2.

Таблиця 1.3 – Комплект поставки обертача М 11050А

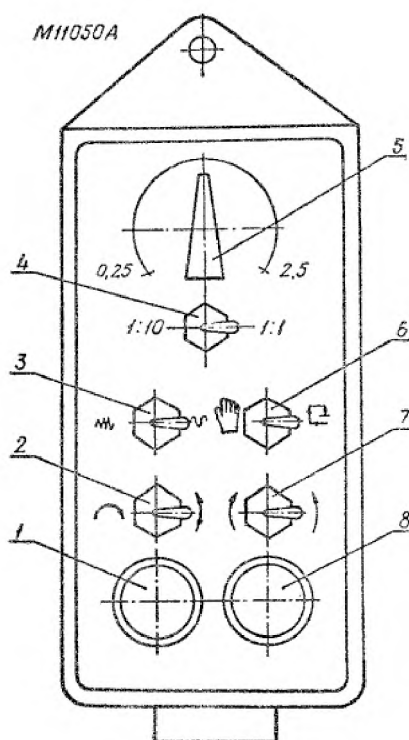
Позначення	Найменування	Кількість
061.104	Обертач зварювальний універсальний М 11050А	1
БУ3509	Пристрій керування однофазний нереверсивний	1
061.104.92	Пульт керування	1



- 1 – станина; 2 – стіл привідний; 3 – привод обертання; 4 – привод нахилу;
 5 – повітроприймач; 6 – планшайба; 7 – зубчастий сектор механізму нахилу;
 8 – пульт керування

Рисунок 1.2 – Розташування складових частин обертача М 11050А

1.3.3 Пульт керування обертача з позначенням органів керування приведений на рисунку 1.3.



- 1 – кнопка зупинника привода обертання або нахилу; 2 – перемикач вибору роботи привода обертання або нахилу; 3 – перемикач швидкості (маршова-зварювальна); 4 – перемикач діапазону частот обертання; 5 – ручка завдання частоти обертання; 6 – перемикач режимів (ручне керування або автоматичне); 7 – перемикач напрямлення обертання; 8 – кнопка вмикання привода обертання або нахилу

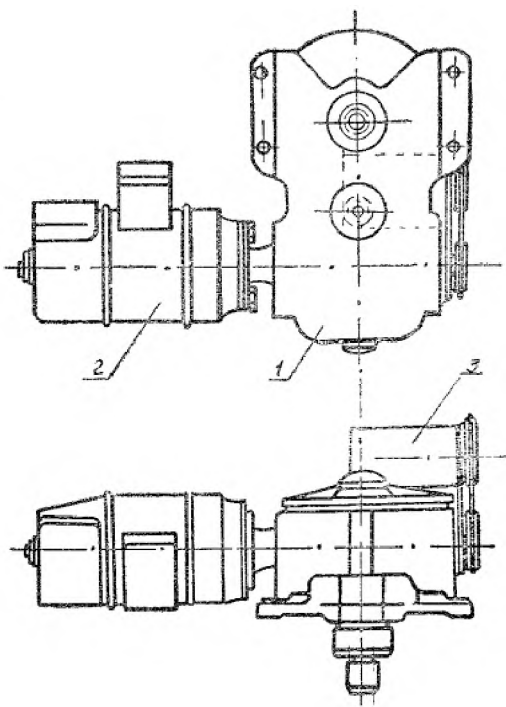
Рисунок 1.3 – Позначення органів керування обертача зварювального М 11050А

Станина є зварною несучою металоконструкцією, яка призначена для закріплення на ній привідного столу з усіма закріпленими на ньому вузлами. Збоку станини закріплений штир, на який підвішується пульт керування. Ззаду в станині є ніша, в якій розміщується електрообладнання. Також на станині присутні вантажні гвинти або отвори, які слугують для транспортування обертача. В нижній частині

розташований болт для під'єднання заземлюючого дроту. На боковій стінці станини обертача, з зовнішньої сторони, кріпиться привод нахилу столу, а з внутрішньої сторони – два кінцеві вимикачі, які розривають електричний ланцюг привода нахилу при досягненні столом граничних кутів нахилу. В нижній частині станини закріплений розподільовач, через який здійснюється з'єднання з зворотним дротом зварювального ланцюга, а також підведення стиснутого повітря до повітроприймача. Станина встановлюється на фундамент та кріпиться чотирма болтами.

Рама привідного столу є зварною несучою конструкцією і служить для закріплення на ній привода обертання, струмознімача, повітроприймача, а також для розміщення в її маточині підшипникового вузла обертання планшайби. Підшипниковий вузол обертання складається з валу, двох конічних роликів підшипників та великої циліндричної шестерні із внутрішніми зубами.

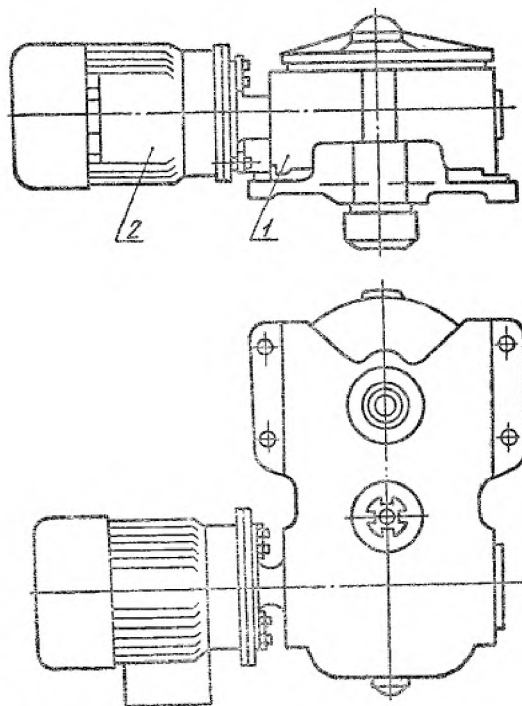
Привод обертання (рисунок 1.4) призначений для обертання планшайби із закріпленим на ній зварюваним виробом. Привод кріпиться до нижньої частини верхньої рами столу болтами та складається з черв'ячно-циліндричного редуктора 1, електродвигуна 2 й тахогенератора 3.



1 – черв'ячно-циліндричний редуктор; 2 – електродвигун; 3 – тахогенератор

Рисунок 1.4 – Привод обертання

Привод нахилу (рисунок 1.5) служить для нахилу зі сталою швидкістю столу з планшайбою від 0° до 135° . Кут нахилу визначається за стрілками, які закріплені на торцях півосей, що входять до підшипників ковзання станини. Привод нахилу кріпиться болтами до зовнішньої поверхні лівої опорної щоби станини й складається з черв'ячно-циліндричного редуктора 1, електродвигуна 2, який співвісно з'єднано з редуктором за допомогою гнучкої муфти.



1 – черв'ячно-циліндричний редуктор; 2 – електродвигун

Рисунок 1.5 – Привод нахилу

Зубчастий сектор служить для передачі обертання від привода нахилу до столу з планшайбою. Він встановлений на одну з піввісей та кріпиться до столу болтами та штифтами. До зубчастого сектора кріпляться обмежувальні кронштейни та упори, що діють на кінцеві вимикачі граничних кутів нахилу столу, які встановлені на внутрішній стороні щоби станини.

Планшайба (рисунок 1.6) служить для установки на неї зварюваного виробу. Являє собою квадратну плиту, яка має Т-подібні пази для болтів кріплення затискних пристроїв, які виготовлені споживачем для конкретного виробу. В центрі планшайби є отвір, яким вона надягається на маточину великої циліндричної шестерні

з внутрішніми зубами й кріпиться до неї гвинтами. На верхній площині планшайби є концентричні риси, які служать для орієнтації зварюваного виробу.

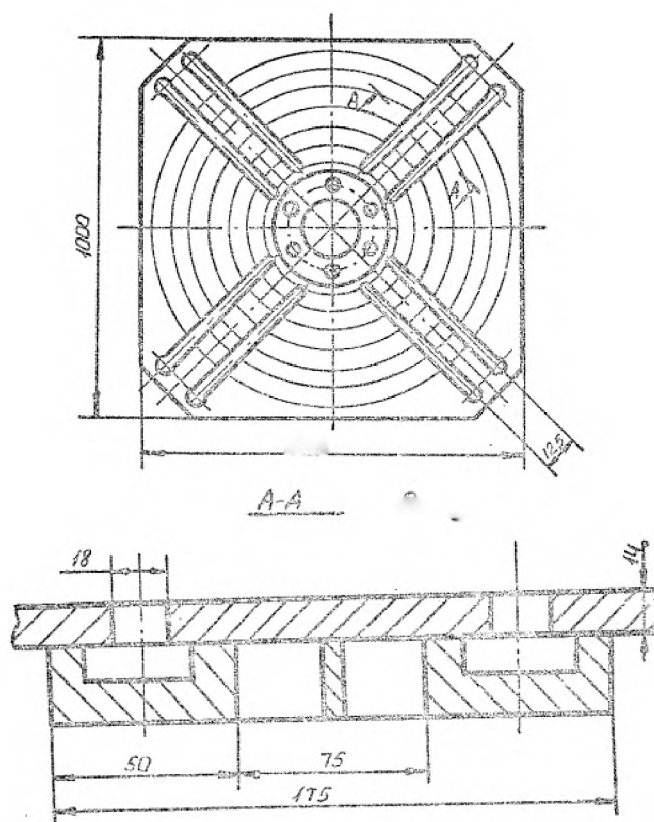


Рисунок 1.6 – Планшайба

1.4 Електрообладнання зварювального обертача

Технічна характеристика електрообладнання зварювального обертача М 11050А наведена в таблиці 1.4 [2].

Таблиця 1.4 – Технічна характеристика електрообладнання

Найменування параметра	Значення
Рід струму мережі живлення	змінний
Частота струму, Гц	50
Напруга, В	380

Продовження таблиці 1.4

Найменування параметра	Значення
Рід струму електропривода обертання планшайби	постійний від власного перетворювача
Напруга електропривода обертання планшайби, В	220 постійний
Рід струму електропривода нахилу планшайби	змінний, трифазний
Напруга електропривода нахилу планшайби, В	380
Напруга ланцюгів керування, В	110 змінний
Кількість електродвигунів на обертачі	2
Потужність електродвигуна привода обертання, кВт	1
Потужність електродвигуна привода нахилу, кВт	0,75
Частота обертання електродвигуна привода обертання, об/хв	60...3000
Частота обертання електродвигуна привода нахилу, об/хв	1500

Схема електрична принципова зварювального обертача М 11050А наведена на рисунку 1.7 [2].

При установці перемикача S1 в положення 1:10 резистор R5 шунтується резистором R9, що приводить к зменшенню опору задатчика, послідовно з ним вмикається резистор R6, який визначає номінальну частоту обертання на даному діапазоні, й резистор R7, який визначає мінімальну частоту обертання в цьому діапазоні.

При подачі напруги на схему увімкнеться пускач К8.1 або К8.2 в залежності від обраного перемикачем S5 напрямку обертання. При цьому головні контакти цього пускача умикають якір електродвигуна М1 до силових ланцюгів перетворювача А тієї полярності, яка відповідає обраному напрямку обертання. Реле К3 своїми контактами в зоні 2 визначає необхідну полярність якоря тахогенератора G. Реле К4 вимкнено та до його контакту в зоні 3 вмикають повзун R5, який визначає напругу завдання для руху на обраній швидкості. Реле К10 вимкнено, що визначає ручний режим роботи. Пускач К5 увімкнений, та його контакт в зоні 5 готує ланцюг К1 до увімкнення.

При натисканні кнопки S2 вмикається котушка К1 й стає на саможивлення по ланцюзі 51-58-59-52-54-55-56-57-N. Пускач К5 вимикається, розмикається ланцюг динамічного гальмування в зоні 1 та вмикається реле К2, яке своїми контактами в зоні 3 вмикає тиристорний перетворювач. Електродвигун М1 розганяється до заданої резистором R5 швидкості.

При натисканні кнопки S3 СТОП пускач К1 вимикається, що приводить до вимикання К2 – тиристорний перетворювач замикається. Потім вмикається К5 і відбувається зупинка двигуна з динамічним гальмуванням на резистор R1. Після закінчення часу, який необхідний для гальмування, часові контакти пускача К5 перемикаються. Контакт К5 в зоні 5 замикається, чим готує К1 до повторного вмикання, а контакт К5 в зоні 12 розмикається, що дає можливість здійснити перемикачем S5 перемикавання напрямку обертання двигуна М1.

При установці перемикача S4 в положення МАРШЕВА ШВИДКІСТЬ вмикається реле К4, яке своїми контактами в зоні 3 вмикає повзун резистора R5 і умикає клему 11 перетворювача А до точки 23, що визначає номінальну швидкість обертання. При натисканні на кнопку S2 електродвигун запускається аналогічно описаному вище, але розганяється до номінальної швидкості. Катушка К1 на саможивлення не стає, оскільки розімкнений контакт S4 в зоні 6 та при відпусканні кнопки S2 відбувається зупинка двигуна з гальмуванням. Повторний пуск можливий при натисканні на кнопку S2 за умови закінчення часу витримки пускача К5.

При установці перемикача S6 в положення АВТОМАТ, а перемикача S4 в положення РОБОЧА ШВИДКІСТЬ вмикається пускач K10. Контакти K10 в зоні 11 обривають ланцюг перемикача S5 та зміна напрямку обертання здійснюється контактами пускача K6 в зоні 12. В автоматичному режимі планшайба обертача обертається з робочою швидкістю тільки в одному напрямку, який заданий контактом K6 (51, 101) в зоні 12. Підведення виробу в точку початку зварювання відбувається на маршовій швидкості, причому в напрямку зворотному напрямку обертання на робочій швидкості. При натисканні на кнопку S2 відбувається пуск двигуна на маршовій швидкості, що здійснює прискорене підведення виробу до зварювального пальника. В кінці підведення спрацьовує мікрвимикач S8 від упору, який встановлений на зовнішньому ободі шестерні з внутрішнім зачепленням, в місці початку зварювання. Вмикається K6 й стає на саможивлення. Ланцюг живлення котушки K1 обривається й K1 вимикається. Двигун зупиняється аналогічно описаному вище.

Вмикання контактів K6 та K8.1 в зоні 13 приводить до подачі сигналу на зварювальне обладнання про початок зварювання. Замикання контакту від зварювального обладнання в зоні 7 – ланцюг 51-60 приведе до повторного вмикання K1, й двигун знову почне обертатися. Через те, що контакт K6 в ланцюзі котушки K4 розімкнений, розгін електродвигуна M1 відбудеться до швидкості, яка встановлена задатчиком R5 та перемикачем S1. При своєму подальшому русі із зварювальною швидкістю відбудеться натискання упору, який встановлений на барабані в положенні закінчення зварювання (на мікрвимикач S9), однак завдяки контакту K1, який замикається з витримкою часу (достатньою для проходження з належною швидкістю від упору S8 за упор S9) в зоні 10, реле K7 не увімкнеться і ніяких змін в роботі не відбудеться. В кінці зварювання натискання на S9 приведе до вмикання K7, який розірве свій контакт в зоні 7 й живлення K1 припиниться, що приведе до зупинки електродвигуна. Замикання контакту K7 (в подальшому K5) в ланцюзі 98-99 в зоні 14 відсилає команду на зварювальне обладнання про закінчення зварювання, після чого контакт в ланцюзі 51-60 повинен розімкнутися. Через витримку часу контакт K7 в зоні 9 розімкнеться, й реле K6 та K7 вимкнеться, що приведе схему у вихідне положення.

Розміщення упорів, які діють на мікровимикачі S8 та S9, повинна бути такою, щоб привод обертання відпрацьовував зварювання повної окружності з перекриттям.

Для обертача при установці перемикача S7 в положення НАХИЛ ланцюг котушки K1 розмикається, а ланцюг живлення K9.1 та K9.2 готується до вмикання. Перемикачем S5 здійснюється вибір напрямку руху привода нахилу. При натисканні на кнопку S2 відбувається вмикання одного з пускачів K9.1-K9.2 (без самоблокування), який вмикає електродвигун M2. При відпусканні кнопки пускач вимикається й двигун зупиняється з гальмуванням, обумовленим розрядом конденсаторів C8. Нахил планшайби в кінцевих положеннях обмежений кінцевими вимикачами S10 та S11.

Електросхема передбачає наступні блокування:

- під час обертання планшайби вмикання привода нахилу неможливе;
- під час обертання планшайби зміна напрямку обертання неможлива;
- в режимі АВТОМАТ при випадковому перемиканні перемикача S7 на пульті керування обертача в положенні НАХИЛ вимикається K1, вмикаючи K5, замкнений контакт якого в зоні 14 дає імпульс на вимикання зварювання.

Захист ланцюгів тиристорного перетворювача здійснюється плавкими запобіжниками F-1 та F-2, які встановлені в блоці А. Захист електродвигуна привода нахилу планшайби й первинної обмотки трансформатора Т здійснюється автоматичним вимикачем F-1. Захист ланцюгів керування здійснюється плавким запобіжником F-3. Захист електродвигуна привода обертання планшайби від перевантажень здійснюється за допомогою теплового реле F-2 та вузла струмообмеження тиристорного перетворювача А. Захист від спонтанних вмикань при подаванні напруги – мінімальний захист забезпечується котушками реле та пускачів.

1.5 Висновки до розділу 1

1.5.1 Розглянуто склад та призначення механічного зварювального обладнання. Виявлено, що механічне зварювальне обладнання за функціональним призначенням поділяється на три основні групи. Зварювальні обертачі відносять до 2 групи. Обладнання цієї групи призначене для установки, повороту і обертання зварюваних виробів. Зварювальні обертачі мають дві взаємно перпендикулярні осі повороту і призначені для нахилу виробів у зручне для зварювання положення і обертання їх зі зварювальною швидкістю при автоматичному, напівавтоматичному та ручному зварюванні кільцевих швів.

1.5.2 Наведено опис зварювального обертача моделі М 11050А. Обертач призначений для обертання виробів зі зварювальною швидкістю при автоматичному зварюванні кругових швів під шаром флюсу або в захисному середовищі вуглекислого газу, а також для встановлення виробів у зручне положення при автоматичному або ручному зварюванні. Складовими частинами обертача є стіл привідний, привод обертання, привод нахилу, повітроприймач, планшайба, зубчастий сектор механізму нахилу, пульт керування. Привод нахилу складається з черв'ячно-циліндричного редуктора, електродвигуна, який співвісно з'єднано з редуктором за допомогою гнучкої муфти.

1.5.3 Проаналізовано склад електрообладнання обертача. Згідно технічних характеристик обертач має 2 електродвигуни: для привода обертання планшайби використано електродвигун постійного струму потужністю 1 кВт, для привода нахилу планшайби – електродвигун змінного струму потужністю 0,75 кВт. Електропривод нахилу планшайби нерегульований.

2 ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ І ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Вибір та обґрунтування методу наукового дослідження

Метод (від грецького *methodos* – шлях до чого-небудь) – в найбільш загальному випадку означає засіб досягнення мети, спосіб дослідження явища, який визначає планомірний підхід до їх наукового пізнання та встановлення істини. Науковий метод – це спосіб пізнання явищ дійсності в їх взаємозв'язку та розвитку, спосіб досягнення поставленої мети і завдань дослідження і відповідає на запитання: «Як пізнавати?».

Методика дослідження – це система правил використання методів, прийомів та способів для проведення будь-якого дослідження. Свідоме застосування науково-обґрунтованих методів слід розглядати як найсуттєвішу умову отримання нових знань.

Кожний метод наукового пізнання слід розглядати як систему регулятивних принципів практичної і теоретичної діяльності людини. Методів пізнання об'єктивної дійсності відомо дуже багато. Правильний вибір методів дослідження потребує знання їх класифікації.

Досить поширеним є поділ основних типів методів за двома ознаками: мети і способу реалізації.

За першою ознакою виділяються так звані первинні методи, що використовуються з метою збору інформації, вивчення джерел, спостереження, опитування та ін. Вторинні методи використовуються з метою обробки та аналізу отриманих даних – кількісний та якісний аналіз даних, їх систематизація, шкалювання та ін.

Візуальні, або графічні, методи – графи, схеми, діаграми, картограми та ін. дають змогу отримати синтезоване уявлення про досліджуваний об'єкт і водночас наочно показати його складові, їхню питому вагу, причинно-наслідкові зв'язки, інтенсивність розподілу компонентів у заданому об'ємі. Ці методи тісно пов'язані з комп'ютерними технологіями.

У прикладних аспектах гуманітарних наук доцільно використовувати математичні методи. Математичний апарат теорії ймовірностей дає можливість вивчати масові явища в соціології, лінгвістиці. Математичні методи відіграють важливу роль при обробці статистичних даних, моделюванні.

Сучасна методологія вкладає новий зміст у традиційне уявлення про теоретичні (математичні) та емпіричні (експериментальні) методи дослідження в природних і технічних науках.

Складовою частиною наукових досліджень є експеримент.

