

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет автоматизації виробництва та цифрових технологій
Кафедра автоматизації, електро- та робототехнічних систем

«Допущено до захисту»
Гарант ОПП

Олексій КОЙФМАН

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістра

за підсумками виконання
освітньо-професійної програми
«Інтелектуальні системи управління
в гірничо-металургійному виробництві»
за спеціальністю 151 Автоматизація
і комп'ютерно-інтегровані технології

**на тему «Автоматизація переміщення супортів токарно-
карусельного верстату SKD для оброблення габаритних деталей у
механоскладальному цеху з метою підвищення ефективності
роботи верстата»**

Керівник роботи

Олексій РАЗЖИВІН

Консультант від
бази практики

Євгеній КОНДРАТЬЄВ

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело*

Здобувач

Євгеній ЛАКТИОНОВ

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Андрій ЛЕОНОВ

Кам'янське 2024

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет	<u>автоматизації виробництва та цифрових технологій</u>
Кафедра	<u>автоматизації, електро- та робототехнічних систем</u>
Ступінь вищої освіти	<u>магістр</u>
Спеціальність	<u>151 Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології</u>
ОПП	<u>Інтелектуальні системи управління в гірничо-металургійному виробництві</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант ОПП

Олексій КОЙФМАН

«24» листопада 2023 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА
Лактіонову Євгенієві Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Автоматизація переміщення супортів токарно-карусельного верстату SKD для оброблення габаритних деталей у механоскладальному цеху з метою підвищення ефективності роботи верстата
керівник роботи Разживін Олексій Валерійович, доцент, канд. техн. наук,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Університету від 29.08. 2023 р. №137.1/29.08.2023
2. Строк подання роботи 10.01.2024 р.
3. Вихідні дані до роботи Навчальна література, державні стандарти з автоматизації, методична література з спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи з тематики автоматичного регулювання та управління, літературні джерела, технологічні інструкції тощо
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки Анотація. Зміст. Вступ (актуальність теми; наукова новизна та практичне значення; об'єкт, предмет та методи дослідження, апробація роботи). 1. Аналіз предметної області (літературний огляд, недоліки існуючих систем, сучасні тенденції). 2. Постановка задач автоматизації та обґрунтування запропонованої структури системи управління(2.1 Основні операції верстату, 2.2 Електропривод планшайби. 2.3 Електропривод подачі. 2.4 Математичне моделювання частотно-регульованого електроприводу суппорту) 3. Вибір обладнання та технічних засобів автоматизації (3.1 Розробка компонування приводної системи верстата 3.2 Конфігурування привода головного руху. 3.3 Вибір вимірювальних перетворювачів. 3.4 Конфігурування приводів. 3.5 Конфігурування модуля живлення).
4. Економічне обґрунтування запропонованої системи. Висновки. Перелік використаних джерел. Додатки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Схема підключення модулів живлення електроприводу верстата. Схема підключення модулів двигуна супортів. Схема підключення модуля управління. Блок-схема алгоритму функціонування СЧПУ. Плакат математичне моделювання електроприводу розрахунків.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта

7. Дата видачі завдання 24.11.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Розділ 1. Аналіз предметної області	25.12.2023 – 28.12.2023
2	Розділ 2. Постановка задач автоматизації та обґрунтування запропонованої структури комп'ютерної системи управління	25.12.2023 – 28.12.2023
3	Розділ 3. Реалізація запропонованої системи автоматизації	28.12.2023 – 02.01.2024
4	Розділ 4. Економічне обґрунтування запропонованої системи автоматизації	03.01.2024 – 07.01.2024
5	Висновки, перелік посилань, вступ, зміст, анотація	07.01.2024 – 08.01.2024
6	Подання завершеної роботи. Перевірка на академічний плагіат	08.01.2024 – 10.01.2024
7	Остаточне оформлення роботи, презентаційного матеріалу, автореферату	10.01.2024 – 16.01.2024
8	Рецензування завершеної роботи. Захист	16.01.2024 – 24.01.2024

Здобувач

_____ **Лактіонов Є.О.**
(підпис) (ПІБ)

Керівник

_____ **Разживін О.В.**
(підпис) (ПІБ)

АНОТАЦІЯ

Лактіонов Євгеній Олександрович. Автоматизація переміщення супортів токарно-карусельного верстату SKD для оброблення габаритних деталей у механоскладальному цеху з метою підвищення ефективності роботи верстата. - Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». ОПП «Інтелектуальні системи управління у гірничо-металургійному виробництві» – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Кам'янське, 2024.

Метою кваліфікаційної роботи є збільшення кількості виготовлення готових деталей процесу металообробки на токарно-карусельного верстату SKD-50 шляхом автоматизації електроприводу переміщення супорта.

Об'єктом дослідження є мехатронна система токарно-карусельного верстату.

Предметом дослідження є автоматизація системи пересування супортів токарно-карусельного верстату.

У першому розділі розглянуто питання стосовно роботи верстату та основних його частин.

У другому розділі проведено аналіз технологічного процесу обладнання, ознайомлення з технологічними картами.

У третьому розділі детально виконана заміна головного приводу постійного струму на змінний, розробка компонування приводної системи верстату, вибір вимірювальних перетворювачів швидкості.

У четвертому розділі обґрунтовано відповідними розрахунками підтверджено економічну доцільність впровадження запропонованої системи автоматизації.

У графічній частині наведені: схема підключення модулів живлення електроприводу верстата, схема підключення модулів двигуна супортів, схема підключення модуля управління. Блок схема алгоритму функціонування СЧПУ, плакат математичне моделювання електроприводу розрахунків.

SKD-50, SINUMERIK, КЕРУВАННЯ, ГОЛОВНИЙ ПРИВІД, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ЕНКОДЕР, БЛОК ЖИВЛЕННЯ, ІНТЕРФЕЙС, СИГНАЛ, ДВИГУН, ДАТЧИК, СЧПУ

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ ПОТОЧНОГО СТАНУ ПИТАННЯ.....	9
1.1 Літературний огляд рішень технологічного процесу механообробки	9
1.2 Принцип роботи токарно-карусельного верстату.....	10
1.3 Технічні дані	14
1.3.1 Привід планшайби	15
1.3.2 СупортМеті.....	16
1.4 Опис електричного обладнання верстату	18
2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ	20
2.1 Основні операції верстату.....	20
2.2 Електропривод планшайби	20
2.3 Електропривод подачі	21
2.4 Математичне моделювання частотно-регульованого електроприводу супорту.....	21
2.5 Синтез регуляторів частотного електропривода	28
3 ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ .	38
3.1 Розробка компонування приводної системи верстата.....	38
3.2 Конфігурування привода головного руху.....	41
3.3 Вибір вимірювальних перетворювачів швидкості	42
3.4 Конфігурування приводів подач.....	49
3.5 Конфігурування модуля живлення.....	52
3.6 Вибір системних компонентів.....	54
3.7 Розробка алгоритму функціонування системи.....	57
4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ	62
4.1 Витрати на модернізацію	64
4.2 Фонд часу роботи нової машини.....	65
4.3 Складання техніко-економічних показників модернізації	66
ВИСНОВКИ	68

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	69
ДОДАТОК А	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТОК Б	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТОК В	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТОК Г	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТОК Г'	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТОК Д	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТОК Є	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТОК Е	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТОК Ж СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ	Ошибка! Закладка не определена.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач.

ГС – гідросупорт.

КВТ – кіловат.

ЧПУ – числове програмне управління.

АС – змінний струм.

ASIC – інтегральна схема спеціального призначення.

DC – постійний струм.

DSP – цифрова обробка сигналів.

FKGH – Fruitz Kuebler GmdH.

FPGA – Field-Programmable Gate Array Програмована користувачем
вентильна матриця

JP – джемпер.

ON – команда для дозволу роботи перетворювача.

ORCM – команда для орієнтованого гальмування.

RE – команда для нулювання захистів.

SR/SF – команди для керування напрямком обертання двигуна.

TLH – команда для обмеження моменту на високому рівні.

TLL – команда для обмеження моменту на низькому рівні.

ВСТУП

Головна особливість карусельного верстата – вертикальне розташування осі обертання. Ці верстати призначені для будь-якої токарної обробки (точіння та розточування циліндричних і конічних поверхонь, підрізування торців, прорізання канавок, нарізання різьблення) деталей великих габаритів. При оснащенні верстата додатковими пристроями можна точити фасонні поверхні по копію. При встановленні пристроїв на карусельному верстаті можна проводити фрезерування та шліфування.

Основним вузлом є стіл із планшайбою, на якій кріпиться заготовка. По двох стійках, з'єднаних порталом (аналог напрямних), переміщається траверса. На траверсі розташовано два супорти. Правий супорт - револьверний. Він складається з поздовжньої каретки і повзуна, що переміщається вертикально. На повзуні розташована револьверна головка. Револьверний супорт використовується під час підрізування торців під час свердління отворів, іноді для обробки зовнішніх поверхонь.