Експеримент представляє собою науково поставлений дослід або спостереження явища або процесу в точно враховуваних умовах, що дозволяють стежити за ходом експерименту, керувати ним, відтворювати його щоразу при повторенні цих умов.

Серед відомих методів дослідження складних електромеханічних систем можна виділити фізичне, імітаційне, аналогове та математичне моделювання.

Метод фізичного моделювання передбачає дослідження на моделі, яка відтворює основні геометричні, фізичні, динамічні та функціональні характеристики та властивості оригіналу (але не обов'язково всі властивості) та має великі можливості з визначення різноманітних якостей електромеханічних систем ті їх елементів.

Метод математичного моделювання ґрунтується на здатності математично описувати рівняннями різні за природою явища (процеси) та виявляти різні функціональні зв'язки між елементами системи.

Аналогове моделювання базується на однаковому для моделі та натури математичному описі та використовується для імітації на основі аналогової фізичної системи по її елементам. При цьому кожному з фізичних елементів натури в моделі відповідає певний еквівалент. У якості моделей використовуються електричні кола, складені з пасивних та активних елементів.

При математичному моделюванні застосовуються аналітичні та статистичні моделі. Аналітичні моделі більш грубі, враховують менше число факторів, завжди

потребують деяких припущень та спрощень. Проте вони більше пристосовані для пошуку оптимальних рішень.

Комп'ютерна модель (або чисельна) – комп'ютерна програма, яка реалізує абстрактну модель деякої системи. Комп'ютерні моделі використовуються для отримання нових знань про об'єкт, що моделюється або для приблизної оцінки поведінки математичних систем, які досить складні для аналітичного дослідження. Комп'ютерне моделювання є одним з ефективних методів вивчення складних систем. Комп'ютерні моделі простіші та їх зручніше досліджувати в силу можливості проводити обчислювальні експерименти в тих випадках, коли реальні експерименти немає можливості проводити через фінансові труднощі або фізичні перешкоди. Для підтримки математичного моделювання розроблені системи комп'ютерної математики, наприклад, Maple, Mathematica, Mathcad, MATLAB, Scilab, VisSim та інші. В даній роботі використовується програма Simulink пакету MATLAB.

2.2 Розробка алгоритму дослідження

Методологія – це система базисних принципів, методів, методик, способів і засобів їх реалізації в організації та побудові науково-практичної діяльності. Вона включає в себе методи теоретичного та емпіричного пізнання і являє собою алгоритм пошуку і досягнення мети.

Основне призначення методики дослідження полягає у тому, щоб на основі відповідних принципів (вимог, умов, обмежень тощо) забезпечити успішне вирішення визначених мети і завдань наукового дослідження.

Алгоритм дослідження представлено в табличній формі (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Алгоритм дослідження

Синтез системи керування привода нахилу планшайби зварювального обертача	
Складання індивідуального календарного плану роботи	
Пошук літератури за темою, її аналіз, складання бібліографії	
Підготовка теоретичної частини	Ознайомлення зі складом та призначенням механічного зварювального обладнання
	Опис зварювального обертача М 11050А
	Аналіз електрообладнання зварювального обертача
	Побудова функціональної схеми системи керування та обґрунтування вибору її елементів
	Математичний опис об'єкта керування та елементів системи керування
Опис процесу дослідження	Моделювання системи керування електропривода механізму нахилу зварювального обертача в MATLAB
	Дослідження впливу параметрів регуляторів на якість керування
Узагальнення результатів моделювання	Аналіз і узагальнення результатів досліджень
	Інтерпретація отриманих результатів дослідження
	Формулювання висновків
Узагальнення науково-теоретичних результатів	
Розробка заходів з охорони праці	

Алгоритм складено на підставі головних завдань дослідження і наочно відображає його послідовність: мотивацію; формулювання проблеми дослідження; пошук теоретичної основи розв'язання проблеми; розв'язання проблеми. Він розкриває процедуру дослідження і встановлює логічну послідовність виконання структурних розділів і підрозділів кваліфікаційної роботи.

2.3 Вибір методів розв'язання постановленої задачі

Кваліфікаційна робота не передбачає проведення експериментальних досліджень, має теоретичний характер, тому основним методом для відображення отриманих результатів є моделювання.

Моделювання як метод наукового пізнання виникло в зв'язку з необхідністю вирішення завдань, які з тих чи інших причин не можуть бути вирішені безпосередньо. Вони виникають у випадках, коли об'єкт або недосяжний для дослідника, або він ще не існує і потрібно обрати оптимальний варіант його створення, або дослідження реального об'єкта вимагає багато часу та економічно не вигідне тощо. Таким чином, модель виконує функцію проміжної ланки між дослідником та об'єктом пізнання. Метод моделювання передбачає, що об'єкт вивчається не безпосередньо, а шляхом дослідження іншого об'єкта, який є аналогом першого.

Модель (від лат. *modulus* – міра) – це певний умовний образ об'єкта дослідження, котрий замінює останній і перебуває з ним у такій відповідності, яка дозволяє отримати нове знання. Модель будується для того, щоб відобразити характеристики об'єкта (елементи, взаємозв'язки, структурні та функціональні властивості), суттєві з точки зору мети дослідження. Отже, моделювання пов'язане зі спрощенням, огрубінням прототипу, абстрагуванням від ряду його властивостей, ознак, сторін.

Характерною ознакою моделей можна вважати їх спрощеність стосовно оригіналу або реальної життєвої ситуації, яку моделюють. Спрощеність моделей є неминучою, тому що оригінал лише в обмеженій кількості відношень відображується в моделі.

Отже, моделювання з точки зору наукового дослідження – це метод опосередкованого пізнання за допомогою штучних або природних систем, які зберігають певні особливості об'єкта і, таким чином, замінюючи його, дають змогу отримати нове знання про оригінал.

У системному аналізі моделі є дуже важливим компонентом дослідження та проектування нових систем. Не менш важливий і прагматичний аспект моделювання, при якому модель розглядається як засіб керування системою.

Модель є цільовим відображенням об'єкта-оригіналу, що виявляється у множинності моделей одного й того ж об'єкта, тобто для різної мети або завдань дослідження можна будувати різні моделі, тому мета або завдання дослідження визначають, які саме ознаки системи мають бути відображені в моделі. Процес дослідження реальних систем, що охоплює побудову моделі, дослідження її властивостей і перенесення одержаних відомостей на реальну систему, називають моделюванням.

Основна функція моделі – це її використання як засобу пізнання. До конкретизованих (похідних від основної) функцій належать: засіб наукового осмислення дійсності, засіб спілкування, засіб навчання і тренування, інструмент прогнозування, засіб постановки та проведення експерименту.

Головними рівнями дослідження та моделювання систем є мікро- та макро-рівень. Мікрорівневе моделювання системи пов'язане з детальним описом кожного компонента системи, дослідженням її структури, функцій, взаємозв'язків, тощо.

Макрорівневе моделювання полягає в ігноруванні детальної структури системи та вивченні лише загальної поведінки системи як єдиного цілого.

Для детальнішого опису систем використовують моделі складу та моделі структури. Модель складу системи відображає, з яких елементів і підсистем складається система, а модель структури застосовується для відображення відношень між елементами та зв'язків між ними.

Модель структури описує суттєві зв'язки між елементами та підсистемами. При використанні графічних моделей будову систем подають у вигляді так званих структурних схем. Структурні схеми наглядні та містять інформацію про велику кількість властивостей системи.

Залежно від форми подання об'єкта моделювання поділяють на реальне та абстрактне.

При реальному моделюванні використовують можливість дослідження характеристик на реальному об'єкті чи на його частині, а при натурному – проводять дослідження на реальному об'єкті з подальшим обробленням результатів експерименту на основі теорії подібності.

Метод фізичного моделювання передбачає дослідження на моделі, що відтворює основні геометричні, фізичні, динамічні і функціональні властивості “оригіналу” і володіє великими можливостями по визначенню різних якостей електро-механічних систем та їх елементів.

Абстрактне моделювання має різні види: наочне, символічне, математичне. Метод математичного моделювання заснований на здатності математично описувати рівняннями різноманітні за природою явища (процеси) і виявляти різні функціональні зв'язки між елементами системи.

При математичному моделюванні застосовують аналітичні та статистичні моделі. Аналітичні моделі більш грубі, враховують менше число чинників, завжди вимагають деяких припущень і спрощень, проте вони більш пристосовані для пошуку оптимальних рішень. Статистичні методи в порівнянні з математичними громіздкі і погано осяжні.

Дослідження математичної моделі дає змогу отримати характеристики реального об'єкта чи системи. Вигляд математичної моделі залежить як від природи системи, так і від завдань дослідження. Математична модель системи містить, як правило, опис множини можливих станів системи та закон переходу з одного стану в інший. Математичне моделювання охоплює імітаційне, інформаційне, структурне, ситуаційне тощо.

На етапі вибору математичної моделі встановлюються: лінійність і не лінійність об'єкта, процесу або системи, динамічність або статичність, стаціонарність або не стаціонарність, а також ступінь детермінованості досліджуваного об'єкта чи процесу. При математичному моделюванні свідомо відволікаються від конкретної фізичної природи об'єктів, процесів або систем і, в основному, зосереджуються на вивченні кількісних залежностей між величинами, що описують ці процеси.

На базі складених диференційних рівнянь проводиться математичне моделювання системи керування електропривода. За допомогою програми Simulink досліджуються перехідні характеристики системи при зміні задавальних параметрів.

Слід зазначити, що метод моделювання – вивчення явищ за допомогою моделей – сьогодні має особливе значення для вирішення складних фізичних завдань, чому значною мірою сприяє зростання продуктивності обчислювальної техніки. Саме тому в представленій роботі як основа використано метод моделювання.

2.4 Висновки до розділу 2

2.4.1 Для дослідження автоматизованого електропривода в роботі обрано математичне моделювання, яке сьогодні є одним з ефективних методів вивчення складних систем.

2.4.2 На підставі головних завдань дослідження розроблено алгоритм дослідження, який наочно відображає його послідовність: мотивацію; формулювання проблеми дослідження; пошук теоретичної основи розв'язання проблеми; розв'язання проблеми.

2.4.3 Моделювання є основним методом для отримання результатів, оскільки робота має теоретичний характер. На базі складеної математичної моделі системи керування електропривода в програмі Simulink пакету MATLAB проводиться математичне моделювання та досліджуються перехідні процеси.

3 АНАЛІЗ І УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Побудова функціональної схеми системи керування та обґрунтування вибору її елементів

3.1.1 Побудова функціональної схеми

Для здійснення можливості регулювання моменту і швидкості в сучасних електроприводах використовуються векторний та скалярний методи частотного керування.

Найбільшого поширення набули асинхронні електроприводи зі скалярним керуванням. Його використовують в приводах механізмів в яких необхідно утримувати на певному рівні або швидкість обертання валу електродвигуна (застосовується датчик швидкості), або якогось технологічного параметра. Завдяки скалярному керуванню забезпечується перевантажувальна здатність асинхронного двигуна, що не залежить від частоти напруги. Максимальне значення діапазону скалярного керування, при якому можливе здійснення регулювання значення швидкості обертання ротора електродвигуна, без втрати моменту опору не перевищує 1:10.

Електропривод нахилу планшайби зварювального обертача відноситься до позиційних електроприводів, в яких на відміну від електроприводів зі швидкісним технологічним режимом роботи, вхідний сигнал системи керування задає не значення швидкості, а значення переміщення робочого органу – планшайби. Електропривод здійснює поворот планшайби з деякої початкової позиції в деяку кінцеву позицію з необхідною точністю зупинки в ній. Режим відпрацювання електроприводом заданого переміщення називається позиціонуванням.

Основним показником якості електропривода нахилу планшайби є точність позиціонування, тобто різниця між заданим і відпрацьованим переміщеннями в даний момент часу. Цей показник називається також неузгодженістю, або помилкою. Для кутової координати планшайби це різниця між заданим кутом γ_3 і кутом виконавчого валу γ : $\delta = \Delta\gamma = \gamma_3 - \gamma$.

Структурною ознакою позиційного електропривода є наявність зворотного негативного зв'язку за положенням. Утворений за допомогою зворотного зв'язку замкнений контур регулювання положення складається з двох частин (рисунок 3.1) системи керування положенням і об'єкта керування – швидкісної підсистеми, яка представляє собою систему керування частотою обертання ротора асинхронного електродвигуна (АД), що складається з електродвигуна і перетворювача частоти (ПЧ). Виділена в складі позиційного електропривода швидкісна підсистема являє собою регульований електропривод з вихідною координатою – швидкістю планшайби із вхідною координатою – напругою завдання швидкості $u_{зш}$, яка формується за допомогою системи керування положенням.

До системи керування положенням входять: регулятор положення (РП), датчик положення ВQ, вузол Σ_0 підсумовування напруги керування положенням (кутом повороту) вихідного валу АД $u_{зп}$ та зворотного негативного зв'язку за положенням $u_{дп}$.

В свою чергу контур швидкості включає датчик швидкості BR, вузол Σ_5 підсумовування напруг керування швидкістю АД $u_{зш}$ й зворотного негативного зв'язку за швидкістю $u_{дш}$, регулятор швидкості (РШ), блок обмеження (БО) його вихідної напруги $u_{рш}$, а також вузол Σ_4 підсумовування напруги $u_{рш}$ і результуючої напруги з виходу суматора Σ_1 .

У міру збільшення навантаження на валу АД за рахунок зменшення швидкості й, отже, сигналу $u_{рш}$ збільшується сигнал неузгодженості $\delta = u_{зш} - u_{дш} = \omega_{00} - \omega = s_a$, пропорційний абсолютному ковзанню двигуна. Тут ω_{00} – задана швидкість ідеального холостого ходу АД, що відповідає вхідному сигналу керування $u_{зш}$; ω – реальна швидкість АД при заданому навантаженні на його вал. При $\delta \neq 0$ сигнал $u_{рш}$ на виході регулятора швидкості, підсумовуючись із сигналом $u_{зш}$ (при $I_1 < I_{1\max}$), за рахунок інтегральної передавальної функції регулятора РШ забезпечує таке збільшення сигналу керування u_f перетворювачем частоти, при якому частота вихідної напруги стає рівною $f_{10}(1+s_a)$. Одночасно із зміною частоти за рахунок функціонального перетворювача струму (ФС) змінюється у порівнянні з початковою напру-

гою U_{10} і вихідна напруга перетворювача U_1 . При цьому швидкість двигуна віднолюється до заданого значення ω_{00} , тобто забезпечується абсолютна жорсткість механічної характеристики АД.

Для захисту перетворювача частоти й двигуна від перевантажень по струму використовується режим струмової відсічки за допомогою суматора Σ_3 і пристрою А4. При $I_1 > I_{1\max}$ на вхід регулятора струму відсічення А3 надходить сигнал перевищення струму статора вище допустимого. Вихідний сигнал А3 $u_{\text{відс}}$ може впливати як на зменшення вихідної напруги ПЧ (вузол Σ_2), так і одночасно на зменшення частоти живлення АД (вузол Σ_1).

При впливі тільки на вихідну напругу перетворювача, за умови, що регулятор А3 має інтегральний канал регулювання, за рахунок негативного зворотнього зв'язку за струмом перетворювач ПЧ із джерела напруги переходить у режим джерела струму. Тоді при сталому струмі статора АД за рахунок більшого коефіцієнта зворотнього зв'язку регулятора А3 (для ПІ-регулятора - нескінченно великого), ніж пристрою А1, при зниженні швидкості буде зменшуватися потік і момент двигуна, викликаючи перекидання механічної характеристики АД. Подібний режим роботи відсічки використовується лише разом з одночасним впливом на вихідну частоту перетворювача.

При перевищенні максимально припустимого струму статора АД ($I_1 > I_{1\max}$, відповідно, $M > M_{\max}$), регулятор швидкості повинен бути виключений з роботи, наприклад, шляхом обмеження його вихідного сигналу $u_{\text{РШ}}$ на рівні $u_{\text{РШ}\max}$. При цьому вступають у роботу негативні зворотні зв'язки за струмом статора з регулятором А3, забезпечуючи за рахунок одночасного зменшення частоти й напруги статора АД до їхніх мінімальних значень $f_{1\min}$ і $u_{1\min}$ обмеження моменту АД при $\omega=0$ на рівні $M_{\max}$. Мінімальна синхронна швидкість двигуна $\omega_{0\min}$ буде відповідати значенням $f_{1\min}$ і $u_{1\min}$. Стійкість і динамічні показники якості регулювання швидкості АД визначаються вибором параметрів пропорційної і інтегральної складової передавальної функції регуляторів РШ і А3 [3].

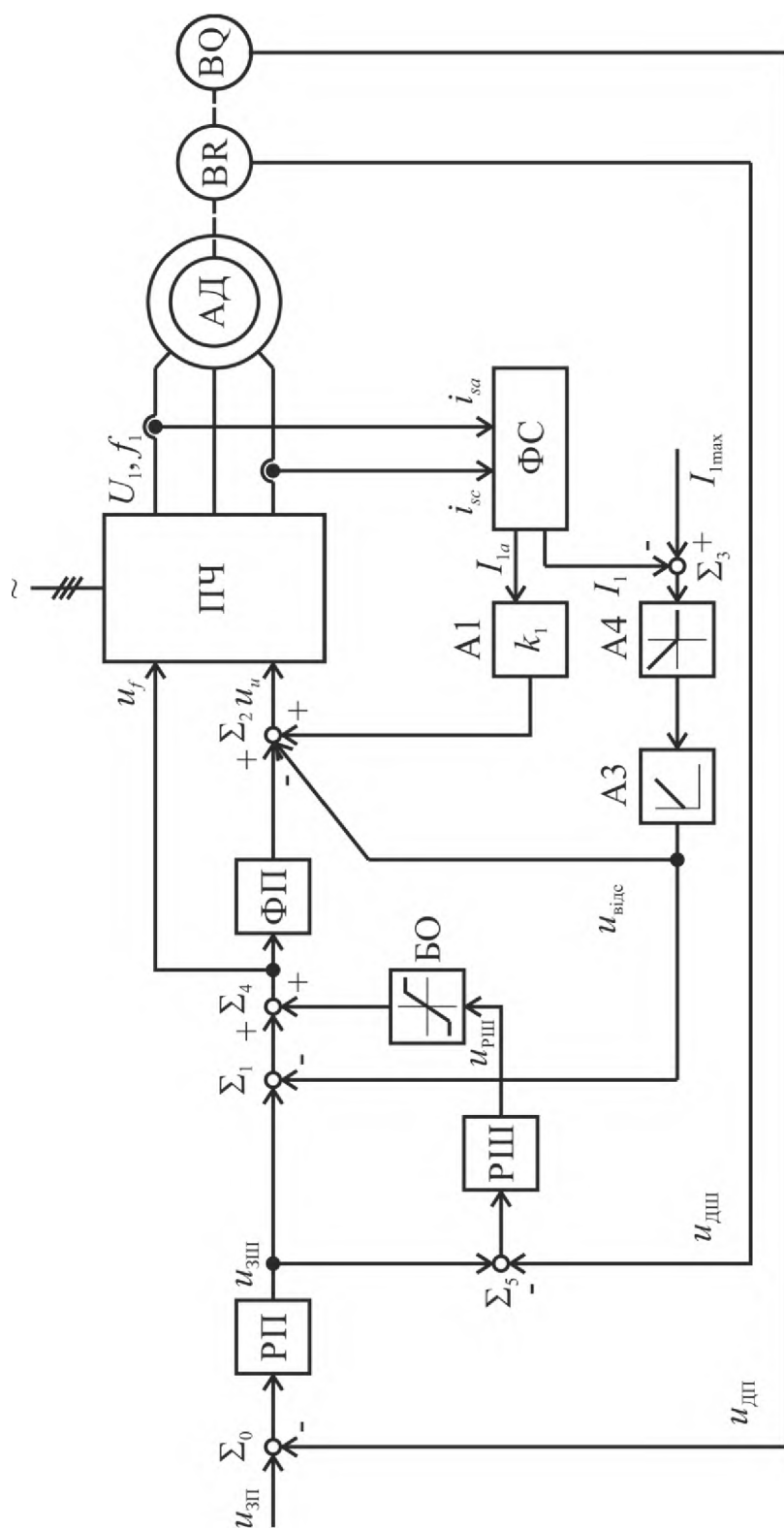


Рисунок 3.1 – Функціональна схема автоматизованого електропривода нахилу планшайби

3.1.2 Вибір елементів системи керування

3.1.2.1 Нахил планшайби здійснюється через конічно-циліндричний мотор-редуктор Lenze GKS09-4M з асинхронним двигуном MHEMABR090-12C1C [4]. Основна перевага конічно-циліндричних редукторів полягає в тому що вони здатні виробляти надзвичайно точні і повторювані позиціонування завдяки їх високій жорсткості і низькому люфту. У комбінації з трифазними асинхронними загальнопромисловими електродвигунами, а також серводвигунами, конічно-циліндричні редуктори утворюють компактний приводний елемент. Вони доступні в трьох- і чотириступінчастому виконанні з обертовим вихідним моментом до 11639 Н·м і передавальним відношенням до $i_{ред}=1936$.

Всі мотори забезпечені датчиками температури, які використовуються для моніторингу температури обмоток і відповідають температурному класу F. Електродвигуни мають клас захисту IP55. Як датчик зворотного зв'язку по швидкості/положенню використовується резольвер або енкодер

Загальний вигляд та технічні характеристики мотор-редуктора приведені на рисунку 3.2 та в таблиці 3.1.

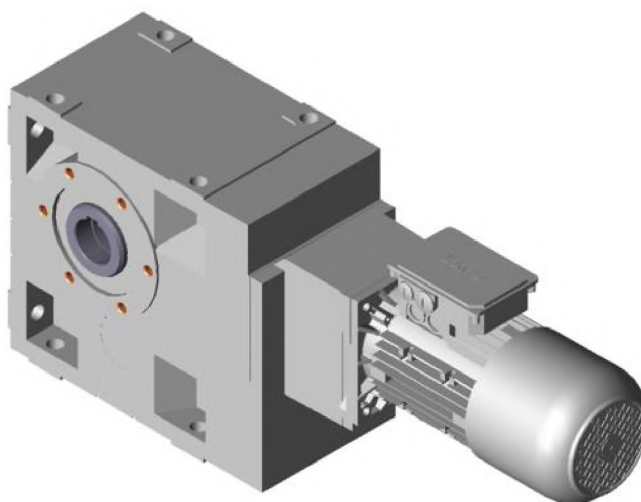


Рисунок 3.2 – Загальний вигляд мотор-редуктора Lenze GKS09-4M

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики мотор-редуктора GKS09-4MHAR-090C12

Параметр	Значення
Номінальна потужність P_H , Вт	1100
Номінальна частота обертання n_H , об/хв	1430
Номінальна напруга U_H , В	230/400
Частота мережі f_{1H} , Гц	50
Кількість пар полюсів p_H	2
Номінальний струм I_H , А	4,6/2,7
Кратність $I_{пуск}/I_H$	5,4
Номінальний момент M_H , Н·м	7,35
Кратність $M_{пуск}/M_H$	2,76
Кратність M_{max}/M_H	3,29
$\cos\varphi$	0,76
Момент інерції $J_{дв}$, кг·м ²	0,0032
Вихідна частота обертання n_2 , об/хв	5,107
Передавальне число $i_{ред}$	279,986
Крутний момент M_2 , Н·м	1920,341
Момент інерції $J_{ред}$, кг·м ²	0,0001125

3.1.2.2 Регульований асинхронний електропривод дозволяє з високою надійністю і ефективністю вирішувати різні завдання автоматизації виробництва й економії електроенергії. Для електропривода нахилу планшайби використано перетворювач 8400 Motec з діапазоном потужностей 0,37-7,5 кВт [5], зовнішній вигляд якого приведено на рисунку 3.3. Перетворювачі цієї серії монтуються безпосередньо на клемник двигуна або поблизу на корпусі машини, що є перевагою при виборі місця розташування для монтажу перетворювачів. Змінні функціональні модулі розширення забезпечують просту інтеграцію 8400 Motec в завдання керування і автоматизації.



Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд перетворювача 8400 Motec

Перетворювачі серії 8400 Motec володіють багатьма можливостями перетворювачів серії 8400 Vector: керування, діагностика, функціональні можливості і поведінка перетворювачів ідентичні. Для керування можна використовувати на вибір або панель керування (пульт) і налаштування ПЧ, або ПК з використанням програмного забезпечення GDC easy.

Технічні характеристики перетворювача 8400 Motec E84DVBM1124SSAN2P приведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики перетворювача 8400 Motec E84DVBM1124SSAN2P

Параметр	Значення
Потужність, Вт	1100
Напруга мережі, В	380
Частота мережі, Гц	50
Частота комутації, кГц	2, 4, 8, 16

Продовження таблиці 3.2

Параметр	Значення
Вид захисту	IP65
Температура навколишнього середовища, град	-20...+ 60 °C
Режими керування	Векторне керування, U/F-керування (лінійне, квадратичне), керування моментом
Стандартні технічні характеристики	РТС-вхід, ПІД-регулятор, вбудований гальмівний резистор, автоналаштування, програмований релейний вихід, S-ramp, активізація нулем або одиницею, заборонені частоти, фіксована швидкість, чотири набори параметрів з можливістю перемикавання в режимі онлайн
Приводні характеристики	Діапазон регулювання числа обертів 1:50 з M_n (50 Гц), точність ходу/обертання $\pm 0,1$ Гц
Функціональні модулі шин зв'язку з периферією	PROFIBUS-DP, INTERBUS, CAN (системна шина), CAN-I/O (системна шина; два програмовані входи), AS-інтерфейс, LECOM-B
Опції	Потенціометр, об'єднаний з вимикачем, програмний пакет налаштування параметрів «GDC easy», пульт ручного керування з модулем керування або інтерфейсом RS-232, керуючий модуль зовнішнього гальма (випрямляч гальма), зовнішній гальмівний резистор, силовий роз'єм мережі

3.1.2.3 Датчик положення обертового об'єкта або по-іншому енкодер – це електромеханічний пристрій, за допомогою якого можна визначити положення осі, що обертається (вала). У цьому пристрої механічний рух перетворюється в елект-

ричні сигнали, що визначають положення об'єкта, дають інформацію про кут повороту вала, його стан і напрямок обертання. За допомогою енкодера також можна виміряти довжину і відстань або установити переміщення інструменту. Енкодери мають широку сферу застосування.

Виділяють такі типи енкодерів: інкрементальні (інкрементні) і абсолютні.

Інкрементальний енкодер – це пристрій, який визначає кут повороту обертового об'єкта, видаючи імпульсний цифровий код. Використовується для визначення швидкості обертання валу (осі), коли немає потреби зберігати абсолютне кутове положення при вимкненні живлення. Тобто, якщо вал нерухомий, передача імпульсів припиняється. Іншими словами, якщо увімкнути енкодер цього типу, то відлік повороту кута почнеться з нуля, а не з кута на який був виставлений до моменту вимкнення. Осі об'єкта і енкодера з'єднуються між собою за допомогою спеціальної гнучкої перехідної муфти або жорсткої втулки, або енкодер може міститися власне на самому валі. Основною перевагою інкрементальних енкодерів є їх простота, надійність і відносно низька вартість.

Абсолютний енкодер видає цифровий код, різний для кожного положення об'єкта, дозволяє визначати кут повороту осі навіть в разі зникнення і відновлення живлення і не вимагає повернення об'єкта в початкове положення, що є безперечною перевагою цього типу енкодерів. Так як кут повороту завжди відомий, то лічильник імпульсів в цьому випадку не потрібний. Сигнал абсолютного енкодера не піддається перешкодам і вібрації і тим самим для нього не потрібна точна установка валу. Абсолютний енкодер використовується у високоточних системах: робототехніка, верстати з числовим програмним керуванням та ін. [6].

Всі двигуни серії МН опціонально можуть бути оснащені резольвером, інкрементальним або абсолютним енкодерами (на вибір). В якості датчика зворотного зв'язку в автоматизованому електроприводі нахилу планшайби скористаємося інкрементальним енкодером IG1024-5V-T.

Характеристики обраного енкодера наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Характеристики інкрементального енкодера IG2048-5V-T

Параметр	Значення
Розподільна здатність, пульс./об	2048
Тип вихідного сигналу	TTL
Точність	-2...2'
Рівень вхідної напруги, В:	
– мінімальний	4,75
– максимальний	5,25
Струм живлення, А	0,15
Максимальна частота, кГц	300

3.1.2.4 Схема підключення – схема, яка показує зовнішні підключення виробу. Схемами підключення користуються при розробці інших конструкторських документів, а також для здійснення підключень виробів при їх експлуатації. На схемі підключення повинні бути зображені виріб, його вхідні і вихідні елементи (роз'єми, зажими та т.п.) та кінці проводів і кабелів зовнішнього монтажу, які до них підводяться. Біля останніх розміщують дані про підключення виробу (характеристики зовнішніх кіл, адреси). Вироби та їх складові частини зображують у вигляді прямокутників, а вхідні або вихідні елементи – у вигляді умовних графічних позначень. Електрична схема підключення перетворювача частоти 8400 Motec представлена на рисунку 3.4.

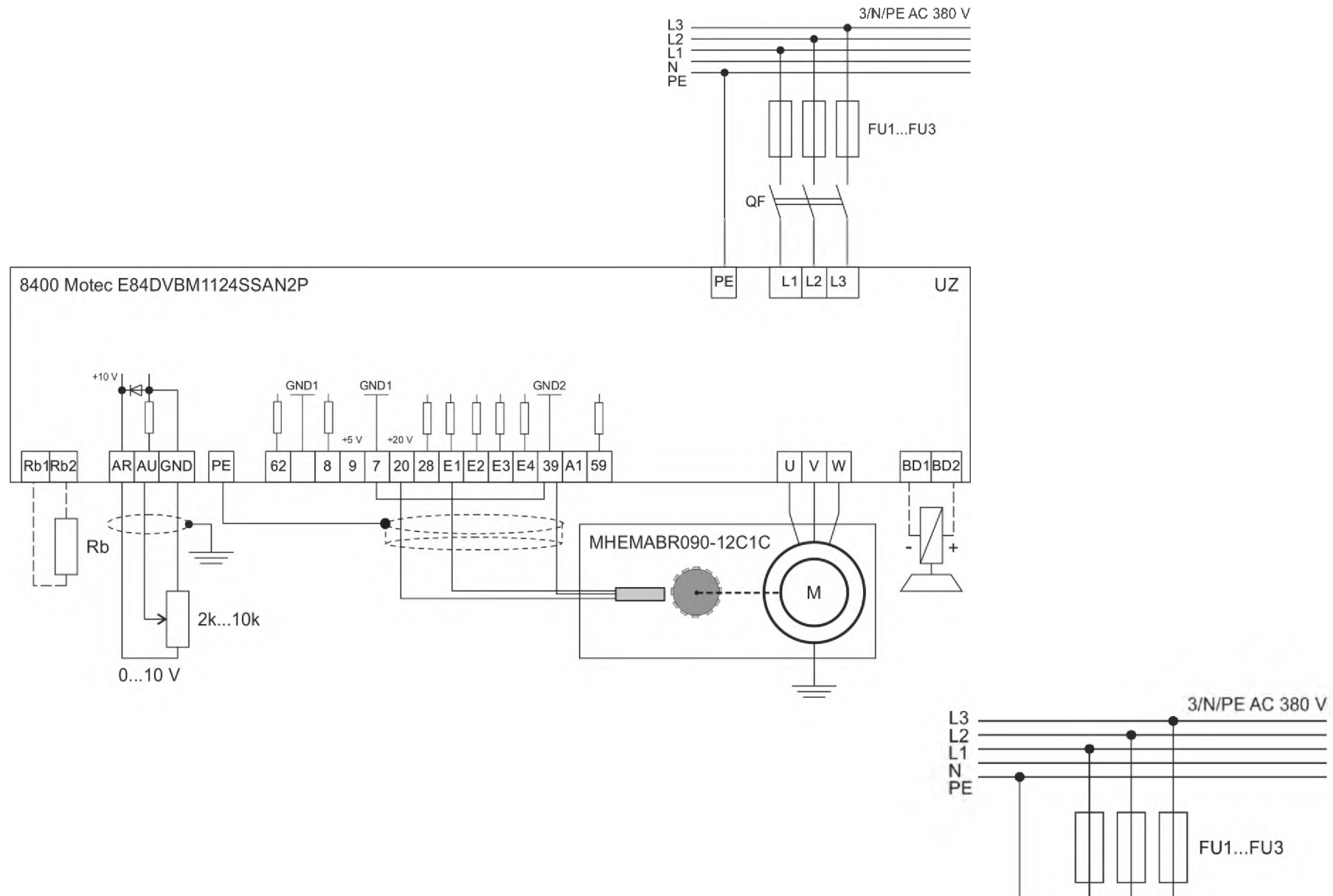


Рисунок 3.4 – Схема підключення перетворювача частоти 8400 Motec

3.2 Математичний опис об'єкта керування та елементів системи керування

3.2.1 Математичний опис елементів системи керування

3.2.1.1 Оскільки при стабілізації швидкості нахилу планшайби система працює в малих відхиленнях щодо робочої точки стабілізації, можливе використання лінійної моделі асинхронного двигуна (рисунок 3.5) [3].

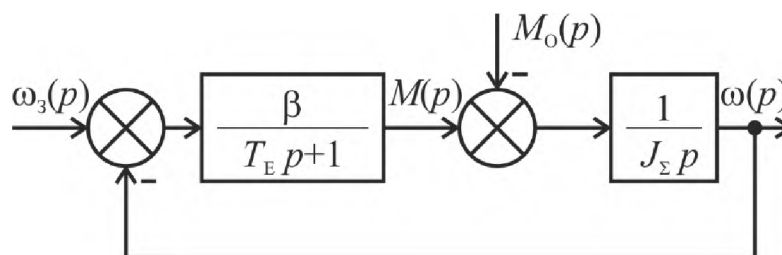


Рисунок 3.5 – Структурна схема лінеаризованої моделі асинхронного двигуна

На рисунку 3.5 прийняті наступні позначення: $\omega_3(p)$, $\omega(p)$ – задана та дійсна кутові швидкості обертання валу асинхронного двигуна, рад/с; β – модуль статичної жорсткості (жорсткість лінійної ділянки механічної характеристики асинхронного двигуна), Н·м·с; T_E – електромагнітна стала часу, с; $M(p)$, $M_O(p)$ – механічний момент двигуна і момент опору відповідно, Н·м; J_Σ – сумарний момент інерції, який приведено до валу двигуна, кг·м².

Передавальна функція лінеаризованої моделі асинхронного двигуна $W_{\text{дв}}(p)$ буде мати вигляд

$$W_{\text{дв}}(p) = \frac{\frac{\beta}{J_\Sigma p (T_E p + 1)}}{1 + \frac{\beta}{J_\Sigma p (T_E p + 1)}} = \frac{\beta}{J_\Sigma T_E p^2 + J_\Sigma p + \beta} = \frac{1}{T_M T_E p^2 + T_M p + 1}, \quad (3.1)$$

де T_M – електромеханічна стала часу, с.

3.2.1.2 Як відомо, перетворювач частоти являє собою нелінійний дискретний динамічний об'єкт з обмеженою керованістю. Однак можна говорити, що специфіка перетворювача, як нелінійного об'єкта суттєво не позначається на роботі системи. Частота зрізу контуру регулювання в якому він знаходиться, значно нижче

частот, суттєвих для динаміки самого перетворювача, при цьому час перехідних процесів у системі помітно перевищує період дискретизації системи. Найчастіше, перетворювач частоти при розрахунках систем керування електроприводів представляють у вигляді аперіодичної ланки з передавальною функцією виду

$$W_{\text{ПЧ}}(p) = \frac{k_{\text{ПЧ}}}{T_{\text{ПЧ}}p+1}, \quad (3.2)$$

де $k_{\text{ПЧ}}$ – коефіцієнт передачі перетворювача частоти, $1/\text{В} \cdot \text{с}$;

$T_{\text{ПЧ}}$ – стала часу перетворювача частоти, $T_{\text{ПЧ}}=0,01$ с.

3.2.2 Побудова структурної схеми

На базі математичного опису елементів функціональної схеми системи керування електропривода нахилу планшайби (п. 3.1, 3.2.1) складено структурну схему системи (рисунок 3.6).

Система являє собою двоконтурну систему керування, з зовнішнім контуром – контуром положення та внутрішнім контуром – контуром швидкості. На рисунку прийняті наступні позначення: $U_{\text{зП}}(p)$ – напруга на виході задатчика положення, В; $W_{\text{рП}}(p)$, $W_{\text{рШ}}(p)$ – передавальні функції регуляторів положення та швидкості відповідно; $U_{\text{рП}}(p)$, $U_{\text{рШ}}(p)$ – напруги на виходах регуляторів положення та швидкості відповідно, В; $U_{\text{дП}}(p)$, $U_{\text{дШ}}(p)$ – напруги на виходах датчиків положення та швидкості відповідно, В; $k_{\text{дП}}$ – коефіцієнт передачі датчика положення, В; $k_{\text{дШ}}$ – коефіцієнт передачі датчика швидкості, В·с.

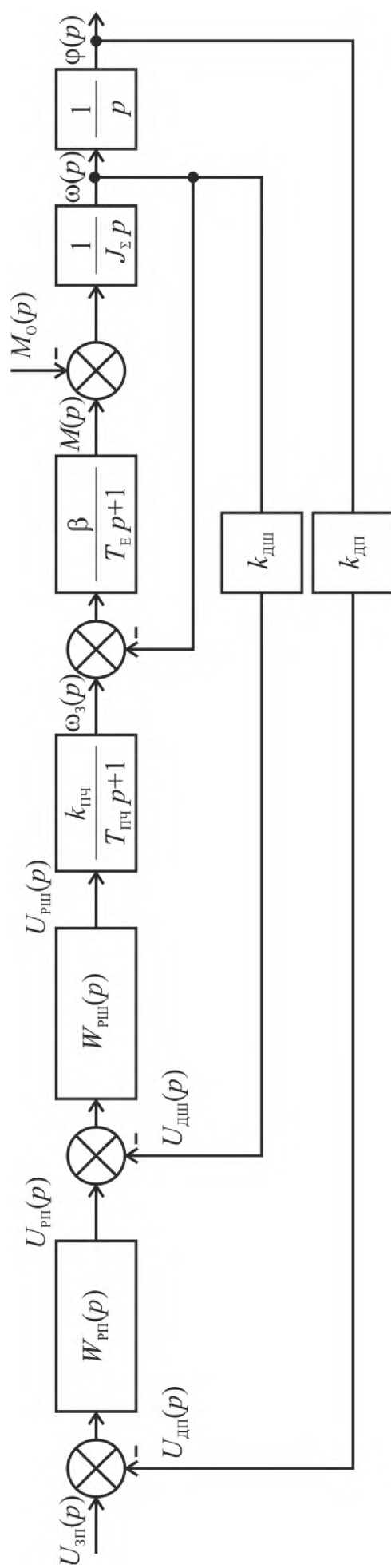


Рисунок 3.6 – Структурна схема системи керування електропривода нахилу планшайби

При відпрацюванні заданого переміщення можливі три режими роботи позиційної системи регулювання [7]:

- відпрацювання малих переміщень, коли система регулювання є лінійною, тобто жодна з регульованих координат не досягає сталого значення; в цьому режимі задатчик інтенсивності на вході регулятора швидкості працює в режимі стеження;

- відпрацювання середніх переміщень, коли сталого значення досягає якірний струм (момент), тобто електропривод працює з заданим прискоренням, який формується задатчиком інтенсивності, при цьому швидкість змінюється по трикутній тахограмі;

- відпрацювання великих переміщень, коли сталого значення досягають струм і швидкість обертання електропривода (регулятор положення знаходиться в обмеженні), швидкість змінюється по трапецеїдальній тахограмі. В цьому випадку електропривод працює з максимальною сталою швидкістю обертання, яку в позиційному електроприводі приймають рівною заданій швидкості.

При відпрацюванні великих переміщень електропривод працює по трапецеїдальній тахограмі, коли швидкість електродвигуна досягає сталого значення. Для обмеження швидкості обертання електродвигуна вихідна напруга РП, що є завданням швидкості обертання електродвигуна, має бути обмежена на рівні завдання необхідної швидкості обертання електродвигуна.

Вхідною напругою РП є помилка регулювання положення, тобто різниця між напругою завдання положення і напругою зворотного зв'язку за положенням $U_{зп} - U_{дп}$.

3.2.3 Розрахунок параметрів елементів структурної схеми

3.2.3.1 Розрахунок параметрів асинхронного двигуна

Модуль статичної жорсткості β , Н·м·с,

$$\beta = \frac{M_H}{\omega_0 - \omega_H}, \quad (3.3)$$

де M_H – номінальний момент асинхронного двигуна, $M_H=7,35$ Н·м;

ω_0 – кутова швидкість холостого ходу асинхронного двигуна, рад/с;

ω_H – номінальна кутова швидкість асинхронного двигуна, рад/с.

Номінальна кутова швидкість ω_H , рад/с,

$$\omega_H = \frac{2\pi n_H}{60},$$

$$\omega_H = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1430}{60} = 149,75 \text{ рад/с.}$$

Швидкість холостого ходу ω_0 , рад/с,

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_{1H}}{p_{\Pi}},$$

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2} = 157 \text{ рад/с.}$$

Отже знаходимо за формулою (3.3) модуль статичної жорсткості β

$$\beta = \frac{7,35}{157 - 149,75} = 1 \text{ Н·м·с.}$$

Електромагнітна стала часу T_E , с,

$$T_E = \frac{1}{\omega_{\text{сел}} s_K}, \quad (3.4)$$

де $\omega_{0\text{ел}}$ – кутова швидкість електромагнітного поля АД при його номінальній частоті напруги живлення $f_{1\text{H}}=50$ Гц, $\omega_{0\text{ел}}=314$ рад/с;
 s_{K} – критичне ковзання.