Другий супорт називається розточувальним супортом. Він складається з поздовжньої каретки, на якій встановлюється поворотна частина, на якій є повзун, на який встановлюється різцетримач. Розточувальний супорт використовується під час розточування отворів, прорізання внутрішніх канавок і під час обробки конічних поверхонь. На правій стійці розташований бічний супорт. Він складається з поздовжньої каретки, повзуна і різцетримача і призначений для обробки зовнішніх поверхонь.

Характеризуючим розміром карусельних верстатів є діаметр планшайби. Залежно від цього розміру бувають одностійкові (з діаметром планшайби ≤ 2000 мм) і двостійкові верстати (з діаметром понад 2000 мм).

Рухи у верстаті:

1. головний рух - обертання планшайби із заготівлею;
2. рух подачі - переміщення супортів;
3. допоміжний рух - переміщення траверси; цей рух потрібен для підведення інструменту ближче до заготовки.

У даній кваліфікаційній роботі будемо розглядати токарно-карусельний верстат моделі SKD-50.

Апробація результатів магістерської роботи:

Лактіонов Є.О. Способи керування частотним перетворювачем. Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод : матеріали VII Всеукр. науково-практ. конф., м. Краматорськ, 20–22 квіт. 2023 р. / ред. О. Ф. Тарасов. Краматорськ–Тернопіль, ДДМА, 2023. С. 233–237.

1 АНАЛІЗ ПОТОЧНОГО СТАНУ ПИТАННЯ

1.1 Літературний огляд рішень технологічного процесу механообробки

Обробка на металорізальних верстатах складається з ряду дій, що виконуються у певній послідовності, які поділяють на прийоми управління та дії формоутворення. До них відносяться: встановлення та затискання заготовки, пуск верстата, підведення інструменту, контроль оброблюваної заготовки, зупинка верстата та зняття обробленої заготовки. Кожну з цих дій можна виконувати із застосуванням ручної праці або автоматично, тобто без безпосередньої участі робітника.

Під механізацією технологічного процесу розуміють заміну ручної праці машинною в частині процесу, пов'язаної зі зміною форми заготівлі (наприклад, різання, штампування тощо).

Автоматизація являє собою механізацію прийомів управління та обслуговування верстатів та інших машин, і їхніх систем, а також виробничих процесів загалом.

Найважливішими напрямками підвищення продуктивності металорізальних верстатів є скорочення основного (машинного) і допоміжного часу. Широке впровадження швидкісного різання металів дало змогу різко знизити основний час, унаслідок чого змінилася структура штучного часу, тобто підвищилася питома вага допоміжного часу. Тому ефективність автоматизації технологічних процесів визначається насамперед досягнутим скороченням допоміжного часу, а також часу технічного та організаційного обслуговування робочого місця. Так, основні напрямки автоматизації токарного оброблення передбачають: механізацію управління швидкостями і подачами; швидке підведення і відведення супорта; точну зупинку супорта в кінцевому робочому положенні; механізацію повороту і фіксації різальної голівки; автоматизацію підведення і відведення різця під час нарізання різьблення; автоматизацію простих циклів оброблення для одного або кількох щаблів; устаткування верстатів магазинним пристроєм; застосування копіїв тощо.

Для автоматизації дій формоутворення верстата постачають відповідними механізмами управління.

Такий механізм може бути простим, якщо він служить для здійснення будь-якої однієї дії, або складним, якщо з його допомогою здійснюють кілька дій.

Механізація та автоматизація процесів обробки поширюються також і на настановні переміщення, контроль, регулювання та управління процесом.

Дослідженнями стосовно реалізації автоматизованих систем керування електроприводними системами верстатів займалися багато авторів. Їх наукові та практичні здобутки наведено в наступних роботах.

Автор роботи Козирєв С.К. у роботі [1] визначив основні напрями та принципи побудови електричного приводу загальнопромислових механізмів. У посібнику [2] авторами проведено детально розглянуті принципи інжинірингу електроприводів і систем автоматизації з визначенням основних проблем електроприводів та детальне описання різних систем автоматизації для збільшення виробничої продукції. Мартинов А.А. у своєму посібнику [3] виклав методику проектування електроприводі яка в подальшому застосована для синтезу та реалізації електроприводної системи супортів верстату.

Загальні принципи та методика математичного моделювання електроприводних систем управління постійного та змінного струму наведено у роботі [4]. Дана робота має послідовний розвиток у автора роботи [5], в даній праці докладно розглянуто питання проектування цифрового частоно-регульованого електроприводу головного руху та електроприводів супортів верстатів. Питання практичної реалізації стосовно підключення електричного приводу та синхронізації координат приводних систем верстатів розкрито у роботі [2] Москаленко В.В.

Роботи [7, 12] присвячена впровадженню сучасних рішень автоматизації для електроприводів переміщення різального вузла. Питанням впровадження електромеханічних системи автоматичного керування та електроприводу займались автори роботи [8] та [9]. Основні теоретичні положення основи керування електроприводом розглянуті Самосейко В.Ф. у роботі [10].

У роботі Соколовський Г.Г. [11] проведено теоретичні дослідження та практична реалізація електроприводу змінного струму з частотним регулюванням. Обґрунтована економічна та практична доцільність заміни головного приводу верстата постійного струму на привід змінного струму з перетворювачем на постійний струм живлення приводів.

1.2 Принцип роботи токарно-карусельного верстату

Токарно-карусельні верстати використовують для обробки великогабаритних деталей типу тіл обертання з великим відношенням діаметра до висоти заготовки.

Верстати мають підвищений клас точності. Вони оснащені контурним пристроєм ЧПУ і пристроєм для автоматичної зміни інструменту. У напівавтоматичному циклі на верстатах виконують такі операції: точіння і розточування прямолінійних і криволінійних

поверхонь, оброблення торцевих поверхонь, канавок, виточок; свердління, зенкерування та розгортання центральних отворів; нарізування різьблень. Управління верстатами здійснюється пристроєм ЧПУ за заданою програмою. Інформація про переміщення супорта верстата, а також інша технологічна і розмірна інформація висвічується на табло пристрою ЧПУ. Точність обробки на верстатах відповідає 7 квалітету.

З великогабаритних (унікальних) токарно-карусельних двостійкових верстатів з ЧПУ слід зазначити верстат моделі SKD-50, призначений для чорнового і чистового оброблення деталей вузлів атомних реакторів. Верстат виконує такі технічні операції:

1. зовнішнє і внутрішнє точіння тіл обертання з прямолінійним і криволінійним утворювальним;
2. підрізування, прорізування торців і відрізання;
3. точіння торця з постійною швидкістю різання;
4. свердління, розточування, зенкерування, розгортання, фрезерування, нарізування різьблення різцем і мітчиком під час роботи шпинделем обох супортів; шліфування діаметрів до 10000 мм.

На планшайбу можна кріпити комплект балок для установки деталей діаметром до 20000 мм. Крім головного приводу є привід кругової подачі і позиціонування планшайби, що дає змогу обробляти складні поверхні, зокрема ексцентричні кола.

Верстат оснащений кутовою і поворотною фрезерними головками, шліфувальною головкою, які можна встановлювати на будь-який супорт. Застосовано конструктивні рішення, що забезпечують високу вантажопідйомність і точність обертання планшайби (гідростатичне змащування), високу жорсткість несучої системи верстата (зварені корпусні деталі), ефективне застосування ЧПУ (беззасорні приводи подачі, комбіновані напрямні ковзання-обертового гостріння), тривале збереження початкової точності (компенсувальна балка, надійне змащування, захист напрямних, діагностика несправностей).

Обробку деталей діаметром до 4000 мм можна проводити на унікальному двостійковому токарно-карусельному верстаті SKD-50.

Система програмного керування верстатом - замкнута з контролем за переміщенням і дає змогу виконувати розточування ступінчастих, циліндричних і конічних поверхонь. Програма обробки записується на перфорованій кінострічці, зчитується електроконтактним зчитувальним пристроєм і запам'ятовується в блоці пам'яті. З блоку пам'яті технологічні команди - напрямок подачі, швидкість подачі і швидкість обертання планшайби - надходять до схеми електроприводу верстата, а задані переміщення виконавчих органів вводяться в двійковому кодї в електронний тригерний лічильник, увімкнений за схемою віднімання.