Критичне ковзання s_{K}

$$s_{\text{K}} = s_{\text{H}}(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}), \quad (3.5)$$

де s_{H} – номінальне ковзання двигуна.

Номінальне ковзання двигуна s_{H} розраховуємо за формулою

$$s_{\text{H}} = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{H}}}{\omega_0},$$

$$s_{\text{H}} = \frac{157 - 149,75}{157} = 0,047.$$

За формулою (3.5) знаходимо s_{K}

$$s_{\text{K}} = 0,047(3,29 + \sqrt{3,29^2 - 1}) = 0,3.$$

Далі знаходимо за формулою (3.4) електромагнітну сталу часу T_{E}

$$T_{\text{E}} = \frac{1}{314 \cdot 0,3} = 0,011 \text{ с.}$$

Електромеханічна стала часу T_{M} , с,

$$T_{\text{M}} = \frac{J_{\Sigma}}{\beta}, \quad (3.6)$$

де J_{Σ} – сумарний момент інерції, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Сумарний момент інерції J_{Σ}

$$J_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + J_{\text{ред}} + J_{\text{мех}},$$

де $J_{\text{мех}}$ – момент інерції механізму, $J_{\text{мех}}=0,048 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

$$J_{\Sigma} = 0,0032 + 0,0001125 + 0,048 = 0,051 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

За формулою (3.6) знаходимо T_M

$$T_M = \frac{0,051}{1} = 0,051 \text{ с.}$$

На основі результатів розрахунків параметрів асинхронного двигуна, передавальна функція двигуна (3.1) буде мати вигляд

$$W_{\text{дв}}(p) = \frac{1}{0,00054p^2 + 0,051p + 1}.$$

3.2.3.2 Розрахунок параметрів перетворювача частоти

Коефіцієнт передачі перетворювача частоти $k_{\text{ПЧ}}$, $1/\text{В}\cdot\text{с}$,

$$k_{\text{ПЧ}} = \frac{2\pi f_{1\text{Н}}}{p_{\text{П}} U_{\text{РШ}}},$$

де $U_{\text{РШ}}$ – напруга на виході регулятора швидкості, $U_{\text{РШ}}=10 \text{ В}$.

$$k_{\text{ПЧ}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2 \cdot 10} = 15,71 \text{ 1/В}\cdot\text{с}.$$

Звідси передавальна функція перетворювача частоти (3.2) буде мати вигляд

$$W_{\text{ПЧ}}(p) = \frac{15,71}{0,01p + 1}.$$

3.2.3.3 Розрахунок параметрів датчиків швидкості та положення

Коефіцієнт передачі датчика швидкості $k_{\text{ДШ}}$, В·с,

$$k_{\text{ДШ}} = \frac{U_{\text{ДШ}}}{\omega_{\text{нах}}},$$

де $\omega_{\text{нах}}$ – кутова швидкість валу двигуна електропривода нахилу планшайби, рад/с.

$$\omega_{\text{нах}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{нах}}}{60},$$

де $n_{\text{нах}}$ – частота обертання валу двигуна для забезпечення заданої швидкості нахилу планшайби, $n_{\text{нах}} = 1 \cdot i_{\text{ред}} = 279,99$ об/хв (див. табл. 1.2).

$$\omega_{\text{нах}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 279,99}{60} = 29,32 \text{ рад/с.}$$

Прийmemo для подальших розрахунків $U_{\text{ДШ}} = 10$ В, тоді

$$k_{\text{ДШ}} = \frac{10}{29,32} = 0,34 \text{ В·с.}$$

Коефіцієнт передачі датчика положення $k_{\text{ДП}}$, В,

$$k_{\text{ДП}} = \frac{U_{\text{ДП}}}{\phi_{\text{max}}},$$

де ϕ_{max} – кут повороту валу двигуна електропривода нахилу планшайби для забезпечення найбільшого кута нахилу планшайби (див. табл. 1.2), $\phi_{\text{max}} = \pi \cdot 135 \cdot i_{\text{ред}} / 180 = 659,7$ рад.

Прийmemo для подальших розрахунків $U_{\text{ДП}} = U_{\text{ЗП}} = 10$ В, тоді

$$k_{\text{ДП}} = \frac{10}{659,7} = 0,015 \text{ В.}$$

3.2.4 Синтез регуляторів

3.2.4.1 Синтез регулятора швидкості

При оптимізації контурів регулювання систем керування електроприводів широке поширення набули два методи стандартного налаштування: оптимум по модулю і симетричний оптимум. В процесі синтезу регулятора надаються певні динамічні властивості, тобто здійснюється вибір його параметрів [8].

Результуюча передатна функція асинхронного двигуна (3.1) при $T_M \leq 4T_E$ має вигляд [3]

$$W_{\text{дв}}(p) = \frac{1}{(T_{01}p+1)(T_{02}p+1)},$$

де

$$\frac{1}{T_{01}} = \frac{1}{2T_E} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4T_E}{T_M}} \right), \quad (3.7)$$

$$\frac{1}{T_{02}} = \frac{1}{2T_E} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4T_E}{T_M}} \right). \quad (3.8)$$

Якщо віднести сталі T_{02} і $T_{\text{ПЧ}}$ до малих некомпенсованих сталих і за оцінку їхнього впливу прийняти, $T_\mu = T_{02} + T_{\text{ПЧ}}$, то при налаштуванні електропривода на модульний оптимум стала часу інтегрування й коефіцієнт передачі пропорційної складової регулятора швидкості

$$T_{\text{РШ}} = k_{\text{ДШ}} k_{\text{ПЧ}} \alpha_\mu T_\mu, \quad (3.9)$$

$$k_{\text{РШ}} = \frac{T_{01}}{T_{\text{РШ}}}. \quad (3.10)$$

Щоб звести до мінімуму вплив електромагнітних сталих часу ланцюгів статора й ротора асинхронного двигуна, які не враховано при визначенні T_μ , прийнемо $\alpha_\mu = 4,5$.

Згідно (3.7) та (3.8) знайдемо T_{01} та T_{02}

$$T_{01} = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 0,011} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 0,011}{0,051}} \right)} = 0,015,$$

$$T_{02} = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 0,011} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 0,011}{0,051}} \right)} = 0,036.$$

Мала некомпенсована стала часу T_{μ} , с,

$$T_{\mu} = T_{02} + T_{ПЧ},$$

$$T_{\mu} = 0,036 + 0,01 = 0,046 \text{ с.}$$

Тоді за формулою (3.9) знайдемо сталу часу інтегрування регулятора швидкості $T_{РШ}$, с,

$$T_{РШ} = 0,34 \cdot 15,71 \cdot 4,5 \cdot 0,046 = 1,11 \text{ с.}$$

Коефіцієнт передачі пропорційної складової регулятора швидкості $k_{РШ}$ за формулою (3.10)

$$k_{РШ} = \frac{0,015}{1,11} = 0,014.$$

Передавальна функція регулятора швидкості буде мати вигляд

$$W_{РШ}(p) = k_{РШ} + \frac{1}{T_{РШ}p}. \quad (3.11)$$

Передавальна функція (3.11) є передавальною функцією пропорційно-інтегрального регулятора з відповідними коефіцієнтами передачі пропорційної $k_{РШ}$, інтегральної $1/T_{РШ}$ складових регулятора.

3.2.4.2 Синтез регулятора положення

Налаштування контуру регулювання положення повинно забезпечити виконання наступних вимог, що пред'являються до позиційних систем регулювання:

- забезпечення максимальної швидкодії;
- забезпечення необхідною точністю регулювання;

– відсутність перерегулювання при відпрацюванні заданого переміщення.

Передавальна функція замкненого контуру швидкості, оптимізованого на модульний оптимум має вигляд

$$W_{\text{КШ}}(p) = \frac{1/k_{\text{ДШ}}}{4T_{\mu}p(2T_{\mu}p+1)+1} \approx \frac{1/k_{\text{ДШ}}}{4T_{\mu}p+1}.$$

За аналогією з процедурою синтезу контуру швидкості, якщо контур положення налаштовується на модульний оптимум, то використовується П-регулятор положення з коефіцієнтом посилення

$$k_{\text{РП}} = \frac{k_{\text{ДШ}}}{8T_{\mu}k_{\text{ДП}}},$$

$$k_{\text{РП}} = \frac{0,34}{8 \cdot 0,046 \cdot 0,015} = 60,95.$$

Передавальна функція регулятора швидкості буде мати вигляд

$$W_{\text{РП}}(p) = k_{\text{РП}}. \quad (3.12)$$

3.3 Дослідження динаміки системи керування

3.3.1 Побудова моделі системи керування в MATLAB

Для аналізу динамічних характеристик системи керування електропривода нахилу планшайби скористаємося моделюванням системи в програмі Simulink. Для запуску програми Simulink необхідно попередньо запустити пакет MATLAB. Після відкриття основного вікна програми MATLAB можна запустити саму програму. Для створення моделі в середовищі Simulink потрібно послідовно виконати ряд дій [9]:

- 1) створити новий файл моделі за допомогою команди File/New/Model;

2) розташувати блоки у вікні моделі. Далі потрібно, змінити параметри блоків, які встановлені за замовчуванням;

3) після установки на схемі всіх блоків потрібно виконати з'єднання елементів схеми;

4) після складання розрахункової схеми необхідно зберегти її у вигляді файлу на диску, вибравши пункт меню File/Save as...;

5) перед виконанням розрахунків необхідно попередньо задати параметри розрахунку. Завдання параметрів розрахунку виконується в панелі управління меню Simulation/Configuration Parameters. Запуск розрахунку виконується за допомогою вибору пункту меню Simulation/Start.

У відповідності зі структурною схемою системи (див. рисунок 3.6) складена модель для середовища Simulink. Модель представлена на рисунку 3.7.

Коефіцієнти, які необхідні для моделювання системи, розраховані в п. 3.2.3 та зведені в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4

Коефіцієнт	$k_{пч}$, 1/В·с	$T_{пч}$, с	β , Н·м·с	T_E , с	J_{Σ} , кг·м ²	$k_{дш}$, В·с	$k_{дп}$, В
Значення	15,71	0,01	1	0,011	0,051	0,34	0,015

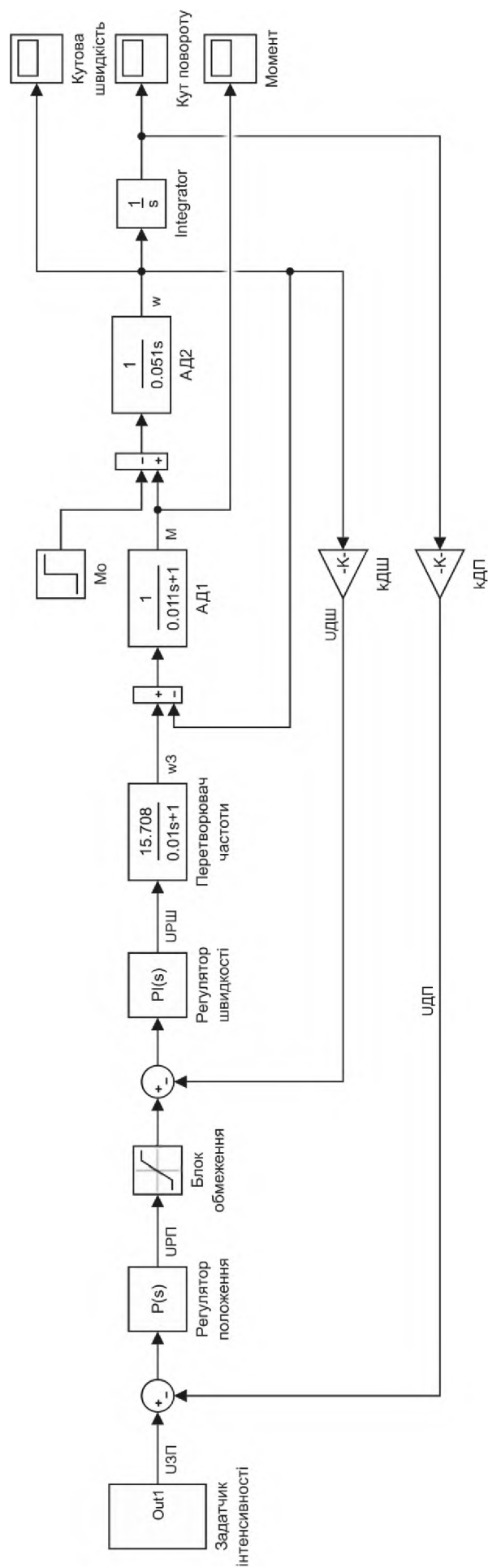


Рисунок 3.7 – Модель системи керування електропривода нахилу планшайби в Simulink

Задатчик інтенсивності в розрахунковій схемі призначений для формування сигналу завдання положення УЗП. Структурна схема задатчика інтенсивності, який формує оптимальну тахограму позиційного електропривода, приведено на рисунку 3.8.

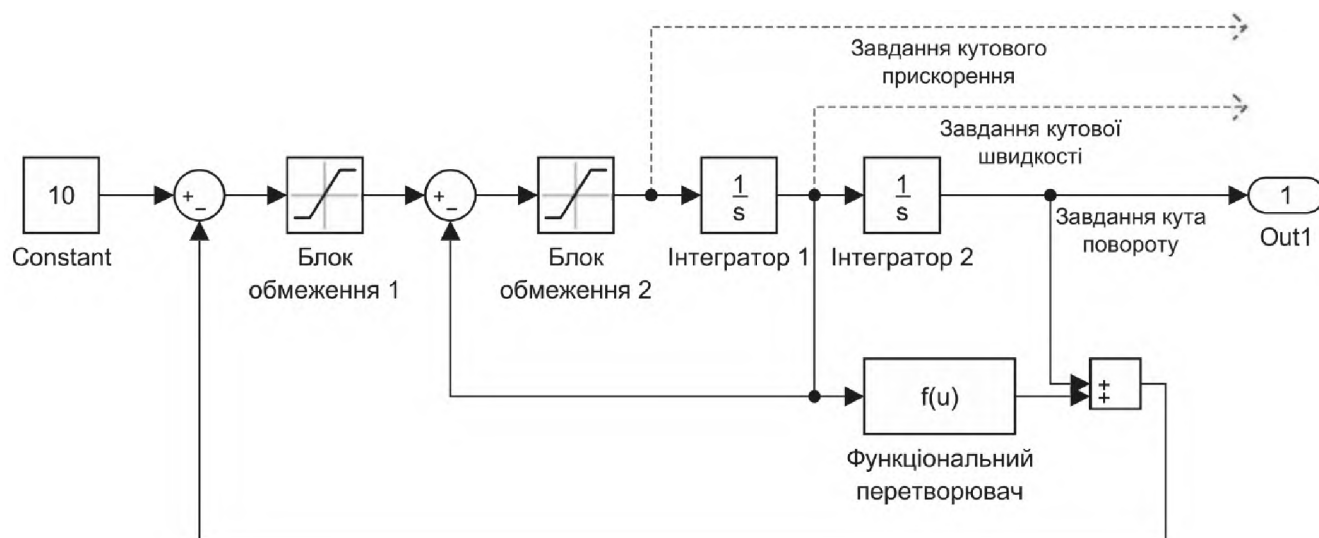


Рисунок 3.8 – Підсистема «Задатчик інтенсивності»

Як видно з рисунку 3.8, блок Constant визначає напругу, яка задає необхідну величину кута нахилу планшайби, а вихідний сигнал – напруга, яка задає закон переміщення, відповідний оптимальній тахограмі. У схемі передбачені два обмежувача рівнів – швидкості (Блок обмеження 1) і прискорення (Блок обмеження 2), функціональний перетворювач $f(u)$, який формує сигнал завдання гальмівного шляху $U_{згш}(\omega_3) = k \frac{\omega_3^2}{2\varepsilon_3}$, і два інтегратори, що формують сигнали – сигнал завдання кутової швидкості ω_3 та кута повороту φ_3 . Даний задатчик інтенсивності дозволяє також реалізувати комбіноване керування в позиційному електроприводі за допомогою додаткових сигналів завдання кутової швидкості ω_3 та кутового прискорення ε_3 (штрихові лінії), що дозволяє при найпростішому пропорційному регуляторі положення компенсувати помилки по швидкості і прискоренню.

На рисунку 3.7 регулятори швидкості та положення представлені стандартним блоком PID(s) з бібліотеки Simulink, який дозволяє реалізувати регулятори

(PID, PI, PD, P або I) в моделях з безперервним часом. Вікно налаштування параметрів регуляторів представлено на рисунку 3.9. Коефіцієнти Proportional (P) та Integral (I) у вікнах налаштувань параметрів регуляторів відповідають коефіцієнтам передачі пропорційної k_{PI} та інтегральної $1/T_{PI}$ складових – для регулятора швидкості, k_{PI} – для регулятора положення, які було розраховано в п. 3.2.4.

3.3.2 Аналіз якості системи керування

У результаті моделювання системи кутового переміщення при відпрацюванні задавального та збурювального впливів для середнього (45 град) і великого (135 град) переміщень були отримані перехідні характеристики системи керування, які представлені на рисунках 3.10-3.12. У більшості приводів найкращим вважається такий перехідний процес відпрацювання середніх/великих переміщень, коли швидкість двигуна в процесі відпрацювання заданого кута змінюється по трапецеїдальному графіку, оскільки це дозволяє в повній мірі використовувати перевантажувальну здатність двигуна і виключає виникнення перерегулювання в перехідному процесі.

Для систем керування важливим є поняття якості перехідних процесів, тобто важливий сам характер протікання процесів, особливо такі фактори, як тривалість, коливальність і динамічне відхилення регульованої змінної від заданої величини.

До загальноприйнятих показників якості, які використовують для характеристики перехідного процесу, відносять відносне перерегулювання, час встановлення, час наростання, час максимуму та усталену похибку [10].

Block Parameters: Регулятор швидкості

PID Controller

This block implements continuous- and discrete-time PID control algorithms and includes advanced features such as anti-windup, external reset, and signal tracking. You can tune the PID gains automatically using the 'Tune...' button (requires Simulink Control Design).

Controller: **PI** Form: **Parallel**

Time domain:

☒ Continuous-time
☐ Discrete-time

Main PID Advanced Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: **internal** [Compensator formula](#)

Proportional (P): **0.014**

Integral (I): **1/1.112** $P + I \frac{1}{s}$

Tune...

Initial conditions

Source: **internal**

Integrator: **0**

External reset: **none**

☐ Ignore reset when linearizing
☒ Enable zero-crossing detection

OK Cancel Help Apply

а)

Block Parameters: Регулятор положення

PID Controller

This block implements continuous- and discrete-time PID control algorithms and includes advanced features such as anti-windup, external reset, and signal tracking. You can tune the PID gains automatically using the 'Tune...' button (requires Simulink Control Design).

Controller: **P** Form: **Parallel**

Time domain:

☒ Continuous-time
☐ Discrete-time

Main PID Advanced Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: **internal** [Compensator formula](#)

Proportional (P): **60.953** P

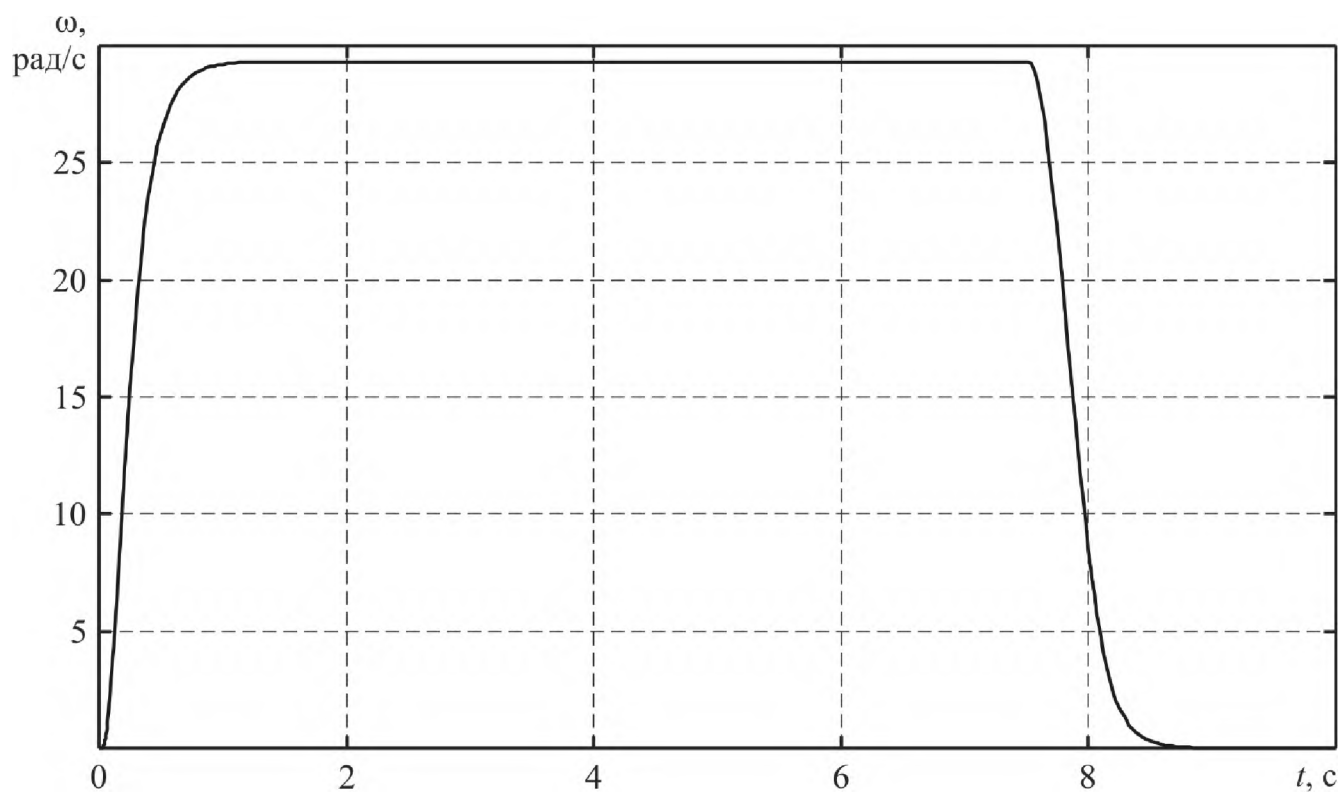
Tune...