Вимірювальний пристрій монтується на супорті токарного верстата або різцетримачі карусельного верстата. Його можна встановлювати також на спеціальному підвідному пристосуванні. Вимірювальну головку надійно кріплять за допомогою плити. При цьому слід звертати увагу на положення осі вимірювального диска, яка має бути суворо паралельною осі обертання деталі. Під час установа вимірювального пристрою на карусельному верстаті паралельність осей перевіряють накладним рівнем із ціною поділки 40 сек. Допустимий перекид осей не більше 5 хв. Рівень накладається на горизонтально розташований торець ролика. Торцеве биття ролика неприпустимо.

З метою скорочення витрат часу на холості переміщення супортів і поперечки токарно-карусельні верстата забезпечуються пристроєм для їх прискорених переміщень.

В автоматизованих токарно-карусельних верстатах, наприклад у верстатах із програмним керуванням, поворот і закріплення револьверної голівки здійснюють автоматично за допомогою пристрою, який приводиться від електродвигуна, встановленого на повзуні.

Деякі моделі токарно-карусельних верстатів на вимогу замовників забезпечуються спеціальним пристосуванням для роботи по упорах. Це пристосування складається з поворотних валиків-барабанів, на яких встановлюються пересувні упори кінцевого вимикача. Упори налаштовуються за допомогою мікрометричного пристрою. Число упорів на валику-барабані відповідає числу позицій різального інструменту.

Обробка сферичних і радіусних поверхонь за допомогою повідкових пристроїв (пристосувань). Іншу групу пристосувань, що застосовуються на токарно-карусельних верстатах для обробки сферичних і радіусних поверхонь, складають так звані повідкові пристрої.

Успішне застосування на токарно-карусельних верстатах знаходять три типи копіювальних пристроїв: механічні, електричні та гідравлічні.

Застосовувані на токарно-карусельних верстатах механічні копіювальні пристрої підрозділяються на пристосування з двостороннім і одностороннім копірами.

У пристосуванні першого типу ролик копірного пальця, пов'язаний з різцем, вільно переміщається між двома копірними лінійками. Такі пристосування застосовуються при важких (грубих) і неточних роботах. У пристосуваннях другого типу ролик притискається до задньої копірної лінійки. У цьому випадку радіальна складова сили різання притискає ролик до копіра. Така схема влаштування копірних пристосувань найбільш прийнятна для чистової обробки.

Гідравлічні копіювальні пристрої (зокрема й ГС гідросупорти) поки що, на жаль, ще не набули широкого поширення на токарно-карусельних верстатах. У тих же випадках, коли вони застосовуються, вдається досягти значного підвищення продуктивності праці.

Фасонне розточування і точіння на верстатах з копіювальними пристроями і на верстатах з ЧПУ проводиться в тих випадках, коли застосування фасонного інструменту утруднене або неможливе. Залежно від розмірів оброблюваних деталей застосовують токарні, токарно-лобові або токарно-карусельні верстати, обладнані копіювальним пристроєм. Фасонні деталі, які є тілами обертання, успішно обробляють на верстатах з ЧПУ.

Токарно-карусельні верстати з контурними пристроями ЧПУ (виконання ФЗ) призначені для оброблення деталей із чорних і кольорових металів в умовах одиничного, дрібносерійного та серійного виробництва.

На них можна проводити обточування і розточування поверхонь із прямолінійними і криволінійними утворювальними, проточування торцевих поверхонь, прорізання кільцевих канавок, свердління, зенкерування і розгортання центральних отворів тощо. Ці верстати особливо ефективні під час обробки деталей з великим числом точних поверхонь.

Налагодження токарно-карусельного верстата виконують у такій послідовності: за картою налагодження добирають різальний інструмент, блоки, державки та пристрої для закріплення в них різального інструменту за потреби проводять поза верстатом перевірку настроювання або налагодження різального інструменту на задані картою налагодження координатні розміри за допомогою спеціальних приладів встановлюють налагоджений інструмент у супорти.

Оснащення токарно-карусельних верстатів додатковими пристроями і пристосуваннями дає змогу здійснювати на них операції фрезерування, шліфування, свердління і розточування отворів поза центром деталі.

Одним із найпоширеніших видів обробки різанням корозійностійких і жароміцних сталей, а також жароміцних і титанових сплавів є точіння. Великі корпусні деталі з цих матеріалів обточують на карусельних верстатах і розточують на розточувальних або карусельних верстатах. Дрібніші деталі обробляють на центрових токарних верстатах. Є значна кількість спеціальних токарних верстатів, часто з копіювальними пристроями, які використовують для обточування дисків газових турбін, лопаток та інших деталей, що виготовляються у великих кількостях.

Структура металорізальних верстатів формувалася і розвивалася головним чином у напрямку досягнення доцільного виконання

комплексу операцій формоутворення, тобто обробки виробів. Виконання операції контролю завантаження, розвантаження і видалення стружки вирішувалося від випадку до випадку шляхом нашарування вузлів і механізмів до загальної структури верстатів.

У більшості ж виконання цих операцій покладалося на робітника-оператора. У зв'язку з цим нині структура цілої низки верстатів виявляється абсолютно непридатною для автоматизації зазначених допоміжних операцій. Наприклад, у деяких верстатах для центрального шліфування не залишається місця для влаштування завантажувального пристосування.

Все зайнято механізмом правки і контрольним вимірювальним пристроєм. У карусельних, стругальних і фрезерних верстатах неможливо забезпечити автоматичний збір стружки. У токарних верстатах роторного типу важко здійснити завантаження виробів і відведення стружки.

Токарно-карусельний верстат SKD-50 двостійкового виконання використовується для механічного оброблення заготовок із чорних або кольорових металів і сплавів. Токарно-карусельний верстат SKD-50 придатний для застосування в умовах ремонтних майстерень і баз.

На токарно-карусельному верстаті SKD-50 можлива механічна обробка великих і важких заготовок складної конфігурації, які вирізняються великими радіальними та відносно невеликими осьовими розмірами [9].

Типові операції:

1. Торцеве і радіальне фрезерування виробів типу дисків, коліс і втулок, що мають поверхні типу тіл обертання.
2. Шліфування габаритних деталей.
3. Отримання отворів.
4. Розточування.

За наявності додаткових пристосувань, деякі з яких поставляються разом з обладнанням, на токарно-карусельному верстаті SKD-50 допускається також нарізування різноманітних різьблень, а також обробка поверхонь складних форм.

1.3 Технічні дані

1. Стіл – станина, планшайба;
2. привід – привід планшайби;
3. рама – права стойка, ліва стойка, траверса, балка та пристрій для пересування підвісної панелі управління;
4. поперечина – права та ліва площадка;
5. супорти – правий та лівий супорт, боковий супорт;

6. електричний пристрій – підвісна панель управління, шафа розподільного щита.

Стіл – головними частинами є стійка, планшайба та шестерна коробка.

Станина – складається з виливки сталевого лиття, коробчастої форми. В її верхній частині є кругова дорога аксіального гідростатичного укладання планшайби.

У середині станини пригвинчується цапфа для радіального укладання планшайби. На вертикальній зовнішній стінці є фланець для прикріплення шестеренної коробки. З фундаментом з'єднується фундаментними болтами з клиновими підкладками.

Планшайба – вона складається з виливки сталевого лиття, має високий перетин і сильно ребриста. На робочій площині планшайби утворені притискні канавки і канавки для фіксації притискних губок. Планшайба аксіально укладається на аксіальну гідростатичну укладку. Її напрямна площина, утворена в нижній частині планшайби, обкладається штучною масою. Жорсткість аксіального укладання збільшується попередньою напругою через аксіальний шарикопідшипник, розміщений у середині притискної плити.

Планшайба радіально проводиться дворядним роликівим підшипником, який укладається на цапфі. У нижній частині планшайби пригвинчується зубчастий вінець з косим зубчастим зачепленням. Для затиску оброблюваного виробу планшайби оснащується затискними губками.

Перестановка власної притискної губки виконується за допомогою гвинтів, які закінчені зовнішнім і внутрішнім чотиригранниками для ключа. налагодження всієї затискної губки виконується переміщенням по робочій площині планшайби [1].

1.3.1 Привід планшайби

Складається з власної коробки передач і приводного двигуна прямого струму, який з'єднується з коробкою передач пружною муфтою.

Коробка передач поміщається в задній частині верстата під рівнем підлоги, встановлюється циліндричними шестернями з косими шліфованими зубчастими зубами з можливістю різання двох оборотних ступенів. З шестернинною коробкою з'єднується коробка передач за допомогою зубчастого кільця.

Після виймання розділеного кільця і роз'єднання цієї муфти можна всю коробку передач відсунути і вийняти без будь-якого іншого демонтажу.

1.3.2 Супорт

Супорт складається з полозок і поворотної коробки. На задній стінці полозок є напрямні майданчик, напрямна планка і клинові планки, які слугують для направлення супорта по поперечці. Клинова планка служить для налагодження необхідного зазору в напрямній і налагоджується гвинтом після звільнення фіксуючого гвинта. Привід гайок забезпечується однією парою конічних коліс і зубчастою муфтою, що з'єднує ведений вал у санчатах із ведучим валом поворотної коробки. У верхній частині санчат пригвинчується зубчастий сегмент, що служить для перекидання поворотної коробки.

На правій стороні полозок прикріплюється датчик вимірювального пристрою, під яким розміщений змащувальний агрегат, що забезпечує змащування напрямних площини полозок.



Рисунок 1 – Загальний вигляд токарно-карусельного верстату моделі SKD-50

Привід подачі повзуна забезпечує регуляційний електродвигун постійного струму через циліндричну шестерню з прямим зубчастим зчепленням, однією парою конічних коліс із кульковим гвинтом і кульковою гайкою. Електромагнітними муфтами на валу можна в передачу для подачі повзуна ввімкнути або вимкнути вал перебору. Муфти доступні після демонтажу кожуха на правій бічній стінці поворотної коробочки. На валу розміщене електромагнітне гальмо ВКФ,

яке спрацює в разі відмови електричного струму і загальмує самовільний виїзд повзуна з поворотної коробки.

Привід подачі супорта забезпечує регуляційний електродвигун постійного струму через циліндричну шестерню з прямим зубчастим зачепленням із зубчастою муфтою, що з'єднує ведений вал із ведучим у полозках. Електромагнітними муфтами можна в передачу для подачі супорта увімкнути або вимкнути вал відбору потужності. Муфти доступні після демонтажу кожуха на правій бічній стінці поворотної коробки.

Нижче наведені таблиці габаритних даних верстату та електродвигунів:

Таблиця 1 – Технічні характеристики верстату

Характеристика	Одиниця виміру	Значення
Діаметр обточки	мм	5000
Діаметр планшайби	мм	4770
Максимальне навантаження	кг	100 000
Макс. обертальний момент	кНм	232
Число затискних губок	шт	8
Підйом повзуна супорта	мм	2000
Розмір верстату	мм	14200x10400
Висота верстату	мм	8850
Маса верстату	кг	115 000

Таблиця 2 – Перелік електродвигунів

Характеристика	Одиниця виміру	Значення
Потужність загальна	кВт	100
Головний електродвигун планшайби	кВт, об/хв	80; 90-2470
Електродвигун траверсі	кВт, об/хв	18,5; 975
Електродвигун подачі супорта	кВт, об/хв	21; 1-1000
Електродвигун аксіального гідростатичного насоса	кВт, об/хв	3; 1420

Продовження табл. 2

Характеристика	Одиниця виміру	Значення
Електродвигун насоса змазки привода	кВт, об/хв	1,1; 1400
Електродвигун перекидання супорта	кВт, об/хв	1,1; 910
Електродвигун пересування підвісної панелі	кВт, об/хв	0,75; 1400
Електродвигун змащувальних агрегатів	кВт, об/хв	0,12; 1350
Електродвигун змащувальної поворотної коробки супорта	кВт, об/хв	0,06; 2800

1.4 Опис електричного обладнання верстату

Електричне обладнання верстата вирішено таким чином, щоб повною мірою виконувало вимоги до продуктивних, модерних токарних верстатів. По дії можливо електричне обладнання розділити на кілька вузлів, докладний виклад яких наведено в самостійних розділах. Для приводу планшайби застосовано регуляційний двигун постійного струму, запитаний від тиристорного перетворювача.

Це сприяє плавному регулюванню швидкості обертання планшайби в широкому діапазоні та автоматичному фіксуванню встановленої швидкості обертання.

Надалі сприяє токарній обробці з постійною швидкістю обертання планшайби, або з автоматичним регулюванням швидкості обертання для утримання постійної швидкості різання.

Для приводів подач шпинделя застосовані сервоприводи МЕЗОМАТИК, що складаються з тихохідних двигунів постійного струму, що живляться від тиристорних перетворювачів. Це сприяє плавній зміні величини подач у постійній величині.

Правий поперечний супорт обладнаний самостійними сервоприводами для горизонтального руху супорта і вертикального руху повзуна, що у цього супорта сприяє застосуванню суцільного копіювального устаткування. Інші супорта обладнані тільки одним сервоприводом, перемикання якого до горизонтальної, або вертикальної осі здійснюється за допомогою електромагнітних муфт.

Приладова частина електричного устаткування зосереджена на трьох розподільниках. Перший розподільник в собі містить:

1. підвідну клемну складання верстата;

2. захисний електричний автомат, що діє основним комутатором, який включається увесь обробний центр;
3. джерело напруги;
4. адаптивну одиницю привода планшайби;
5. ланцюги напруги та змазки планшайби.

Другий розподільник містить в собі:

1. ланцюги управління пересування поперечини, станини та підвісної панелі;
2. ланцюги управління правим поперечним супортом включаючи тиристорний перетворювач для подач;
3. панель копіювального пристрою.

Третій розподільник містить в собі:

1. ланцюги управління боковим супортом включаючи тиристорний перетворювач для подач;
2. ланцюги управління лівим поперечним супортом включаючи тиристорний перетворювач.

Загальна споживана потужність верстата становить 100 кВт. За цією споживаною потужністю і за напругою мережі необхідно визначити перетин провідників головного підвідного підведення.

Електричні затискачі для приєднання головного підвідного підведення розташовані в нижній частині розподільника. Постачальник головного підведення введе кабель через отвір накладки задньої частини розподільника та забезпечить закінчення й ущільнення кабелю [2].

2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

2.1 Основні операції верстату

Верстат оснащений кутовою і поворотною фрезерними головками, шліфувальною головкою, які можна встановлювати на будь-який супорт. Обробку деталей діаметром до 4000 мм можна проводити на унікальному двостійковому токарно-карусельному верстаті SKD-50.

Основним вузлом є стіл із планшайбою, на якій кріпиться заготовка. По двох стійках, з'єднаних порталом (аналог напрямних), переміщається траверса. На траверсі розташовано два супорти. Правий супорт - револьверний. Він складається з поздовжньої каретки і повзуна, що переміщається вертикально. На повзуні розташована револьверна головка. Револьверний супорт використовується під час підрізання торців під час свердління отворів, іноді для обробки зовнішніх поверхонь.

Другий супорт називається розточувальним супортом. Він складається з поздовжньої каретки, на якій встановлюється поворотна частина, на якій є повзун, на який встановлюється різцетримач. Розточувальний супорт використовується під час розточування отворів, прорізання внутрішніх канавок і під час обробки конічних поверхонь. На правій стійці розташований бічний супорт. Він складається з поздовжньої каретки, повзуна і різцетримача і призначений для обробки зовнішніх поверхонь.

Верстат виконує такі технічні операції:

1. зовнішнє і внутрішнє точіння тіл обертання з прямолінійним і криволінійним утворювальним;
2. підрізування, прорізування торців і відрізання;
3. точіння торця з постійною швидкістю різання;
4. свердління, розточування, зенкерування, розгортання, фрезерування, нарізування різьблення різцем і мітчиком під час роботи шпинделем обох супортів; шліфування діаметрів до 10000 мм.

На планшайбу можна кріпити комплект балок для установки деталей діаметром до 20000 мм. Крім головного приводу є привід кругової подачі і позиціонування планшайби, що дає змогу обробляти складні поверхні, зокрема ексцентричні кола. Технологічна карта металообробки броні 203 вказана у [Додаток Д], [Додаток Е].

2.2 Електропривод планшайби

Для приводу планшайби застосовано регуляційний двигун постійного струму з незалежним збудженням, живиться від тиристорного випрямляча. Діапазон регулювання двигуна становить 90-

2470 хв⁻¹., з цього в діапазоні швидкості обертання 90-900 хв⁻¹. регуляцію виконано напругою якоря за постійного моменту, і в діапазоні швидкості обертання 900-2470 хв⁻¹. роззбудженням двигуна за постійної потужності. Зона регуляції за постійної потужності розширена аж до швидкості обертання 750 хв⁻¹. підвищенням струму якоря двигуна.

Застосований тиристорний перетворювач не має здатність реверсування з можливістю рекуперації електричної енергії в мережу. Він у собі містить реверсуюче джерело збудження, яке, однак, сприяє плавному регулюванню швидкості обертання двигуна в стані спокою реверсуванням збудження. Під час експлуатації потім шляхом реверсування збудження досягається гальмування двигуна рекуперацією електричної енергії в мережу.

2.3 Електропривод подачі

Для приводів подач застосовано асинхронні двигуни. Робочий або швидкодіючий діапазон подач, створений механічним перебором в коробці передач, вибирається за допомогою електромагнітних муфт.

Проти провалювання повзунів у стані спокою верстата є в кінці повзунів пружинні електромагнітні гальма.

Цей вимикач винятково призначений для догляду верстата, сприяє ручному пересуванню повзуна під час ремонтів або під час аварійного вимкнення.