☒ Enable zero-crossing detection

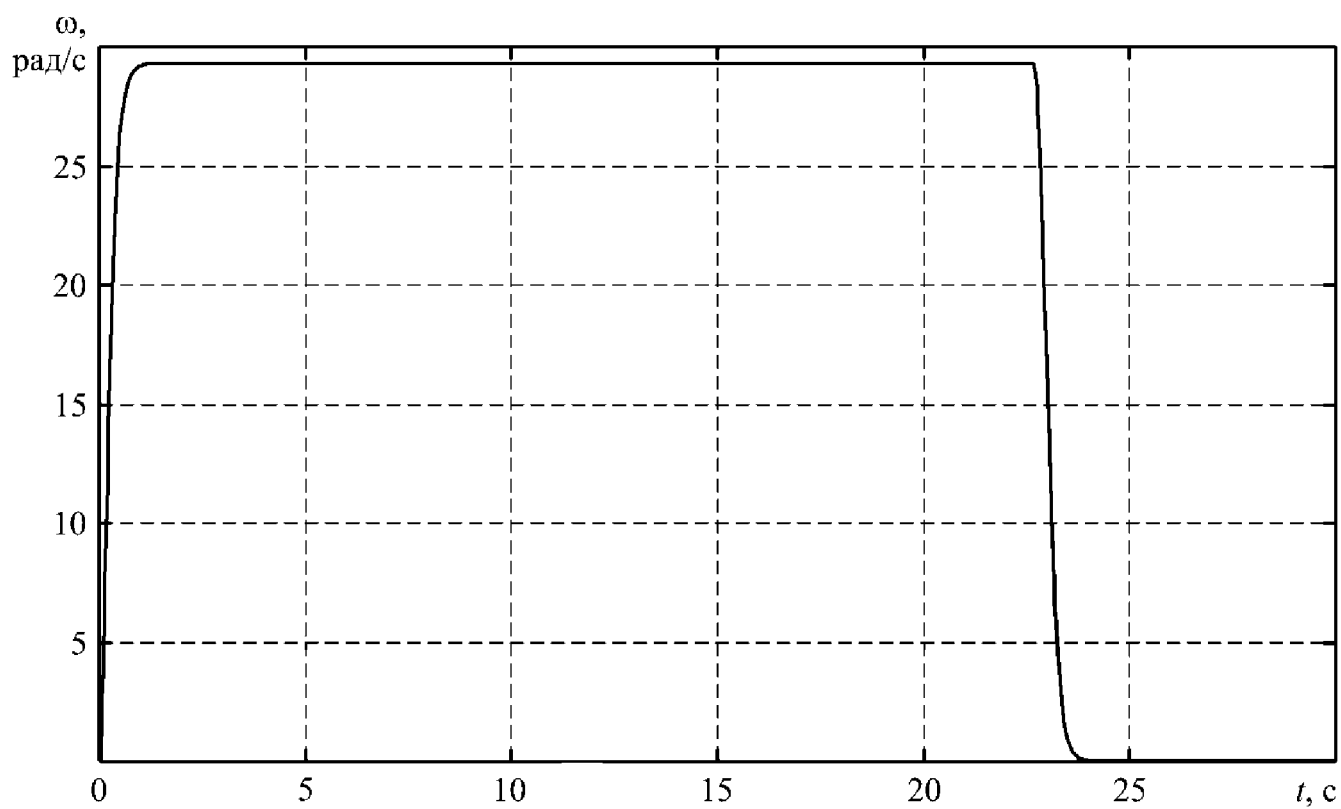
OK Cancel Help Apply

б)

Рисунок 3.9 – Вікна налаштувань параметрів блоків «Регулятор швидкості» (а) та «Регулятор положення» (б)

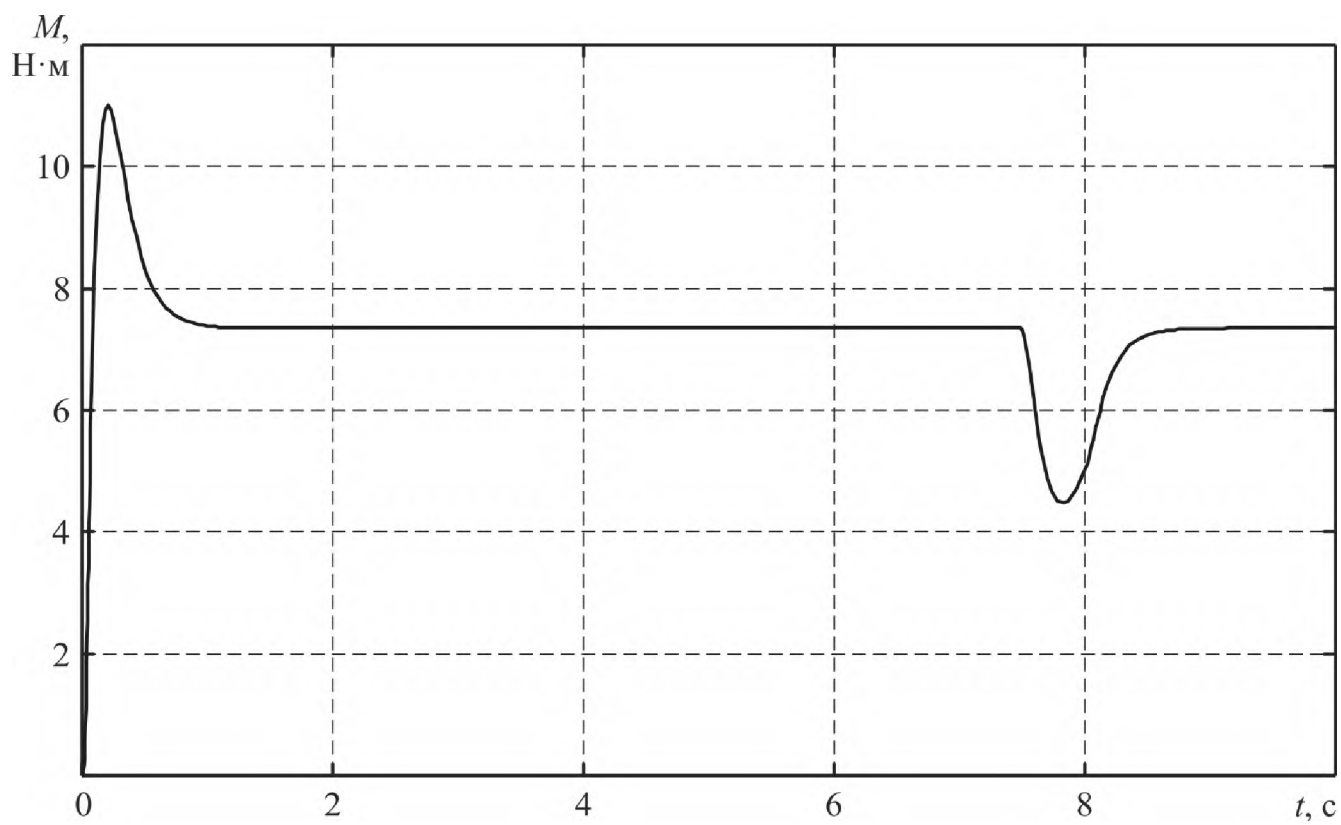


а)

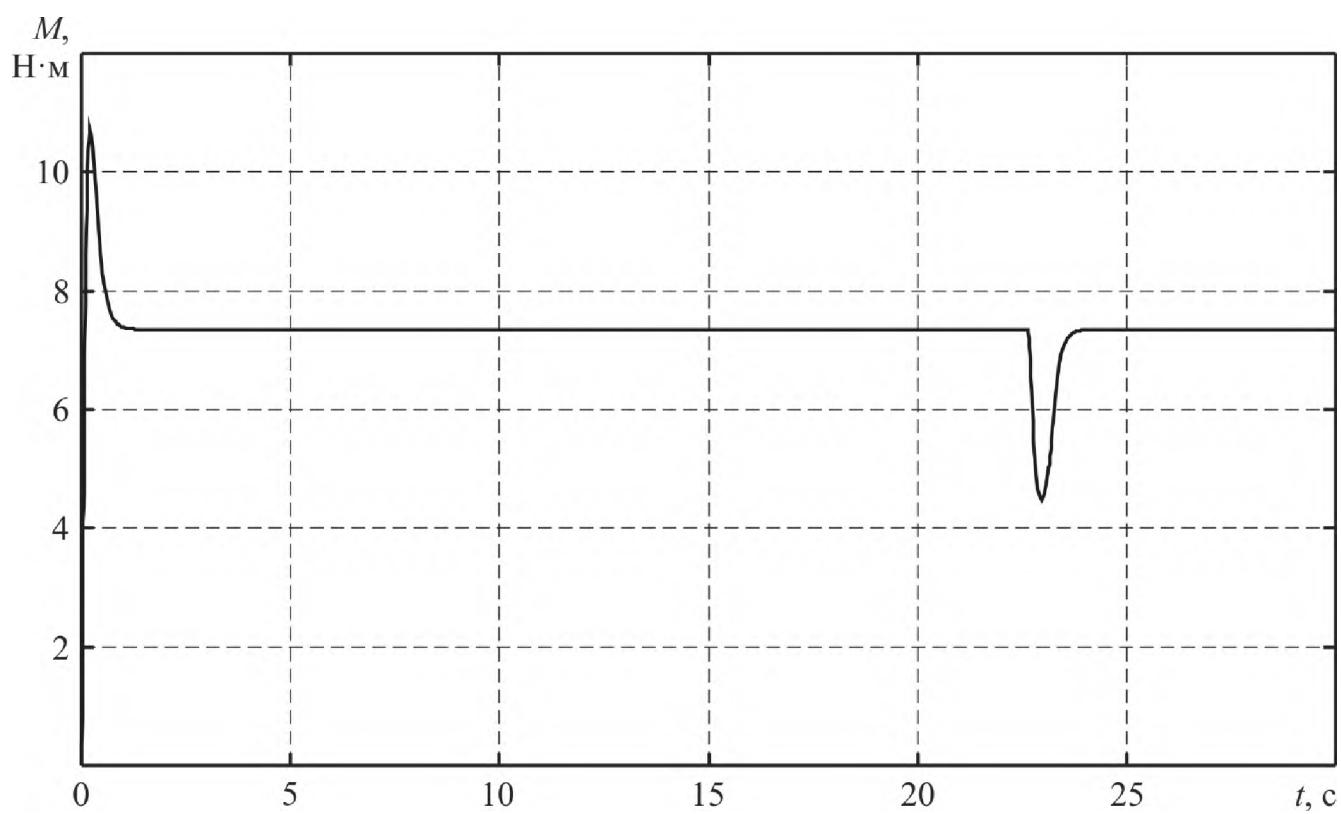


б)

Рисунок 3.10 – Перехідні характеристики кутової швидкості електродвигуна при відпрацюванні середнього (а) та великого (б) переміщень

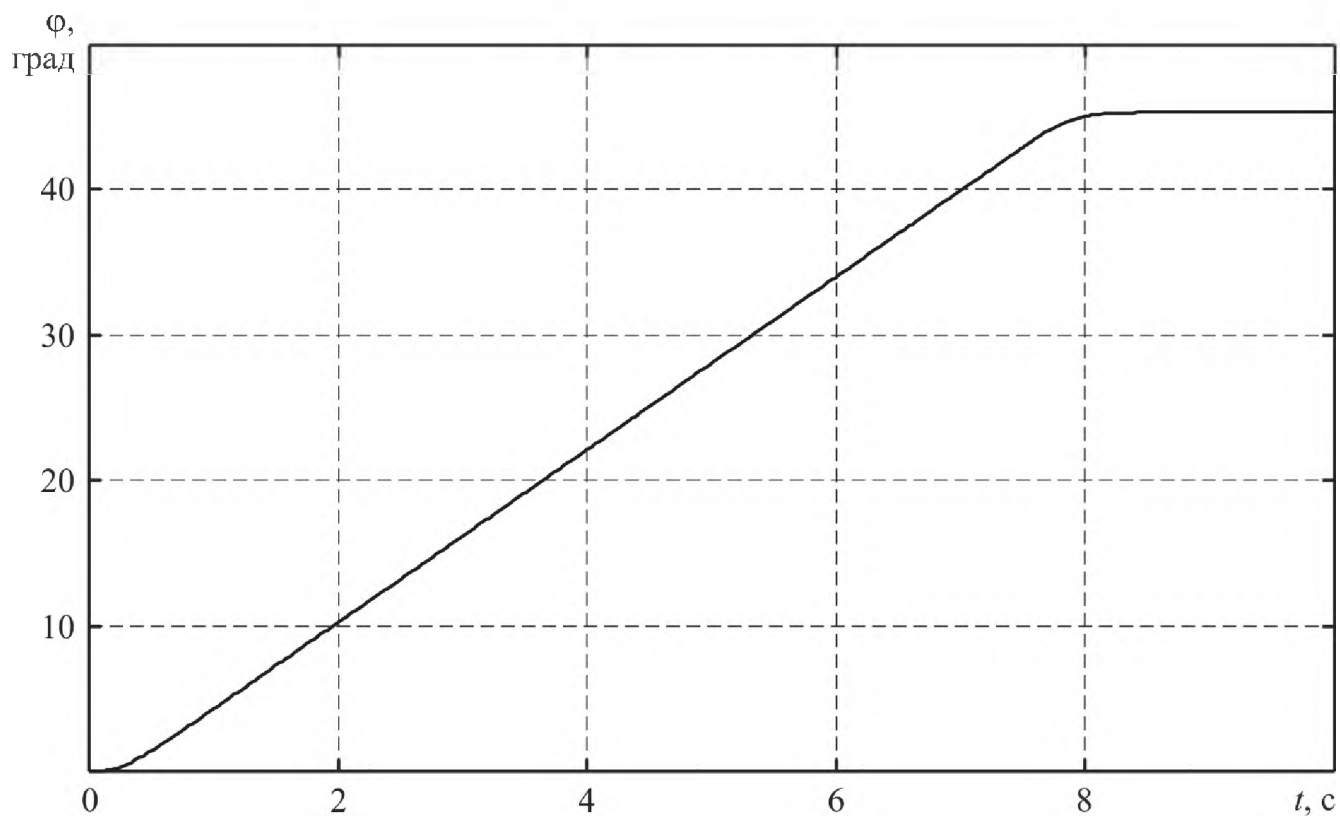


а)

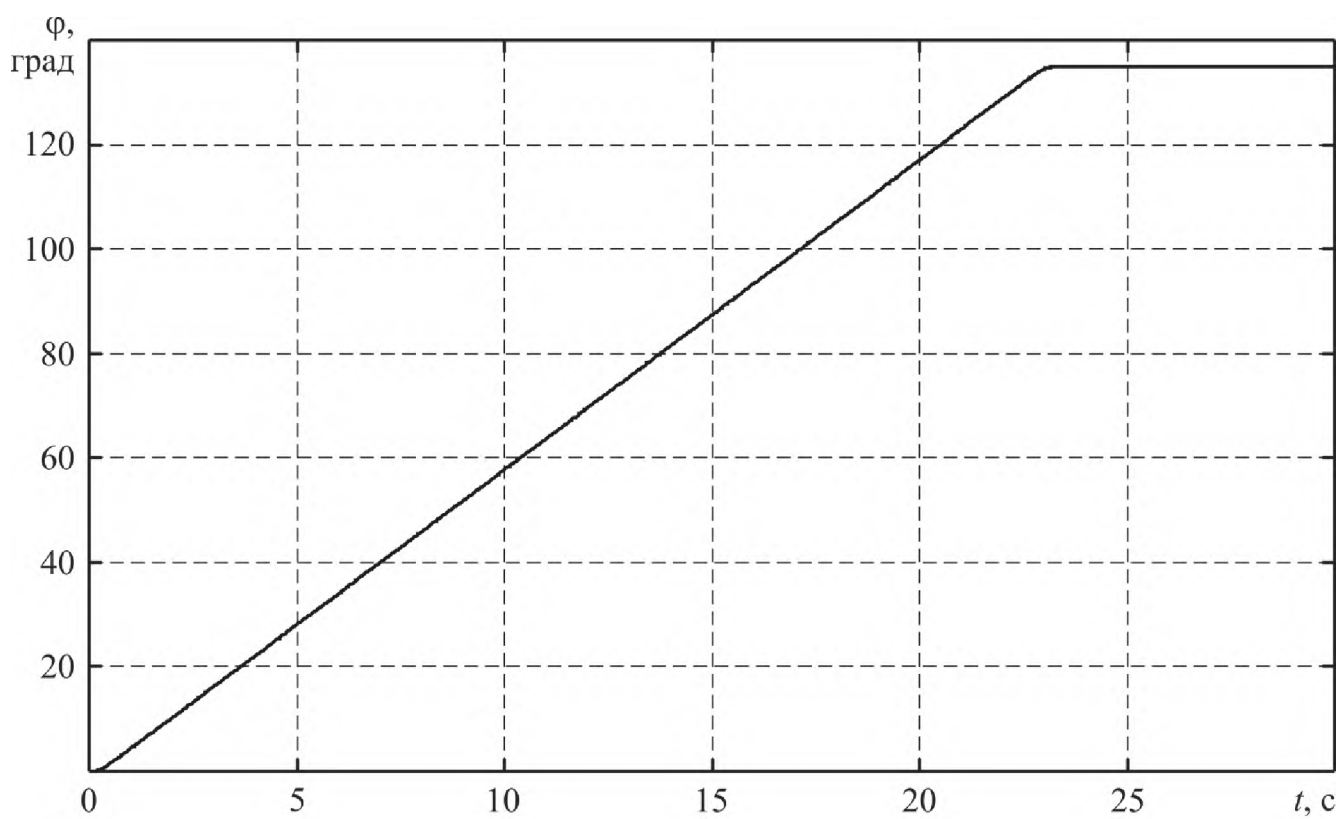


б)

Рисунок 3.11 – Перехідна характеристика моменту електродвигуна при відпрацюванні середнього (а) та великого (б) переміщень



а)



б)

Рисунок 3.12 – Перехідна характеристика кута нахилу планшайби при відпрацюванні середнього (а) та великого (б) переміщень

Швидкодія системи напряму пов'язана з часом наростання t_H та часом максимуму перехідної характеристики t_M . Для недодемпфованих систем, перехідна характеристика яких має перерегулювання, час наростання визначається як час зміни реакції від 0 до 100 % заданого значення вихідної величини. Якщо система передемпфована, то перерегулювання відсутнє, час максимуму не має значення, а в якості часу наростання розглядається інтервал, протягом якого перехідна характеристика змінюється від 10 до 90 % її значення.

Наскільки добре дійсна реакція системи відповідає керуючому впливу, оцінюється по відносному перерегулюванню σ і часу встановлення t_p .

Відносне перерегулювання σ представляє собою максимальне відхилення від усталеного значення, яке виражається у відносних одиницях або процентах,

$$\sigma = \frac{h_{\max} - h_{\text{уст}}}{h_{\text{уст}}} \cdot 100\%,$$

де $h_{\max}$ – максимальне значення вихідної величини;

$h_{\text{уст}}$ – усталене значення вихідної величини.