Правий супорт поперечки, у якого є можливість роботи з постійною швидкістю різання для збереження постійної стружки, обладнаний зв'язком між оборотами планшайби і горизонтальною подачею. Зв'язок виконано таким чином, що керуючий потенціометр горизонтальної подачі живиться напругою від таходинамо, розташованого на коробці приводу.

Перемикання з хвилинної в ротаційну подачу здійснюється одночасно з вибором постійної швидкості різання перемикачем [2].

2.4 Математичне моделювання частотно-регульованого електроприводу супорту

Математичне моделювання частотно-регульованого електроприводу здійснимо засобами математичної програми MatLab. Вихідні дані для математичного моделювання наведені в таблиці 3.

Таблиця 3 - Вихідні дані електродвигуна приводу супорту 1LE1503-3BB63-4A44

Найменування параметра	Значення
Номінальна потужність	$P_H = 21 \text{ кВт}$
Номінальна лінійна напруга	$U_H = 380 \text{ В}$
Частота сеті живлення	$f_1 = 50 \text{ Гц}$
Номінальна кутова швидкість обертання валу	$\omega_H = 230 \text{ хс}^{-1}$
Число пар полюсів	$p = 4$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 0,9$
Коефіцієнт потужності	$K_f = 1,35 \text{ о.е.}$
Номінальний струм статора	$I_H = 35,8 \text{ А}$
Кратність пускового струму, моменту	$\lambda_{\pi} = 1,4$
Кратність максимального моменту	$\lambda = 2,1$
Момент інерції	$J = 1,57 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

Параметри асинхронної машини розраховуємо за такими виразами.

Номінальна фазна напруга:

$$U_{\phi} = \frac{U_H}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В.} \quad (2.1)$$

Механічні втрати

$$P_{\text{мех}} = (0,01 \div 0,05)P_H = 0,01 \cdot 21 \cdot 10^3 = 230 \text{ Вт}, \quad (2.2)$$

Наведений активний опір ротора

$$R_r = \frac{1}{3} \frac{P_H + P_{\text{мех}}}{I_H^2 \frac{1 - S_H}{S_H}} = \frac{1}{3} \frac{23 \cdot 10^3 + 230}{35,80^2 \frac{1 - 0,12}{0,12}} = 0,83 \text{ Ом} \quad (2.3)$$

Активний опір статора

$$R_s = \frac{U \cos \phi (1 - \eta)}{I_H} - C^2 R_r - \frac{P_{\text{мех}}}{3I_H^2} =$$

$$= \frac{380 \cdot (1 - 0,89)}{38,5} - 1,01^2 \cdot 0,83 - \frac{230}{3 \cdot 35,8^2} = 0,13, \text{ Ом} \quad (2.4)$$

де $C = (1,01 \div 1,05)$ – коефіцієнт приведення (менше значення для машин більшої потужності).

Наведена індуктивність розсіювання статора і ротора:

$$L_{sp} = L_{rp} = \frac{U}{4\pi f_1 (1 + C^2) K_I I_H} = \frac{380}{4\pi \cdot 50 (1 + 1,01^2) \cdot 1,35 \cdot 35,8} = 0,006 \quad (2.5)$$

Індуктивність статора

$$L_s = \frac{U}{2\pi f_1 I_H \sqrt{1 - \cos^2(\phi)} - \frac{2}{3} \frac{2\pi f_1 M_{max}}{pU \frac{S_H}{S_{кр}}}} =$$

$$= \frac{380}{2\pi \cdot 50 \cdot 35,8 \sqrt{1 - 0,83^2} - \frac{2}{3} \frac{2\pi \cdot 50 \cdot 496,5}{4 \cdot 380} \cdot \frac{0,12}{0,474}} = 0,012, \text{ Гн.} \quad (2.6)$$

Індуктивність ланки намагнічування

$$L_m = L_s - L_{sp} = 0,012 - 0,006 = 0,006 \text{ Гн.} \quad (2.7)$$

Швидкісні характеристики можна отримати, виходячи з виразу для струму I_2' . Розрахуємо швидкісну характеристику для різної частоти напруги живлення.

$$I_2' = \frac{U_\phi(f)}{\sqrt{\left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{S(f)} \right)^2 + (x_\kappa \cdot f^*)^2 \right]}}, \quad (2.8)$$

де $S(f)$ – це ковзання при заданій частоті, яке можна знайти за формулою:

$$S(f) = \frac{\omega_0 \cdot f^* - \omega}{\omega_0 \cdot f^*}, \quad (2.9)$$

де ω_{0H} - номінальна швидкість обертання; f - задана частота напруги живлення; f_i - фактична частота напруги живлення статорної обмотки двигуна.

В результаті підстановки виразу (2.9) в (2.8) отримаємо остаточний вираз для швидкісної характеристики:

$$I_2' = \frac{U_\phi(f)}{\sqrt{\left[\left(R_1 + \frac{R_2' \cdot \omega_{0H} \cdot f^*}{\omega_{0H} \cdot f^* - \omega} \right)^2 + (x_k \cdot f^*)^2 \right]}}. \quad (2.10)$$

Запишемо вирази для моменту АД, підставляючи в нього значення параметрів з урахуванням частоти напруги живлення:

$$M = \frac{3 \cdot U_\phi^2(f) \cdot \frac{R_2'}{S(f)}}{\omega_0(f) \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{S(f)} \right)^2 + x_k^2(f) \right]}. \quad (2.11)$$

В результаті елементарних перетворень виразу (2.30), підставивши в нього (2.31), отримуємо остаточний вираз для побудови механічної характеристики:

$$M = \frac{3 \cdot (U_{\phi.ном} \cdot \sqrt{f^*})^2 \cdot \frac{R_2' \cdot \omega_{0H} \cdot f^*}{\omega_{0H} \cdot f^* - \omega}}{\omega_{0H} \cdot f^* \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2' \cdot \omega_{0H} \cdot f^*}{\omega_{0H} \cdot f^* - \omega} \right)^2 + (x_k \cdot f^*)^2 \right]}. \quad (2.12)$$

Підставивши різні значення частоти напруги живлення $10 \leq f \leq 50$ і швидкості від 0 до $\omega_0(f)$ в залежність (2.12), отримуємо значення моменту для механічних характеристик при різних частотах.

В якості програмного пакета для моделювання напівпровідникових електроприводів найбільш підходящою вважається система MatLab зі своїми пакетами розширення (Toolboxes).

У досліджувану модель (див. рис. 2) увійшли такі елементи:

- Asynchronous Machine SI Unit – математична модель асинхронного двигуна з параметрами, відповідними номінальним паспортним даним двигуна 1LE1503-3BB63-4A44;

- джерела синусоїдальної напруги AC Voltage Source з номінальними параметрами: $f=50$ Гц, $U_m=311$ В; зсунуті по фазі один відносно одного на 120° , моделюють трифазну систему напруг з номінальними значеннями: $U_\phi=220$ В, $U_\pi=380$ В.

- Three-Phase V-I Measurement – трифазний мультиметр для здійснення замірів мережевого струму і напруги.
- Моделі осцилографів для перегляду графіків мережевих струму і напруги, а також зміни в часі частоти обертання ротора двигуна і моменту на його валу.
- Перетворення кутової швидкості обертання вала електродвигуна в частоту.

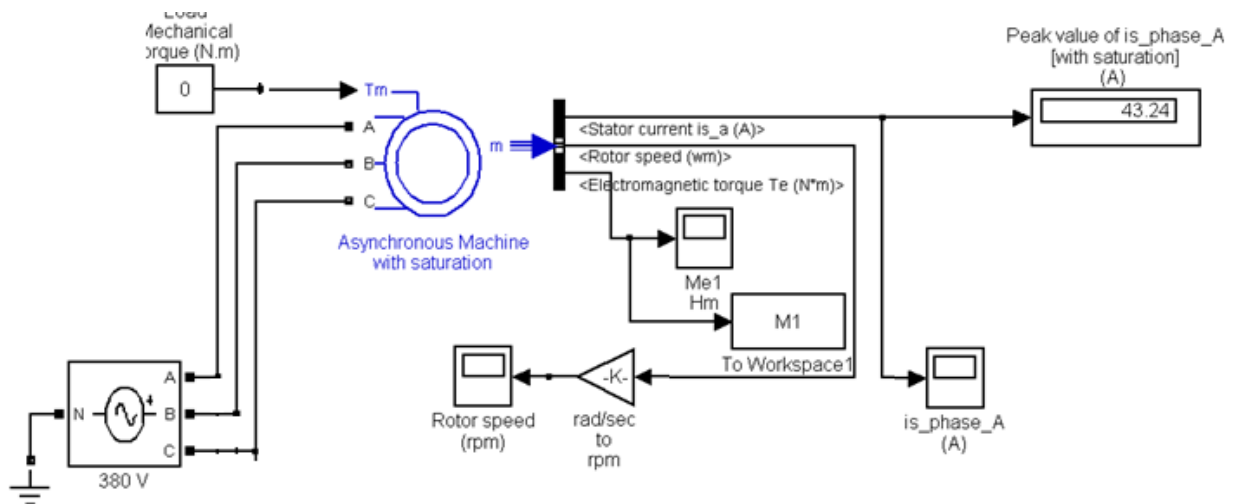


Рисунок 2 – Схема структурна математичної моделі електродвигуна головного приводу верстата

Для визначення характеру проходження перехідних процесів системи в перехідних режимах необхідно визначити коефіцієнти характеристичного рівняння системи в операторній формі:

$$T_M T_E \cdot p^2 + T_M \cdot p + 1 = 0, \quad (2.13)$$

де T_M – механічна постійна часу системи, T_E – електромагнітна постійна часу.