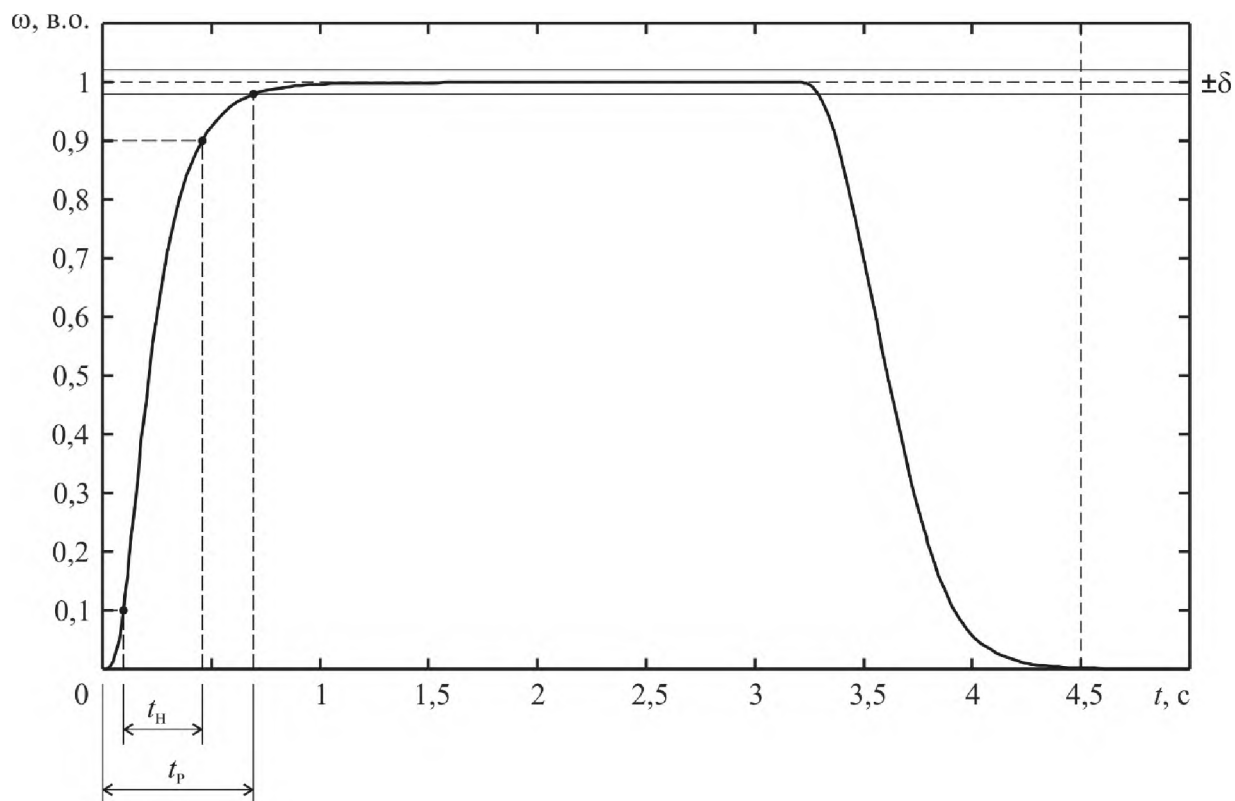
Час встановлення t_p визначається моментом, після якого перехідна характеристика залишається повністю в межах зони, яка відрізняється від усталеного значення на $\pm\delta$.

Отже, реакцію системи на керуючий вплив можна охарактеризувати двома факторами:

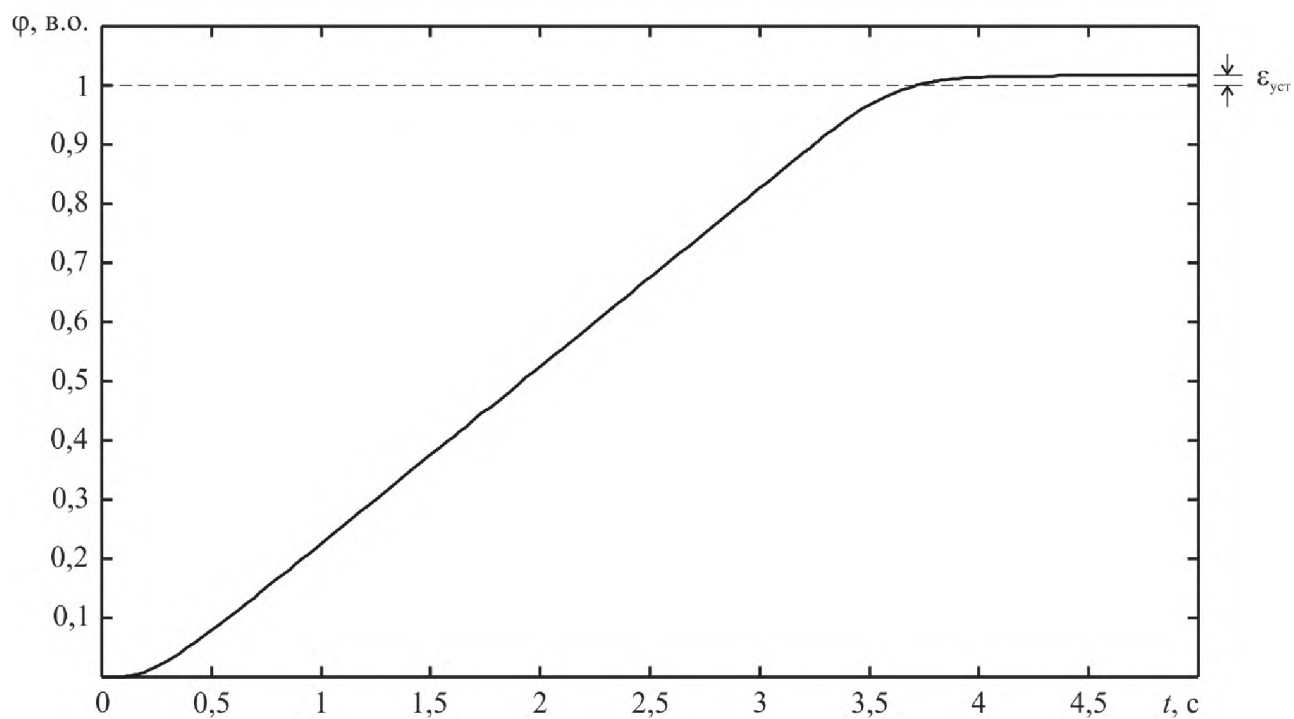
- швидкодією, яка визначається часом наростання і часом максимуму;
- близькістю до бажаного вигляду, яка визначається перерегулюванням і часом встановлення.

Наведені вище показники можуть бути доповнені іншими, якщо цього вимагають специфічні технічні завдання на розробку або дослідження систем керування.

Проаналізуємо реакцію системи керування на ступінчастий сигнал (рисунок 3.13). Отримані показники якості зведені в таблиці 3.5.



а)



б)

Рисунок 3.13 – Реакція системи керування на ступінчастий сигнал:

а – перехідна характеристика кутової швидкості електродвигуна;

б – перехідна характеристика кута нахилу планшайби

Таблиця 3.5 – Показники якості

Параметр	Відносне перерегулювання σ , %	Час встановлення t_p , с	Час наростання t_n , с	Усталена похибка $\varepsilon_{уст}$, %
Кутова швидкість	0	0,69	0,36	0
Кут нахилу	0	-	-	1,5

Відповідно завданню до кваліфікаційної роботи перехідний процес повинен відповідати таким показникам: $\sigma=0\%$, $\varepsilon_{уст}\leq 2\%$. Згідно таблиці 3.5 отримані значення не перевищують задані, отже, перехідний процес задовольняє сформульованим у завданні вимогам.

3.4 Висновки до розділу 3

3.4.1 Побудовано функціональну схему системи керування асинхронного електропривода нахилу планшайби та обґрунтовано вибір її елементів.

3.4.2 Складено математичний опис системи керування привода нахилу планшайби зварювального обертача, елементів системи керування та виконано розрахунок їх параметрів.

3.4.3 Проведено моделювання системи керування привода нахилу планшайби зварювального обертача в MATLAB та досліджено вплив параметрів регуляторів на якість керування.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів

Небезпека – центральне поняття безпеки життєдіяльності людини, що об'єднує явища, процеси, об'єкти, здатні в певних умовах завдавати збитків здоров'ю людини. Небезпека властива всім системам, які мають енергію, хімічні, біологічні чи інші небезпечні компоненти. На здоров'я людини, її життєздатність і життєдіяльність великий вплив мають небезпечні і шкідливі фактори.

Небезпечний фактор – дія на людину, що в певних умовах призводить до травми, а в окремих випадках - до раптового погіршення здоров'я або смерті.

Шкідливий фактор – це фактор дії на людину, який в певних умовах призводить до захворювань або зниження працездатності.

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори за природою дії поділяються на такі групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні.

До фізичних небезпечних та шкідливих виробничих факторів належать: рухомі машини та механізми; підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищена чи понижена температура поверхонь устаткування, матеріалів чи повітря робочої зони; підвищений рівень шуму, вібрацій, статичної електрики, вологість; небезпечне значення напруги в електричному колі.

До психофізіологічних небезпечних та шкідливих виробничих факторів належать фізичні (статичні та динамічні) і нервово-психічні перевантаження (розумове перенапруження, перенапруження органів чуття, монотонність праці, емоційні перевантаження).

Один і той же небезпечний і шкідливий виробничий фактор за природою своєї дії може належати одночасно до різних груп.

Залежно від наслідків впливу на працюючих шкідливих та небезпечних виробничих факторів розрізняють виробничі травми, професійні захворювання та професійні отруєння, внаслідок яких може відбутись зниження або втрата працездатності (тимчасова чи постійна, повна чи часткова), можливий і фатальний кі-

нець. На зниження безпеки праці при експлуатації промислових роботів можуть впливати наступні фактори: недостатнє освітлення робочого місця, вплив шуму й вібрації, вплив електричного струму й електромагнітних полів, забруднення повітря у робочому просторі.

Перелічені фактори відносяться до небезпечних та шкідливих. Вони проявляються раптово або поступово. Раптове виникнення небезпеки супроводжується травматичними наслідками – виробничими травмами. Поступовий вплив небезпечних факторів спричиняє професійні захворювання або хронічне отруєння. Але, як раптова, так і поступова дія виробничої небезпеки завжди призводить до паталогічних процесів в організмі.

Виробнича травма – порушення анатомічної цілісності організму людини або його функцій внаслідок дії виробничих факторів.

Професійне захворювання – патологічний стан людини, обумовлений роботою і пов'язаний з надмірним напруженням організму або несприятливою дією шкідливих виробничих факторів.

Розглянемо детальніше дію шкідливих факторів на людину, що присутні при експлуатації зварювального обертача.

Зварювальний обертач експлуатується оператором, в функції якого входить:

- безпосереднє керування зварювальним обертачем за допомогою падаючого пристрою;
- візуальний контроль відпрацювання зварювальним обертачем керуючих впливів;
- проведення ремонтно-профілактичних робіт;
- регулярний огляд.

До категорії небезпечних виробничих факторів відносяться:

- необгороджені частини виробничого обладнання і самого об'єкта, які обертаються або переміщуються;
- переміщення заготовки або деталі;
- підвищення напруги в електричних колах, при якому може відбутися замикання струму на землю через тіло людини;

- нагріті поверхні.

До категорії шкідливих виробничих факторів відносяться:

- підвищена запиленість і загазованість повітря в робочій зоні;
- високий рівень шуму і вібрацій;
- недостатня освітленість робочої зони і погана якість освітлення.

4.1.1 Вплив вібрації на організм людини

Вібраційна хвороба – це стійке порушення фізіологічних функцій організму, обумовлене переважно дією вібрацій на центральну нервову систему. Ці порушення проявляються у виді головного болю, запаморочення, поганого сну, пониженої працездатності, поганого самопочуття, порушення серцевої діяльності.

Загальна вібрація з частотою менше 0,7 Гц хоча і неприємна, але не викликає вібраційної хвороби. Наслідком такої вібрації є морська хвороба, що з'являється унаслідок порушення нормальної діяльності органів рівноваги через резонансні явища.

Локальна вібрація спричиняє спазми судин, які починаються з кінцевих фаланг пальців і поширюються на всю кисть, передпліччя, захоплює судини серця. Наслідком цього є погіршення постачання кінцівок кров'ю. Одночасно спостерігається вплив вібрації на нервові закінчення, м'язові і кісткові тканини, що виражається в порушенні чутливості шкіри, окостенінні сухожиль м'язів і відкладеннях солей в суглобах рук і пальців, що призводить до болів, деформацій і зменшення рухливості суглобів. При локальній вібрації спостерігаються порушення діяльності центральної нервової системи, як і при загальній вібрації.

Між певними реакціями організму й рівнем впливу вібрацій немає лінійної залежності. Причина цього лежить у резонансному ефекті. При підвищенні частоти коливань більше 0,7 Гц, можливі резонансні коливання в органах людини. Резонанс людського тіла, окремих його органів, настає під дією зовнішніх сил при зборі певних частот коливань внутрішніх органів із частотами зовнішніх сил.

Вібраційна хвороба відноситься до групи профзахворювань, ефективне лікування яких можливе лише на ранніх стадіях. Відновлення порушених функцій

проходе дуже повільно, а в особливо важких випадках у організмі наступають безповоротні зміни, що приводять до інвалідності.

Розрізняють гігієнічне і технічне нормування вібрацій. В першому випадку проводять обмеження параметрів вібрації робочих місць і поверхні контакту з руками працюючих, виходячи з фізіологічних вимог, виключає можливість виникнення вібраційної хвороби. У другому випадку виконують обмеження параметрів вібрації із урахуванням не лише вказаних вимог, але й з технічно досяжного на сьогоднішній день для даного виду машин рівня вібрації. При цьому враховують умови установки й режим роботи стаціонарного віброактивного технологічного обладнання в цехах, умови експлуатації ручного механізованого інструмента.

Гігієнічне нормування вібрацій регламентує параметри виробничої вібрації й правила роботи з вібронебезпечними механізмами й устаткуванням, ГОСТ 12.1.012-90 «ССБТ. Вібраційна безпека. Загальні вимоги». Даний документ установлює класифікацію вібрацій, методи гігієнічної оцінки, нормовані параметри і їхні припустимі значення, режими роботи осіб вібронебезпечних професій, які піддаються впливу локальної вібрації, вимогам до забезпечення віробезпеки й до вібраційних характеристик машин.

4.1.2 Виробничий шум, як негативний фактор, що впливає на людину

Шум визначають як сукупність аперіодичних звуків різної інтенсивності й частоти. Виробничим шумом називається шум на робочих місцях, ділянках або територіях виробництв, що виникає під час виробничого процесу.

За спектральним складом, залежно від переваги звукової енергії у відповідному діапазоні частот, розрізняють низько-, середньо-, і високочастотні шуми, по тимчасових характеристиках – постійні й непостійні; останні, у свою чергу, діляться на коливальні, переривчасті та імпульсні; по тривалості дії – тривалі й короточасні. З гігієнічних позицій велике значення мають амплітудно-тимчасові, спектральні й імовірнісні параметри непостійних шумів, найбільш характерних для сучасного виробництва.

Інтенсивний шум на підприємстві сприяє зниженню уваги й збільшенню числа помилок при виконанні роботи, особливо сильний вплив робить шум на

швидкість реакції, збір інформації й аналітичні процеси, через шум знижується продуктивність праці й погіршується якість роботи. Шум ускладнює своєчасну реакцію працюючих на попереджуючі сигнали внутрішньо-цехового транспорту (автонавантажувачів, мостових кранів), що сприяє виникненню нещасних випадків на виробництві.

У біологічному відношенні шум є яскравим стресовим фактором, здатним викликати зрив пристосувальних реакцій. Шум впливає на весь організм людини: пригнічує центральну нервову систему, виникає зміна швидкості подиху й пульсу, сприяє порушенню обміну речовин, виникненню серцево-судинних захворювань, гіпертонічної хвороби, може привести до професійних захворювань.

Нормовані параметри шуму на робочих місцях визначені в ГОСТ 12.1.003-88. В ньому закладено принцип встановлення певних параметрів шуму, виходячи з класифікації приміщень за їх використанням для трудової діяльності різних видів. Даний документ дає класифікацію шумів по спектру на широкосмугові й тональні, а по тимчасових характеристиках – на постійні й непостійні.

У виробничих умовах часто виникає небезпека комбінованого впливу високочастотного шуму й низькочастотного ультразвуку.

Ультразвук, як пружні хвилі не відрізняється від чутного звуку, але, частота коливального процесу сприяє великому вгасанню коливань через трансформацію енергії в теплоту.

По частотному спектрі, ультразвук класифікують на: низькочастотні коливання $1,12 \cdot 10^4 \dots 1,0 \cdot 10^5$ Гц; високочастотні коливання $1,0 \cdot 10^5 \dots 1,0 \cdot 10^9$ Гц; по способу розповсюдження - на повітряний й контактний ультразвук.

Ультразвук шкідливо діє на організм людини, спричиняє функціональні порушення нервової системи, зміни тиску, складу і властивості крові. Часто бувають скарги на головні болі, швидку стомлюваність, втрату слухової чутливості.

Ультразвук може діяти на людину як через повітряне середовище, так і через рідку і тверду середу (контактна дія на руки).

Біологічний ефект впливу на організм залежать від інтенсивності, часу впливу й розмірів поверхні тіла, які піддаються дії ультразвуку. Гігієнічні нормативи ультразвуку позначені ГОСТ 12.1.001-89.

4.1.3 Електромагнітні поля

Джерелом електромагнітних полів (ЕМП) є: атмосферна електрика, радіо-випромінювання сонця, квазістатичні, електричні та магнітні поля землі, штучні джерела (електротермічні установки з машинними генераторами, клістрони та магнетронні генератори і т.д.).

Електромагнітні поля промислової частоти утворюють лінії електропередач напругою до 1150 кВ, відкриті розділові пристосування, які включають комунікаційні апарати, прилади захисту й автоматики, вимірювальні прилади.

Під впливом ЕМП та випромінювань спостерігаються загальна слабкість, підвищена втома, пітливість, сонливість, а також розлад сну, головний біль, біль в ділянці серця. З'являється роздратування, втрата уваги, зростає тривалість мовно-рухової та зорово-моторної реакцій, підвищується межа нюхової чутливості. Виникає ряд симптомів, які є свідченням порушення роботи окремих органів – шлунку, печінки, селезінки, підшлункової та інших залоз. Пригнічуються харчовий та статевий рефлекс.

Реєструються зміни артеріального тиску, частота серцевого ритму, форма електрокардіограми. Це свідчить про порушення діяльності серцево-судинної системи. Фіксуються зміни показників білкового та вуглеводного обміну, збільшується вміст азоту в крові та сечі.

Нормування електромагнітних полів промислової частоти проводять за гранично-припустимим рівнем напруги електричного й магнітного полів частотою 50 Гц залежно від часу перебування в них і регламентуються за ГОСТ 12.1.002-84 і «Санітарними нормами і правилами виконання робіт в умовах впливу електричних полів промислової частоти» № 5802-91.

Перебування в електричному полі напругою до 5 кВ/м включно допускається протягом всього робочого дня.

Магнітні поля можуть бути постійними від штучних магнітних матеріалів і систем, імпульсними, низькочастотними (із частотою до 50 Гц), змінними. Дія магнітних полів може бути постійною і змінною.

Одним з розповсюджених небезпечних виробничих факторів є електричний струм. Проходячи через організм людини, електричний струм здійснює термічний, електричний, механічний і біологічний вплив.

Термічна дія струму проявляється опіками окремих ділянок тіла, нагріванням до високої температури органів, розташованих на шляху струму, викликаючи в них значні функціональні порушення.

Електролітична дія виражається в розкладанні органічної рідини, у тому числі крові, у порушенні її фізико-хімічного состава. Механічна дія струму приводить до розшарування, розриву тканин організму в результаті електродинамічного ефекту, а також миттєвого вибухонебезпечного утворення газу із синовіальної рідини й крові.

Біологічна дія струму проявляється роздратуванням і порушенням живих тканин організму, а також порушенням внутрішніх біологічних процесів. В результаті можуть виникати різні порушення в організмі, в тому числі порушення або повне припинення діяльності органів дихання та кровообігу. Дратівна дія струму на тканини організму може бути прямою, коли струм проходить безпосередньо по цим тканинам, та рефлекторною, тобто через нервову систему, коли шлях струму лежить поза цих тканин.

4.1.4 Виробниче освітлення

Важливим фактором, що впливає на продуктивність праці є освітленість робочого місця. Організація раціонального освітлення робочого місця - одне з основних питань охорони праці. При незадовільному освітленні різко знижується продуктивність праці, можливі нещасні випадки, поява короткозорості, швидке стомлення.

Основним завданням виробничого освітлення є підтримка на робочому місці освітлення, що відповідає характеру здорової праці. Збільшення освітлення робочої поверхні поліпшує видимість об'єктів за рахунок підвищення їхньої яскра-

вості, збільшує швидкість розрізнення деталей, що виражається на рості продуктивності праці.