Визначимо постійні часу можна за допомогою таких висловів:

Механічна постійна часу електродвигуна

$$T_M = J \frac{\omega_0}{M_{\max}} = 1,57 \frac{262}{1674} = 0,25 \text{ с.} \quad (2.14)$$

Електрична постійна часу електродвигуна

$$T_E = \frac{1}{S_K \cdot \Omega} = \frac{1}{0,474 \cdot 314} = 0,007 \text{ с}, \quad (2.15)$$

де $\Omega = 2\pi \cdot f = 314, \text{ с}^{-1}$.

Визначимо тип перехідної характеристики т.я.,

$$4T_E = 4 \cdot 0,007 = 0,028 \text{ с}, \quad T_M \geq 4T_E, \quad (2.16)$$

то перехідні процеси в системі повинні мати аперіодичний характер 2 типу. Промодельюємо пуск електродвигуна без навантаження при трьох різних частотах напруги живлення $f_1=50 \text{ Гц}$, $f_2=37,5 \text{ Гц}$, $f_3=25 \text{ Гц}$, використовуючи закон частотного регулювання $\frac{U}{f} = const$.

Результати математичного моделювання механічних та перехідних характеристик при різних частотах наведено на рисунку 3 та 4.

В результаті проведеного розрахунку та математичного моделювання обраного електродвигуна, розраховані і побудовані статична і динамічна навантажувальна діаграма приводу. Частотний спосіб регулювання частоти обертання валу електродвигунів дозволить підвищити діапазон і плавність регулювання швидкості.

Проведемо моделювання при частоті мережі живлення $f=50 \text{ Гц}$ і лінійній напрузі $U_n=380 \text{ В}$.

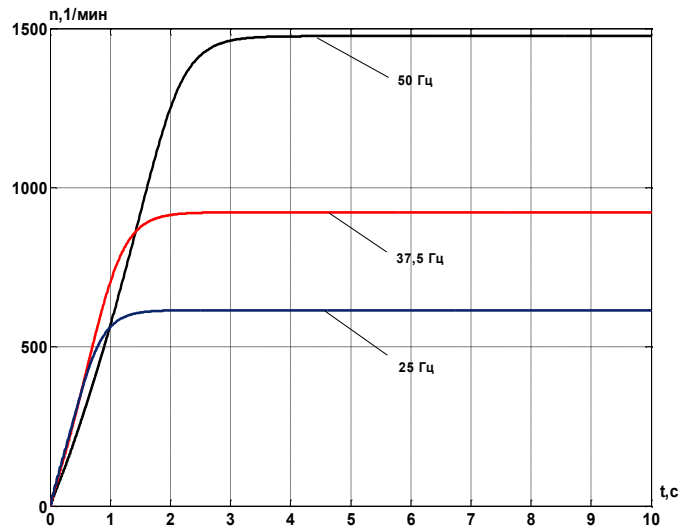


Рисунок 3 – Графіки перехідних процесів $\omega=f(t)$ при частотах $f_1=50 \text{ Гц}$, $f_2=37,5 \text{ Гц}$, $f_3=25 \text{ Гц}$

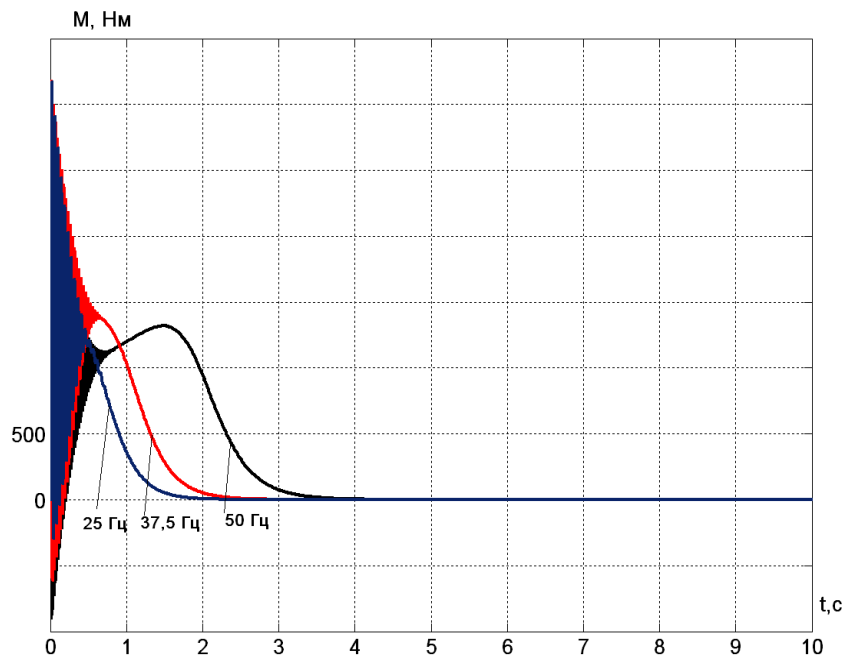


Рисунок 4 – Графіки перехідних процесів $M_s=f(t)$ при частотах $f_1=50$ Гц, $f_2=37,5$ Гц, $f_3=25$ Гц

Змоделюємо перехід системи з одного сталого стану ($M_e = M_H = 148 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $\omega = \omega_H = 157 \text{ с}^{-1}$, $I_2 = I_{2H} = 35,8 \text{ А}$) в друге після накинута навантаження на вал двигуна ($M_{c.доп.} = 0,3M_H = 8,1 \text{ Н}\cdot\text{м}$). Результати математичного моделювання наведені на рисунку 5.

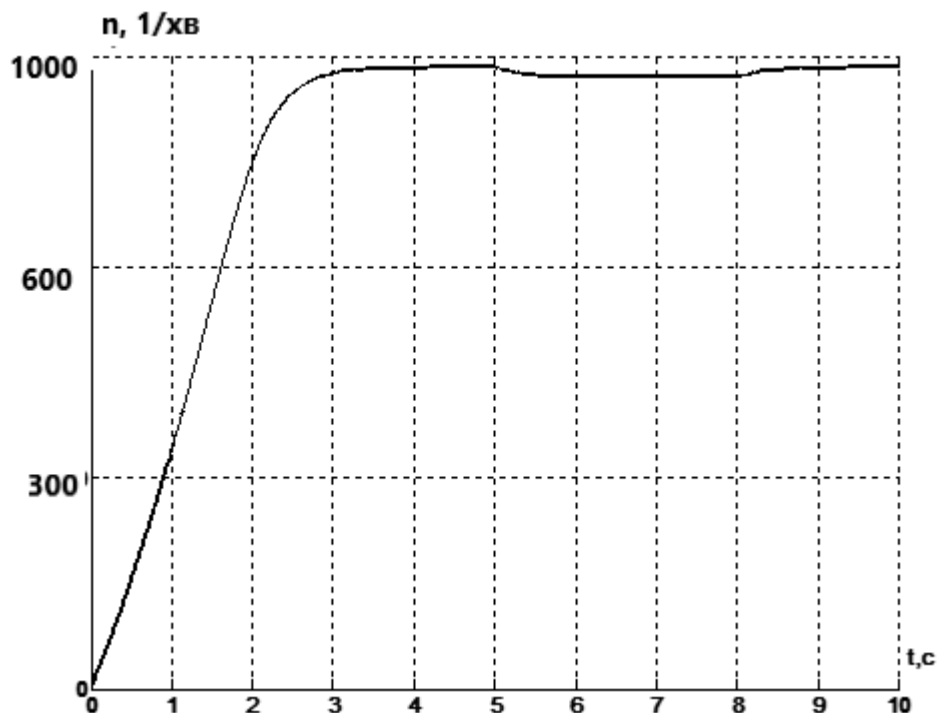


Рисунок 5 – Графік перехідних процесів при накиді навантаження $M_{c.доп.} = 0,3M_H$

2.5 Синтез регуляторів частотного електропривода

З систем керування електроприводами в промисловості набули найбільшого поширення скалярні системи управління, в яких регулюється напруга і струм обмотки статора по модулю. Скалярні системи управління частотними електроприводами реалізують два закони управління: управління по закону $\frac{U_1}{f_1} = const$ і управління по закону $\psi_1 = const$.

Схема частотного перетворювача виконана за принципом широтно-імпульсної модуляції автономного інвертора напруги (АІН) з рекуперацією електроенергії в мережу для двозонного регулювання швидкості. З метою можливості стабілізації перевантажувальної здатності частотного електроприводу і зменшення статичної помилки регулювання швидкості найбільш доцільно застосувати регулювання згідно із законом $\psi_1 = const$.

Принцип регулювання швидкості вала асинхронного електродвигуна заснований на залежності частоти від напруги мережі живлення:

$$\frac{E_1}{f_1} = \frac{(U_1 - I_1 r_1)}{f_1} = const, \quad (2.17)$$

де E_1 – ЕРС статора; U_1 – напруга на статорі; $I_1 r_1$ – падіння напруги на активному опорі статора.

ЕРС статора по модулю E_1 пропорційна потокозчепленню статора ψ_1 :

$$E_1 = \omega_1 \psi_1, \quad (2.18)$$

де $\omega_1 = 2\pi f_1$ – синхронна частота поля статора.

Тому виконання закону (2.18) фактично означає стабілізацію потокозчеплення по модулю $\psi_1 = const$.

Система управління розглянутого ТПЧ побудована по двоконтурному принципу. Перший контур являє собою контур регулювання ЕРС і є підлеглим зовнішньому контуру регулювання швидкості. Для адаптації регулятора частоти до зміни швидкості регулювання електродвигуна при коливаннях навантаження використовується негативний зворотний зв'язок по швидкості обертання вала двигуна.

Інтенсивність розгону приводних електродвигунів регулюється задатчиком інтенсивності $3I$ за експоненціальним законом. Зупинка електроприводу здійснюється зняттям сигналу завдання швидкості на виході задатчика швидкості $3C$. При цьому частота напруги на виході АІН плавно знижується, а асинхронний електродвигун переходить в режим рекуперативного гальмування.

Структурна схема скалярною системи управління частотним електроприводом по закону $\psi_1 = const$, представлена на рисунку 6.

Визначимо передаточні функції скалярною системи управління частотним електроприводом.

Передаточна функція ПІ-регулятора ЕРС:

$$W_{pc}(s) = \frac{K_{pc}(T_{33}s + 1)}{T_1s}. \quad (2.19)$$

Передаточна функція П-регулятора частоти:

$$W_{pc}(s) = K_{pc} = 1. \quad (2.20)$$

Передаточна функція датчика швидкості:

$$W_{\omega}(s) = K_{\omega}, \quad (2.21)$$

де K_{ω} – статичний коефіцієнт датчика швидкості.

$$K_{\omega} = \frac{U_{\omega}}{I_{1ном}}, \quad (2.22)$$

де U_{ω} – номінальне значення сигналу на виході датчика швидкості;
 $I_{1ном}$ – номінальний струм статора, обумовлений значенням моменту.

$$I_{1ном} = \sqrt{\frac{\pi f_1 S_H M_H}{r_2}}, \quad (2.23)$$

де r_2 – активний опір статора; $M_{ном}$ – номінальний момент на валу електродвигуна.

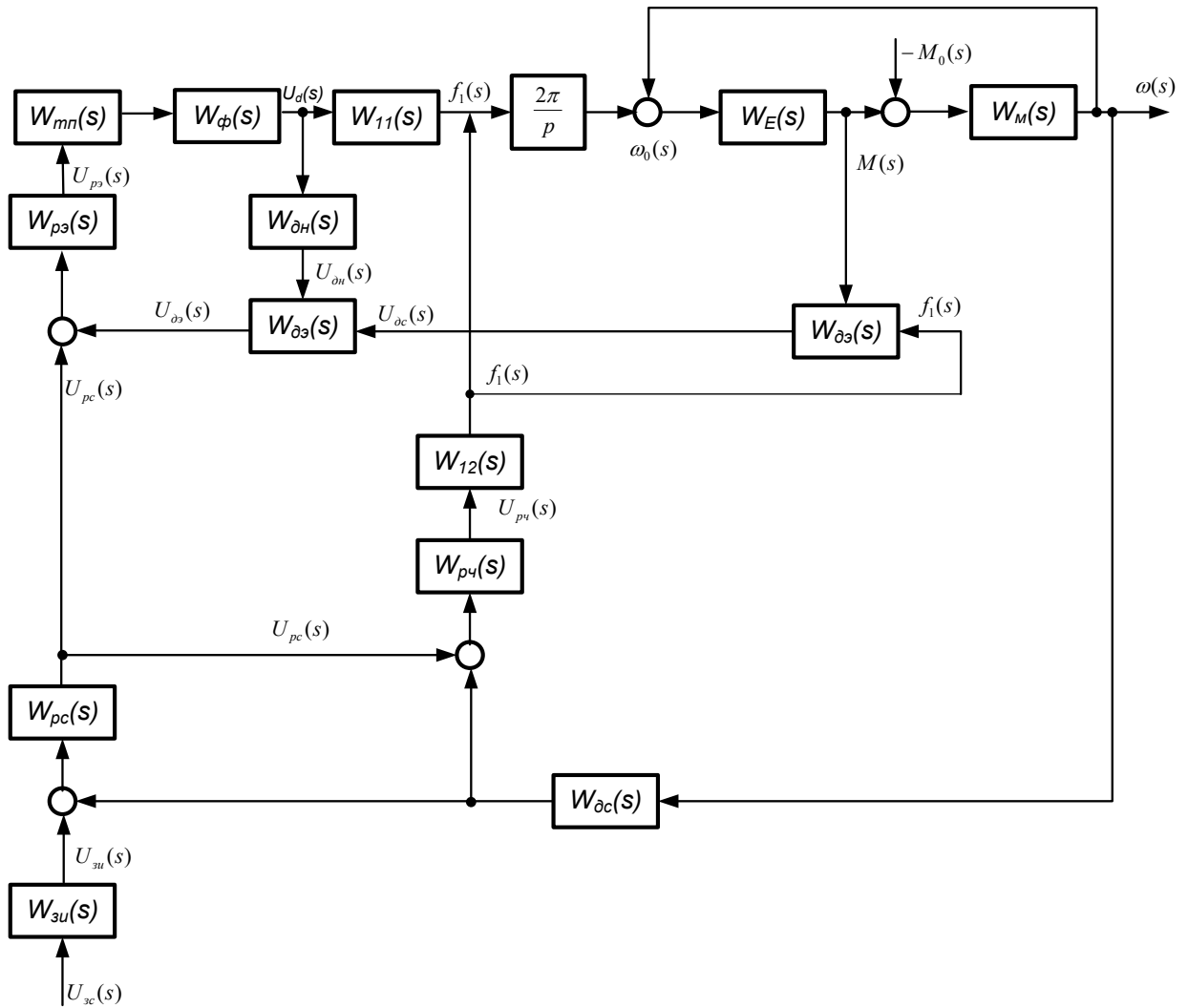


Рисунок 6 – Структурна схема скалярною системи управління частотною електроприводом по закону $\psi_1 = const$

Передаточна функція датчика ЕРС:

$$W_{\partial\partial}(s) = K_{\partial\partial} = \frac{u_{3c.ном} \delta_{\omega}}{100(u_{\partial c.ном} - r_1 u_{\partial m.ном})}, \quad (2.24)$$

Номінальна напруга АД при з'єднанні обмоток статора трикутником:

$$U_{1\phi} = U_{ном} = 380 \text{ В}. \quad (2.25)$$

Максимальна швидкість електроприводу

$$\omega_{max} = \frac{2\pi f_{1max}}{p} (1 - S_H), \quad (2.26)$$

$$\omega_{max} = \frac{2\pi \cdot 100}{3} (1 - 0.033) = 250, \text{ c}^{-1}$$

Діапазон регулювання швидкості в другій зоні:

$$D_2 = \frac{\omega_{max}}{\omega_{ном}}, \quad (2.27)$$

$$D_2 = \frac{250}{230} = 1,1$$

Максимальна напруга ТПЧ в другій зоні

$$U_{d \max} = K_{cx} U_{1\phi} D_2, \quad (2.28)$$

$$U_{d \max} = K_{cx} U_{1\phi} D_2.$$

де $K_{cx} = 1.35$ - коефіцієнт схеми АІН.