При організації виробничого освітлення, необхідно забезпечити рівномірний поділ яскравості на робочій поверхні й навколишніх предметах. Переклад погляду з яскраво освітленої на слабо освітлену поверхню змушує ока адаптуватися, що приводить до стомлення очей і, відповідно, до зниження продуктивності праці. Для підвищення рівномірності природного освітлення більших цехів використовується комбіноване висвітлення. Світле фарбування стелі, стін і устаткування сприяє рівномірному поділу яскравості в поле зору працюючого.

Виробниче освітлення повинне забезпечувати відсутність у поле зору працюючих різких тіней. Наявність різких тіней спотворює розміри й форми об'єктів дозволу, і тим самим підвищує стомлюваність, знижує продуктивність праці. Особливо шкідливі рухомі тіні, які можуть привести до травм.

Для поліпшення умов видимості об'єктів у поле зору працюючого треба виключати прямий і відбитий блиск. Блесткість – це підвищена яскравість освітлених поверхонь, що викликає порушення зорових функцій (осліплення), тобто погіршення видимості об'єктів. Блесткість обмежують зменшенням яскравості джерела світла, правильним вибором типу світильника.

Коливання освітлення на робочому місці, викликано, наприклад, різкою зміною напруги в мережі, спричиняються переадаптацію ока, приводячи до значного стомлення.

Виробниче освітлення повинне забезпечувати необхідний спектральний состав світлового потоку. Ця умова особливо істотна для забезпечення правильної передачі світла, а в окремих випадках для посилення колірних контрастів. Оптимальний спектральний состав забезпечує природне освітлення.

Освітлювальні установки повинні бути зручними й простими в експлуатації, довговічними, відповідати умовам естетики, пожежної безпеки, а також не повинні бути причиною вибуху або пожежі.

Залежно від джерела світла, виробниче освітлення може бути природним, котре забезпечується прямими сонячними променями й розсіяним світлом, штуч-

ним, яке забезпечується електричними джерелами світла, і змішаним, при якому відсутнє по нормах природне висвітлення робочих місць (загальне локалізоване висвітлення). Комбіноване освітлення складається із загального й місцевого. Місцеве освітлення забезпечується світильниками, які концентрують світловий потік безпосередньо на робочих місцях. Використання тільки місцевого освітлення не допускається, щоб не допустити виробничий травматизм і професійні захворювання.

За функціональним призначенням штучне освітлення розділяють на наступні види: робоче, аварійне, евакуаційне, охоронне, чергове.

Для створення нормальних умов виробничої діяльності необхідно забезпечити необхідну чистоту повітря. Внаслідок виробничої діяльності у повітряне середовище приміщень можуть надходити різноманітні шкідливі речовини, що використовуються в технологічних процесах. Шкідливими вважаються речовини, що при контакті з організмом людини за умов порушення вимог безпеки можуть призвести до виробничої травми, професійного захворювання або розладів у стані здоров'я, що визначаються сучасними методами як у процесі праці, так і у віддалені строки життя теперішнього та майбутнього поколінь (ГОСТ 12.1.007-76).

4.2 Техніка безпеки

4.2.1 Пристрої та технічні засоби безпеки

Для забезпечення безпеки на зварювальному обертачі застосовуються:

- аварійна кнопка «Стоп» поза небезпечної зони роботи;
- вихід обертача за межі запрограмованого робочого простору обмежується жорсткими упорами;
- пристрої, що забезпечують зупинку виконавчого механізму при:
- попаданні людини в запрограмовану область робочого простору;
- виходу планшайби за межі робочого простору;
- пристрої блокування, що забезпечує утримання вантажу у разі несподіваного припинення подачі електроенергії;

- пристрої, що блокують роботу обертача при порушенні огороження робочого простору;
- запобіжні клапани або інші пристрої, що оберігають від підвищення тиску в системі. У вибухонебезпечних середовищах в гідроприводах застосовуються негорючі робочі рідини.

Електричні дроти, вимикачі та розподільники виконані з необхідною вимогою до ізоляції.

Для запобігання попаданню в робочий простір робочого персоналу встановлена огорожа. Робочий простір необхідно позначити суцільними лініями шириною 50-100 мм, що наносяться на площину підлоги фарбою жовтого кольору, стійкою до стирання.

Конструкція огороження відповідає функціональному призначенню і конструктивному використанню устаткування. Конструкція і кріплення огороження виключають можливість випадкового дотику працюючого персоналу з огорожувальними елементами. Огороження, які знаходяться навколо обертача, відкриваються вручну кілька разів протягом зміни, і мають відповідні блокувальні пристрої. Огорожу зафарбовується в сигнальний колір.

4.2.2 Електробезпека

На машинобудівних заводах, в цехах застосовуються електричні ланцюги з ізолюваною нейтраллю, тому ємність таких мереж відносно землі незначна внаслідок малої розгалуженості такої мережі. При такій схемі мережі і режимі нейтралі застосовується захисне заземлення для усунення небезпеки ураження електричним струмом людини, яка випадково торкається до струмоведучих частини обладнання.

Для забезпечення електробезпеки експлуатації обертача використовується надійне заземлення. До заземлюючих затискачів, встановлених у шафі з електрообладнанням, проведений від заземлюючого контуру провідник, перетином не менше 4 мм. Перехідний опір між металевими частинами не вище 0,1 Ом.

4.2.3 Пожежна безпека

Організаційно-технічні заходи щодо забезпечення пожежної безпеки включають:

- організацію пожежної охорони;
- паспортизацію матеріалів, технічних процесів в частині забезпечення пожежної безпеки;
- організацію навчання працівників правилам пожежної безпеки на виробництві;
- розробку і реалізацію норм і правил пожежної безпеки;
- застосування засобів наочної агітації по забезпеченню пожежної безпеки.

Пожежна техніка для захисту об'єктів відповідає вимозі ГОСТ 12.1.004-76, а саме:

- пожежне обладнання використовується тільки для боротьби з пожежами;
- на об'єкті, що захищається вивішуються плани відповідно до вимог ГОСТ 12.1.004-76 із зазначенням місць розташування пожежного обладнання;
- ділянки поверхні, на яких розташовуються ручні вогнегасники, пристрої установок пожежегасіння фарбуються в білий колір фарбою, з окантовкою шириною 20-25 мм.

Автоматичні установки об'єктного пожежегасіння, котрі мають електричну частину, призначені для захисту приміщень і людей від пожежі. Установки допускаються до введення в експлуатацію при наявності в них:

- звукового, світлового пожежних сигналів освітлення;
- пристрої перемикання пуску на ручний режим;
- установка розташовується в 5 м від технологічного комплексу.

Для гасіння пожеж на електроустановках застосовують розпилений струмінь води, оскільки електропровідність розпиленої води невелика.

Також використовуються пожежні вогнегасники порошкового типу, які розташовані на пожежному щиті у огорожі технологічного комплексу.

В якості пожежного обладнання застосовується водонапірна мережа, на якій встановлено пожежне обладнання. Вентилі з пожежними рукавами знаходяться в

шафах через 20-25 м по всій протяжності водопровідної мережі. Пожежний ручний інструмент розміщується в цеху:

- ємність для піску повинна становити не менше $0,1 \text{ м}^3$ і розташовуватися у огорожі технологічного комплексу;
- бочки для зберігання води місткістю не менше $0,2 \text{ м}^3$ розташовуються в 10-15 м від технологічного комплексу;
- лопати та ломів розміщуються поблизу технологічного комплексу на пожежному щиті разом з вогнегасниками біля огорожі технологічного комплексу.

4.3 Висновки до розділу 4

4.3.1 Проведено аналіз шкідливих і небезпечних факторів, що впливають на людину при експлуатації зварювального обертача.

4.3.2 Надано рекомендації щодо техніки безпеки при роботі зварювального обертача.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі представлені результати, які узагальнюють теоретичні дослідження автоматизованого електропривода механізму нахилу зварювального обертача.

1. Розглянуто склад та призначення механічного зварювального обладнання. Складено опис зварювального обертача М 11050А та проаналізовано склад його електрообладнання. Виявлено, що наявність у складі зварювального устаткування механічного та допоміжного зварювального обладнання має величезне значення для комплексної механізації процесу зварювання. Механізовані та автоматизовані пристосування для збірки зварної конструкції і переміщення її в процесі зварювання використовують для зменшення трудомісткості і тривалості роботи, підвищення якості та зниження собівартості виробів.

Встановлено, що в системах допоміжного зварювального обладнання використовуються електроприводи постійного та змінного струму. В ході виконання дослідження, згідно поставлених завдань, виявлено, що загальні особливості використання електроприводів в зварювальному обладнанні включають в себе наступне:

- для регульованих електроприводів діапазон регулювання 1:10; 1:15;
- захищеність від впливу факторів, які супроводжують горіння зварювальної дуги;
- можливість вибору номінальної частоти обертання валу 1000-5000 об/хв для стандартних електродвигунів;
- захищеність від електромагнітної перешкоди як сліdstва зміни в широких межах значення струму в зварювальному ланцюзі;
- малі масогабаритні показники, прийнятні для установки в мобільне зварювальне обладнання;
- показники характеристик, що визначають високі динамічні властивості.

2. Побудовано функціональну схему системи керування електропривода механізму нахилу зварювального обертача та обґрунтовано вибір її елементів. За

своїм призначенням привод нахилу планшайби зварювального обертача повинен забезпечити нахил планшайби з фіксованою швидкістю в задане положення з необхідною точністю. Отже на базі аналізу сучасних систем керування електроприводів змінного струму в роботі обрано скалярне керування. Завдяки скалярному керуванню забезпечується стала перевантажувальна здатність асинхронного двигуна, що не залежить від частоти напруги.

При обґрунтуванні вибору елементів автоматизованого електропривода механізму нахилу в якості приводного двигуна використано мотор-редуктор GKS09-4MНAR. Конічно-циліндричні редуктори цієї серії здатні виробляти надзвичайно точні і повторювані позиціонування завдяки їх високій жорсткості і низькому люфту. В якості перетворювача частоти обрано 8400 Motec, який володіє всіма необхідними режимами роботи: U/F-керування (лінійне, квадратичне), векторне керування, керування моментом. Розроблену схему підключень перетворювача частоти.

3. Побудовано модель системи керування електропривода механізму нахилу зварювального обертача та виконано розрахунок параметрів її елементів. Оскільки при стабілізації швидкості система працює в малих відхиленнях щодо робочої точки стабілізації, при математичному описі асинхронного двигуна в роботі використано його лінійну модель. При вирішенні завдання синтезу регуляторів для автоматизованого електропривода, з умов забезпечення бажаного/необхідного перехідного процесу, в роботі виконано налаштування регуляторів швидкості та положення на модульний (технічний) оптимум, при якому передбачаються невелике перерегулювання і відносно висока швидкодія. При цьому реалізація замкненого контуру регулювання положення здійснюється за допомогою програмного ПІД-регулятора перетворювача частоти.

4. В роботі розглянуто динаміку моделі автоматизованого електропривода механізму нахилу зварювального обертача за допомогою програмного пакету MATLAB. Отримано перехідні характеристики. У більшості приводів найкращим вважається такий перехідний процес відпрацювання середніх/великих переміщень, коли швидкість двигуна в процесі відпрацювання заданого кута змінюється по тра-

пецеїдальному графіку, оскільки це дозволяє в повній мірі використовувати перевантажувальну здатність двигуна і виключає виникнення перерегулювання в перехідному процесі. Аналіз результатів дослідження якості показав, що розроблена система керування має динамічні показники, які цілком задовольняють сформульованим у завданні вимогам: $\sigma=0\%$, $\varepsilon_{уст}=1,5\%$ (≤ 2).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Севбо П. И. Конструирование и расчет механического сварочного оборудования / Севбо П. И. – Киев, Наук, думка, 1978. – 400 с.
2. Вращатели сварочные моделей: М 11050А, М 21050А, М 31050А, М 33050. Руководство по эксплуатации. Ужгород. 1986.
3. Терехов В. М. Системы управления электроприводов. /В.М. Терехов, О.И. Осипов. – М.: Академия, 2005. – 300 с.
4. Конічно-циліндричні мотор-редуктори Lenze серії GKS // Привідна техніка Lenze в Україні – Режим доступу: <http://www.lenze.org.ua/>
5. Inverter Drives 8400 motec // Automation systems Drive solutions: L-force catalogue – Режим доступу: <http://www.lenze.com>
6. Принцип работы инкрементного и абсолютного энкодера // Сайт DeviceSearch.ru – Режим доступу: <http://www.devicesearch.ru/article/enkodery>
7. Фомин Н. В. Системы управления электроприводами [Электронный ресурс] : учебное пособие / Николай Владимирович Фомин ; ФГБОУ ВПО «Магнито-горский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – Элек-трон. текстовые дан. (4,6 Мб). – Магнитогорск : ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2014. – 1 электрон. опт. диск (CD-R).
8. Башарин А. В. Управление электроприводами: учеб. пособие для вузов / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
9. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.
10. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп; пер. с англ. Б. И. Копылова. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004. – 832 с.

ДОДАТОК А
Мультимедійна презентація

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Навчально-науковий
Інститут автоматики та електротехніки

Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня магістра
на тему:

**«Автоматизований електропривод
механізму нахилу зварювального обертача»**

Студент магістратури:	Лихой Д. А.
Керівник кваліфікаційної роботи	доц. каф. автоматики, к.т.н.,
магістра:	доц. Зубарев А. А.

Миколаїв 2025

Рисунок А.1 – Слайд 1 мультимедійної презентації

Мета роботи. Об'єкт і предмет дослідження

Мета роботи	Синтез системи керування електропривода механізму нахилу зварювального обертача
Об'єкт дослідження	Перехідні процеси в асинхронному електроприводі механізму нахилу зварювального обертача
Предмет дослідження	Структура та параметри регуляторів асинхронного електропривода механізму нахилу зварювального обертача, які впливають на якість керування

Рисунок А.2 – Слайд 2 мультимедійної презентації

Завдання дослідження

- 1 Розглянути склад та призначення механічного зварювального обладнання. Скласти опис зварювального обертача M 11050A та проаналізувати склад його електрообладнання.
- 2 Побудувати функціональну схему системи керування електропривода механізму нахилу зварювального обертача та обґрунтувати вибір її елементів. Розробити схему підключення перетворювача частоти.
- 3 Побудувати модель системи керування електропривода механізму нахилу зварювального обертача та виконати розрахунок параметрів її елементів.
- 4 Провести моделювання системи керування електропривода механізму нахилу зварювального обертача в MATLAB та дослідити вплив параметрів регуляторів на якість керування.

Рисунок А.3 – Слайд 3 мультимедійної презентації

Загальна характеристика об'єкта керування

Загальний вигляд зварювального обертача
М 11050А

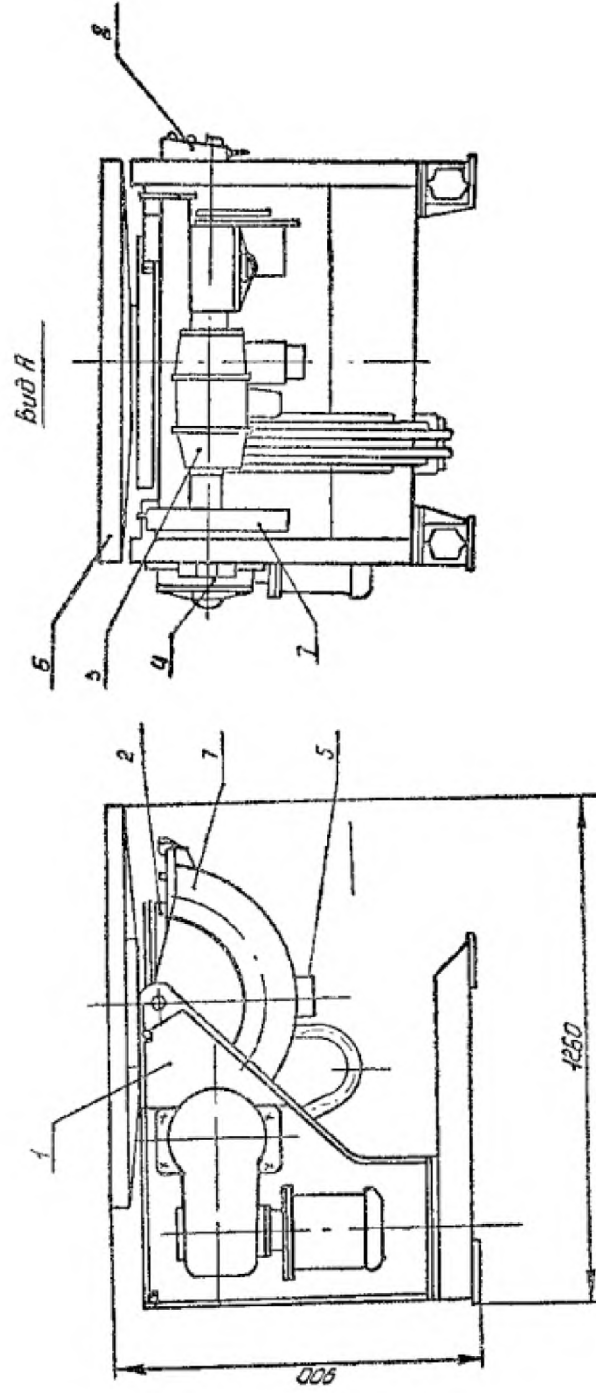


Технічні характеристики зварювального
обертача М 11050А

Найменування параметра	Значення
Найбільший крутильний момент, Н·м:	
– на вісі обертання планшайби	1000
– відносно опорної площини планшайби	1600
Найбільша вантажопідйомність, кг	1000
Частота обертання планшайби, об/хв	0,05-2,5
Найбільший кут нахилу планшайби, град	135
Швидкість нахилу планшайби, об/хв	1

Рисунок А.4 – Слайд 4 мультимедійної презентації

Розташування складових частин обертача М 11050А

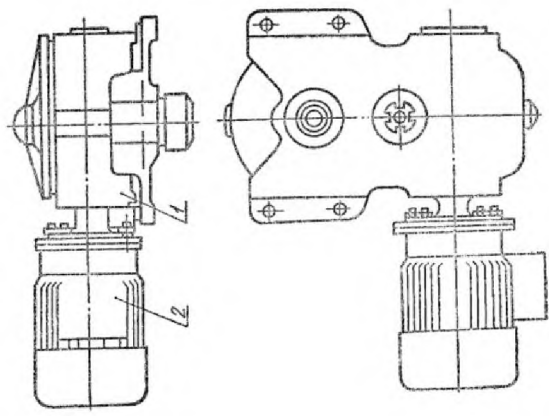


- 1 – станина; 2 – стіл привідний; 3 – привод обертання; 4 – привод нахилу; 5 – повітроприймач;
6 – планшайба; 7 – зубчастий сектор механізму нахилу; 8 – пульт керування

Рисунок А.5 – Слайд 5 мультимедійної презентації

Загальна характеристика привода нахилу планшайби

Привод нахилу



1 – черв'ячно-циліндричний редуктор;
2 – електродвигун

Технічна характеристика електрообладнання

Найменування параметра	Значення
Рід струму електропривода нахилу планшайби	змінний, трифазний
Напруга електропривода нахилу планшайби, В	380
Потужність електродвигуна привода нахилу, кВт	0,75
Частота обертання електродвигуна привода нахилу, об/хв	1500

Рисунок А.6 – Слайд 6 мультимедійної презентації

Функціональна схема електропривода нахилу планшайби

7

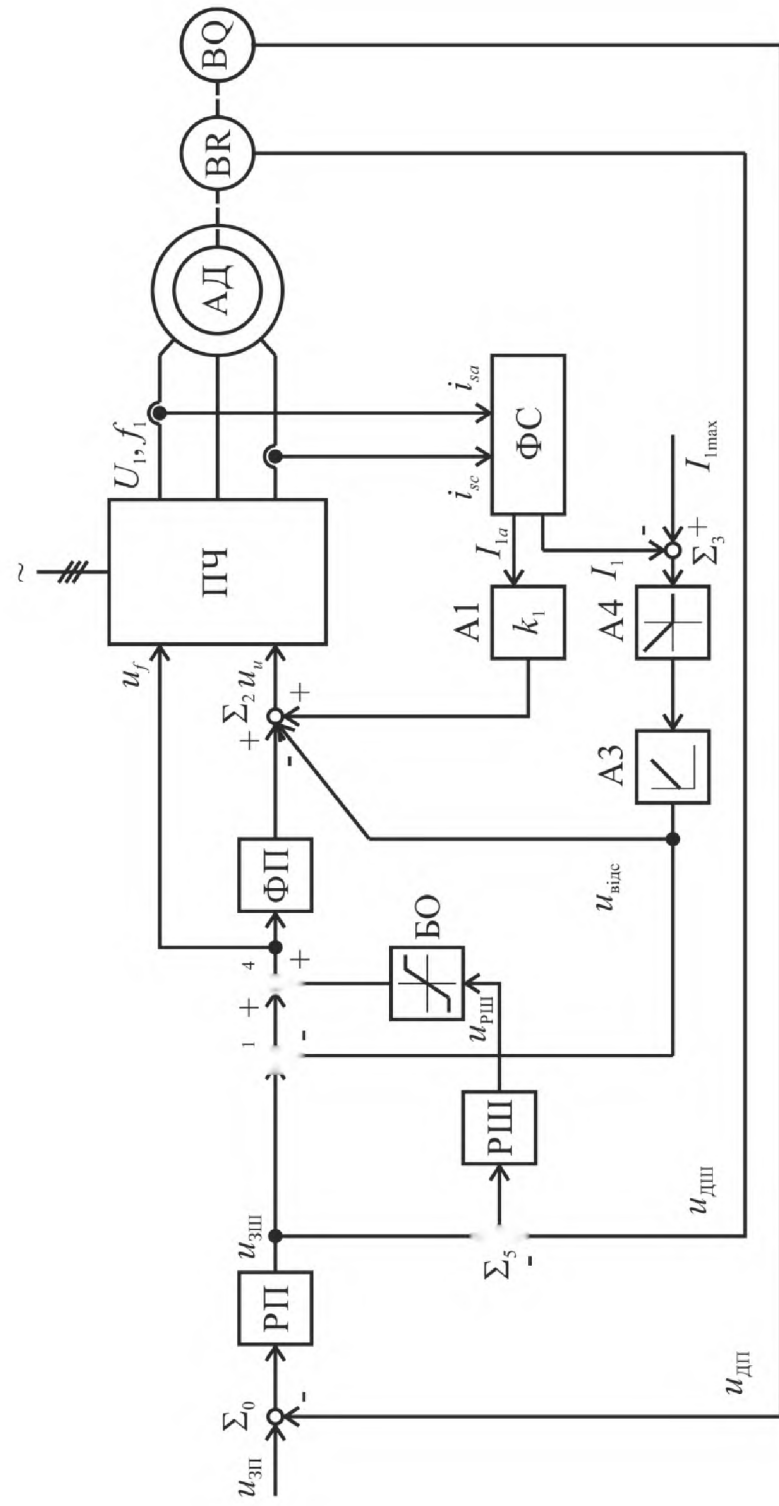


Рисунок А.7 – Слайд 7 мультимедійної презентації

Схема підключення перетворювача частоти 8400 Motec

8

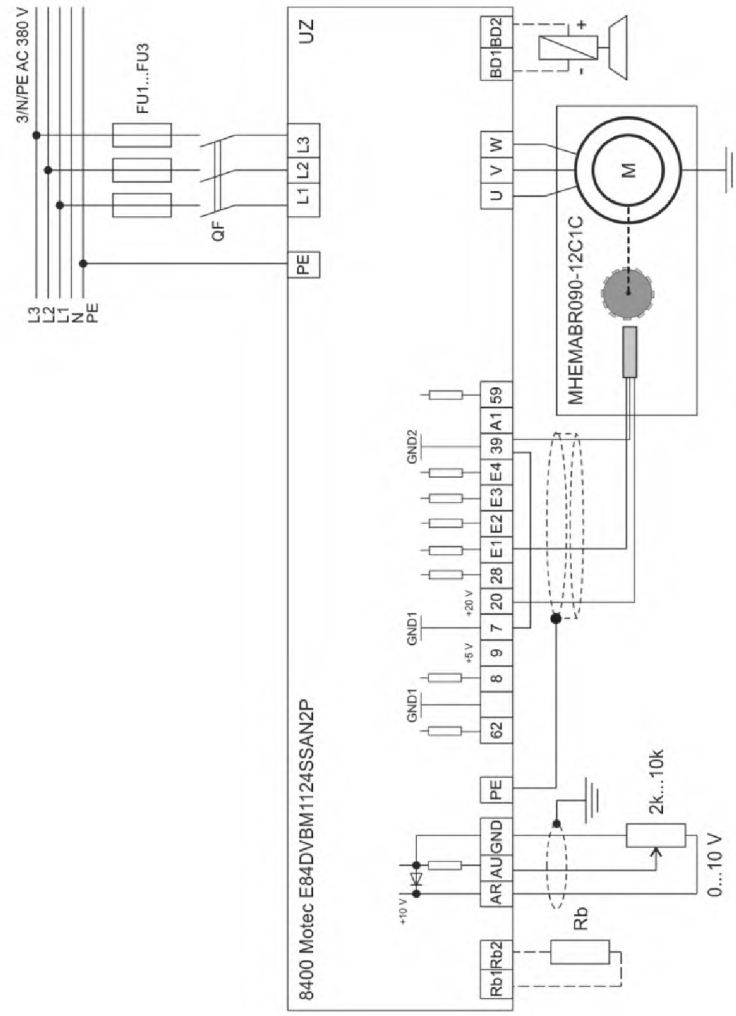


Рисунок А.8 – Слайд 8 мультимедійної презентації

Структурна схема електропривода нахилу планшайби

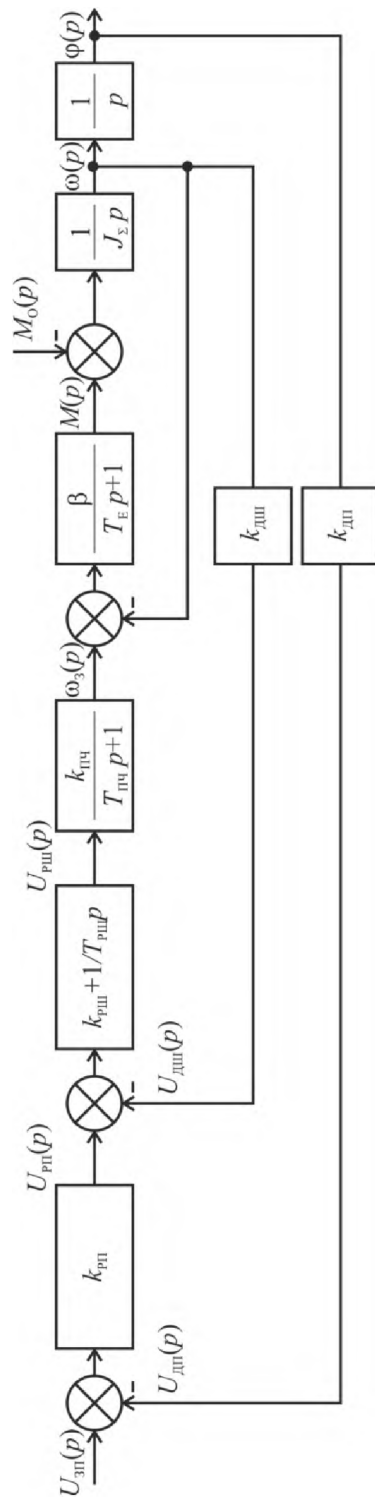
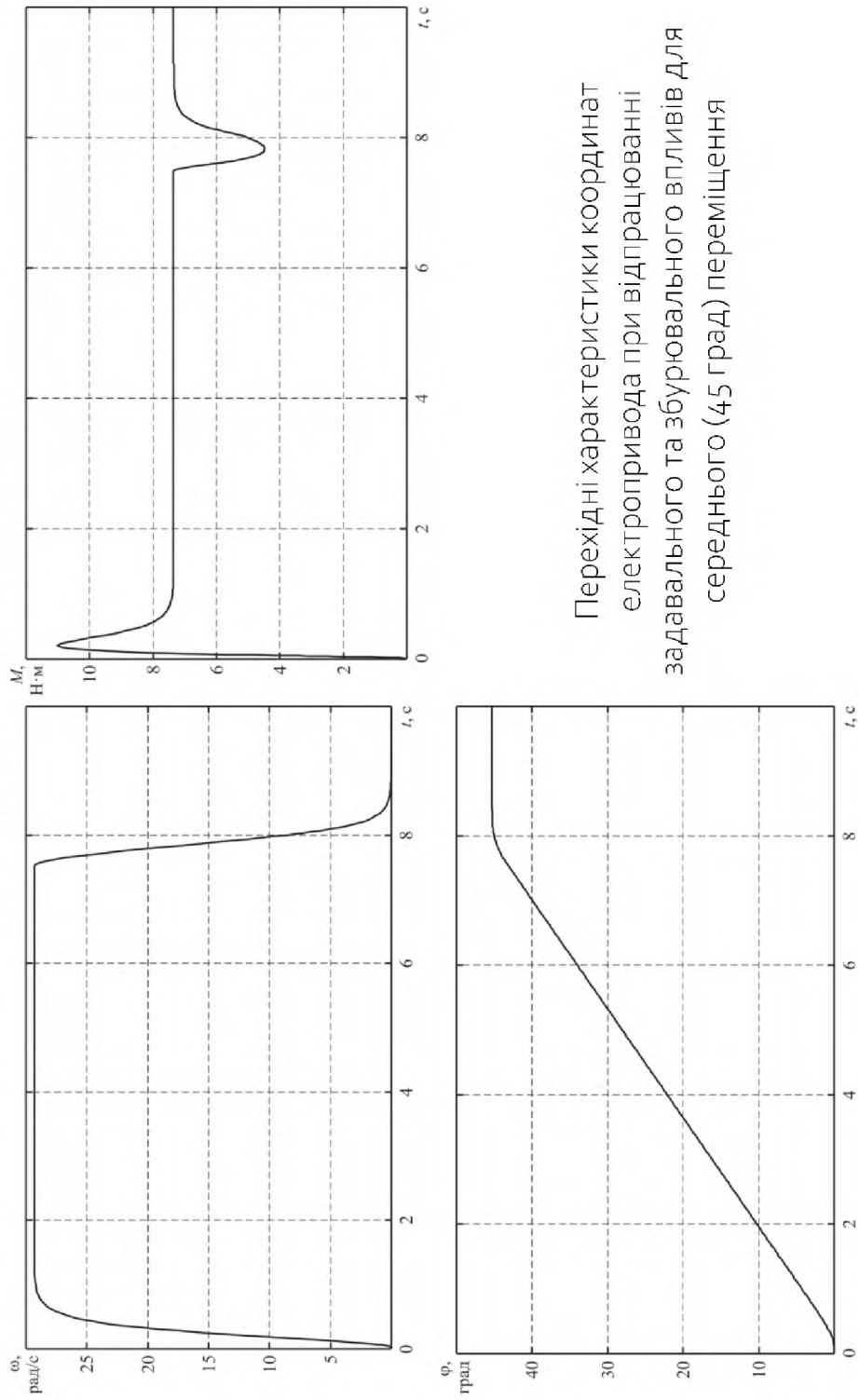


Рисунок А.9 – Слайд 9 мультимедійної презентації

11

Дослідження динаміки

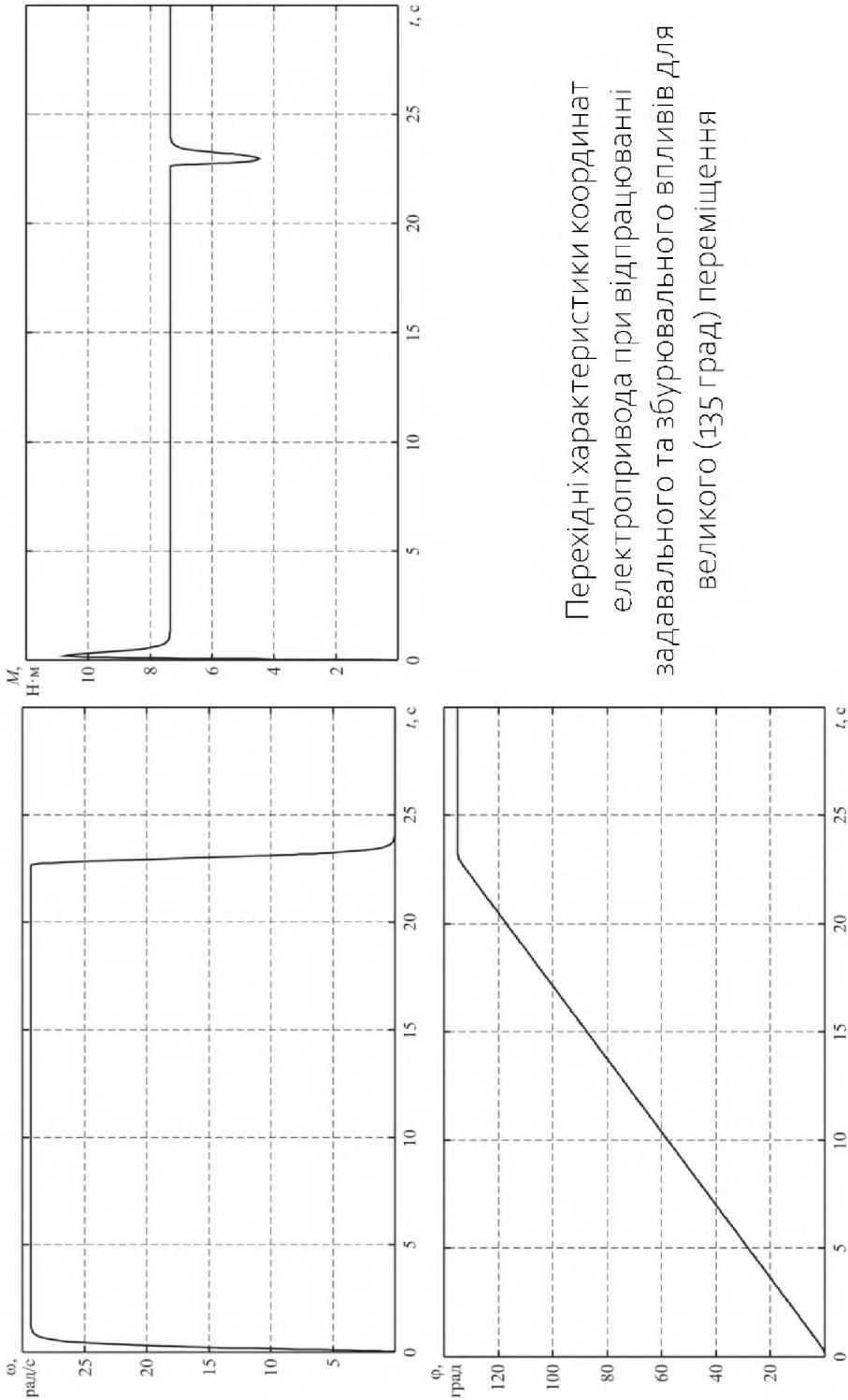


Перехідні характеристики координат електродпривода при відпрацюванні задавального та збурювального впливів для середнього (45 град) переміщення

Рисунок А.11 – Слайд 11 мультимедійної презентації

12

Дослідження динаміки

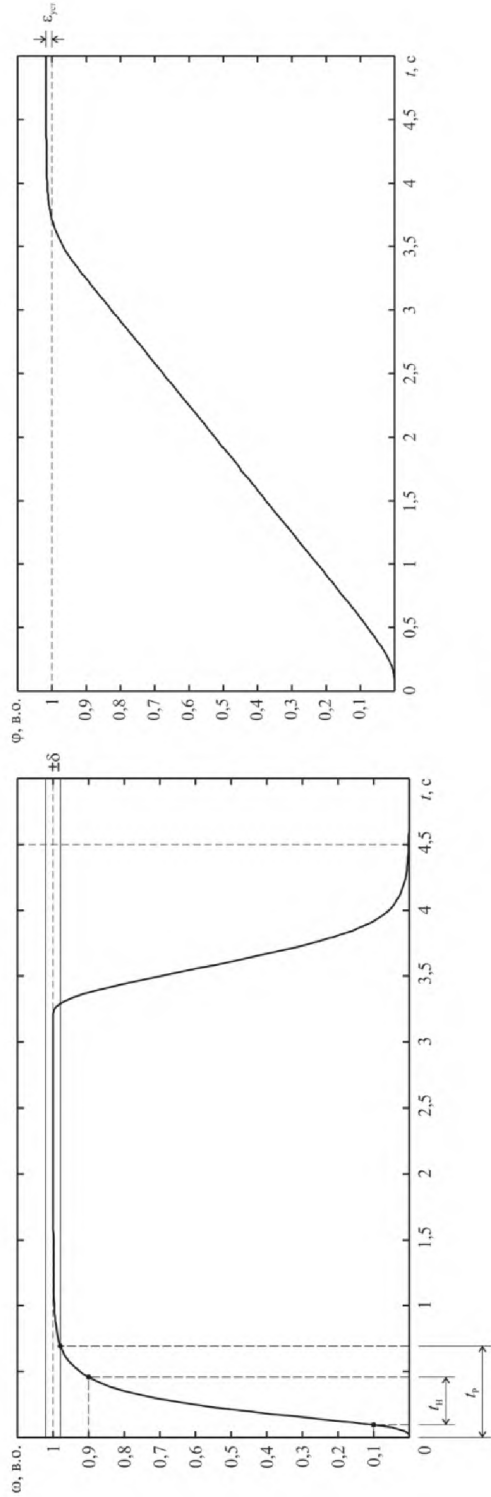


Перехідні характеристики координат електропривода при відпрацюванні задавального та збурювального впливів для великого (135 град) переміщення

Рисунок А.12 – Слайд 12 мультимедійної презентації

Дослідження динаміки

Реакція системи керування на ступінчастий сигнал



Показники якості

Параметр	Відносне перерегулювання $\sigma, \%$	Час встановлення t_p, c	Час наростання t_n, c	Усталена похибка $\epsilon_{уст},$ %
Кутова швидкість	0	0,69	0,36	0
Кут нахилу	0	-	-	1,5

Рисунок А.13 – Слайд 13 мультимедійної презентації

Висновки

- 1 Досліджено склад та призначення механічного зварювального обладнання. Складено опис зварювального обертача М 11050А та проаналізовано склад його електрообладнання. Виявлено, що наявність у складі зварювального устаткування механічного та допоміжного зварювального обладнання має величезне значення для комплексної механізації процесу зварювання. Механізовані та автоматизовані пристосування для збірки зварної конструкції і переміщення її в процесі зварювання використовують для зменшення трудомісткості і тривалості роботи, підвищення якості та зниження собівартості виробів.
- Встановлено, що загальні особливості використання електроприводів в зварювальному обладнанні включають в себе наступне:
- для регульованих електроприводів діапазон регулювання 1:10; 1:15;
 - захищеність від впливу факторів, які супроводжують горіння зварювальної дуги;
 - можливість вибору номінальної частоти обертання валу 1000-5000 об/хв для стандартних електродвигунів;
 - захищеність від електромагнітної перешкоди як слідства зміни в широких межах значення струму в зварювальному ланцюзі;
 - малі масогабаритні показники, прийнятні для установки в мобільне зварювальне обладнання;
 - показники характеристик, що визначають високі динамічні властивості.

Висновки

2 Побудовано функціональну схему системи керування електропривода механізму нахилу зварювального обертача та обґрунтовано вибір її елементів. За своїм призначенням привод нахилу планшайби зварювального обертача повинен забезпечити нахил планшайби з фіксованою швидкістю в задане положення з необхідною точністю. Отже на базі аналізу сучасних систем керування електроприводів змінного струму в роботі обрано скалярне керування. Завдяки скалярному керуванню забезпечується стала перевантажувальна здатність асинхронного двигуна, що не залежить від частоти напруги.

При обґрунтуванні вибору елементів автоматизованого електропривода механізму нахилу в якості приводного двигуна використано мотор-редуктор GKSo9-4MHAR. Конічно-циліндричні редуктори цієї серії здатні виробляти надзвичайно точні і повторювані позиціонування завдяки їх високій жорсткості і низькому люфту. В якості перетворювача частоти обрано 8400 Motes, який володіє всіма необхідними режимами роботи: U/F-керування (лінійне, квадратичне), векторне керування, керування моментом. Розроблену схему підключень перетворювача частоти.

Висновки

- 3 Побудовано модель системи керування електропривода механізму нахилу зварювального обертача та виконано розрахункові параметри її елементів. Оскільки при стабілізації швидкості система працює в малих відхиленнях щодо робочої точки стабілізації, при математичному описі асинхронного двигуна в роботі використано його лінійну модель. При вирішенні завдання синтезу регуляторів для автоматизованого електропривода, з умов забезпечення бажаного/необхідного перехідного процесу, в роботі виконано налаштування регуляторів швидкості та положення на модульний (технічний) оптимум, при якому передбачаються невелике перерегулювання і відносно висока швидкодія. При цьому реалізація замкненого контуру регулювання положення здійснюється за допомогою програмного ПІД-регулятора перетворювача частоти.
- 4 В роботі розглянуто динаміку моделі автоматизованого електропривода механізму нахилу зварювального обертача за допомогою програмного пакету MATLAB. Отримано перехідні характеристики. У більшості приводів найкращим вважається такий перехідний процес відпрацювання середніх/великих переміщень, коли швидкість двигуна в процесі відпрацювання заданого кута змінюється по трапецеїдальному графіку, оскільки це дозволяє в повній мірі використовувати переваг та жувальну здатність двигуна і виключає виникнення перерегулювання в перехідному процесі. Аналіз результатів дослідження якості показав, що розроблена система керування має динамічні показники, які цілком задовольняють сформульованим у завданні вимогам: $\sigma=0\%$, $\varepsilon_{уст}=1,5\%$ (≤ 2).