Статичний коефіцієнт передачі електричної частини асинхронного електродвигуна

$$K_{d1} = \frac{M_{ном}}{\omega_0 - \omega_{ном}}, \quad (2.29)$$

$$K_{d1} = \frac{478}{250 - 230} = 23,9$$

Електромагнітна постійна часу електричної частини асинхронного електродвигуна

$$T_e = \frac{1}{2\pi f_1 s_K}, \quad (2.30)$$

$$T_e = \frac{1}{2\pi \cdot 100 \cdot 0,474} = 0,033 \text{ c.}$$

Передаточна функція електричної частини асинхронного електродвигуна:

$$W_{pc}(s) = \frac{K_{d1}}{T_e s + 1}. \quad (2.31)$$

$$W_{pc}(s) = \frac{23,9}{0.033s + 1}$$

Статичний коефіцієнт передачі АІН по каналу управління частотою

$$K_{12} = \frac{f_{ном}}{u_{рч.ном}}. \quad (2.32)$$

$$K_{12} = \frac{50}{380} = 0.13$$

Електромагнітна постійна часу АІН по каналу управління частоти:

$$T_{12} = T_e = 0.033 \text{ с}. \quad (2.33)$$

Передаточна функція АІН по каналу управління частоти:

$$W_{pc}(s) = \frac{K_{12}}{T_{12}s + 1}. \quad (2.34)$$

$$W_{pc}(s) = \frac{0,13}{0,033s + 1}$$

Постійна часу фільтра, що згладжує:

$$T_\phi = \frac{1}{f_{ном}}, \quad (2.35)$$

$$T_\phi = \frac{1}{50} = 0.02$$

Передаточна функція фільтра, що згладжує:

$$W_{pc}(s) = \frac{1}{T_\phi s + 1}. \quad (2.36)$$

$$W_{pc}(s) = \frac{1}{0.02s + 1}$$

У відповідності до системи рівняння і результатами розрахунку коефіцієнтів і постійних часу передавальних функцій використовуючи пакет MatLAB розроблена математична модель частотного електроприводу з асинхронним електродвигуном на рисунку 7.

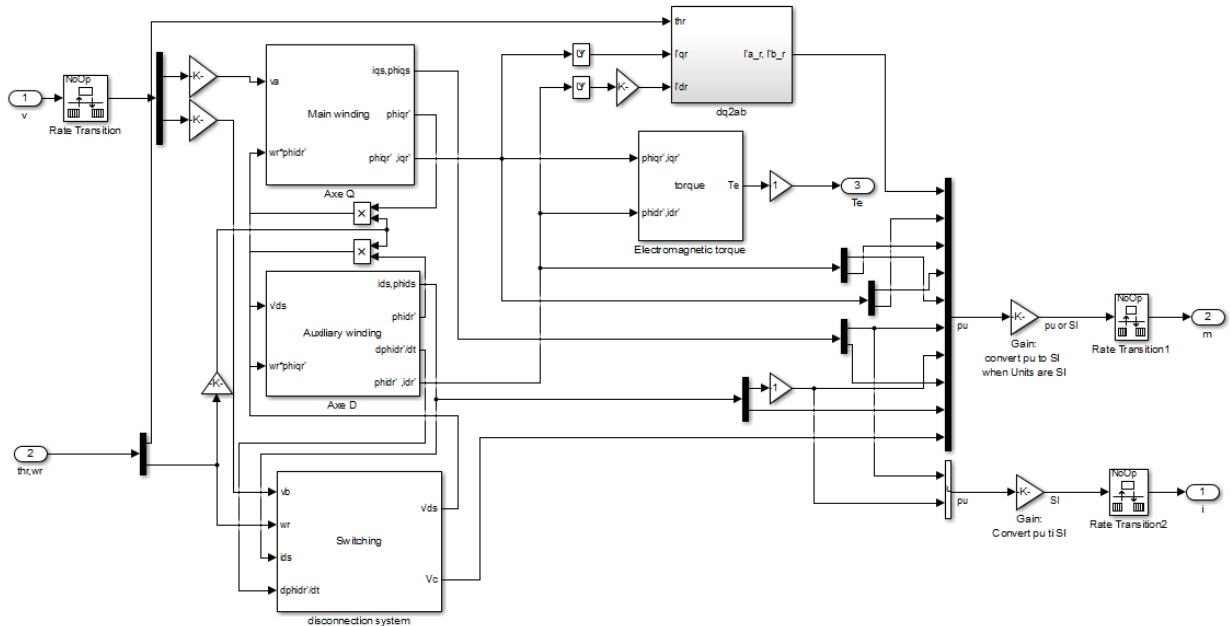


Рисунок 7 – Структурна схема математичної моделі АД в МПП Matlab

При синтезі параметричного регулятора необхідно бажану дискретну частотну характеристику (ДЧХ) розділити на ДЧХ незмінної частини без урахування запізнень.

Тоді ДЧХ параметричного регулятора визначається співвідношенням:

$$W_p(\lambda) = \frac{W_{\omega c}(j\lambda)}{W_H(j\lambda)} = \frac{K_1(1 + \tau_2 j\lambda)j\lambda(1 + T_r j\lambda)}{K_H j\lambda(1 + \tau_2 j\lambda)}. \quad (2.37)$$

В результаті скорочення $j\lambda$ і заміни $K_p = \frac{K}{K_H}$ ДЧХ регулятора приймає наступний вигляд:

$$W_p(\lambda) = \frac{W_{\omega c}(j\lambda)}{W_H(j\lambda)} = \frac{748,2(1 + 0,098j\lambda)j\lambda(1 + 0,0265j\lambda)}{1,1j\lambda(1 + 0,098j\lambda)}. \quad (2.38)$$

Для отвору від ДЧХ до ДПФ зробимо підстановку:

$$j\lambda = \frac{2}{T_0} \frac{z-1}{z+1} = \frac{2}{0.009} \cdot \frac{z-1}{z+1}.$$

Після цього дискретна передавальна функція (ДПФ) регулятора приймає наступний вигляд:

$$W_p(\lambda) = K_p \left[\frac{(\tau_2 + T_s)}{\tau_1} + \frac{T_0}{\tau_1} \cdot \frac{z+1}{z-1} + \frac{2\tau_2 T_s}{\tau_1 T_0} \cdot \frac{z-1}{z+1} \right]. \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} W_p(\lambda) &= 989 \left[\frac{(0,098 + 0,0265)}{0,302} + \frac{0,033}{0,302} \cdot \frac{z+1}{z-1} + \frac{2 \cdot 0,098 \cdot 0,0265}{0,302 \cdot 0,033} \cdot \frac{z-1}{z+1} \right] = \\ &= 989 \left[0,412 + 0,109 \frac{z+1}{z-1} + 0,0521 \frac{z-1}{z+1} \right] \end{aligned}$$

Математична модель ПІД-регулятора і електроприводу показана на рисунку 8.

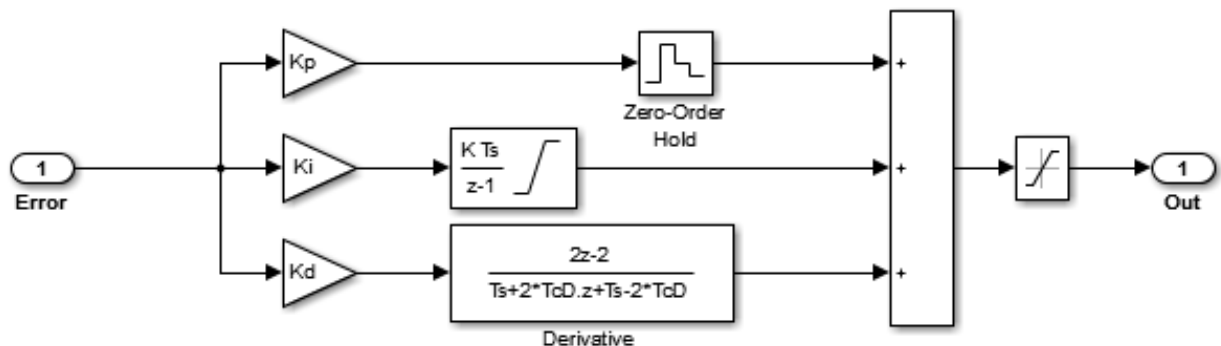


Рисунок 8 – Математична модель ПІД-регулятора швидкості

Синтезована ДПФ є сумою передавальних функцій пропорційного, інтегруючого і диференціальної ланок.

Загальний вигляд блок- схеми математичної моделі частотно регульованого електроприводу в MatLab наведено на рисунку 9.

На рисунку 10 наведені результати математичного моделювання.

Розроблена система задовольняє вимогам по швидкодії і точності.

Час перехідного процесу складає: $t_{nn} = 1,7\text{с}$. Результати математичного моделювання показали, що АСУ електроприводом має швидкісну помилку, яка становить $0,035 \text{ м/с} < 0,05 \text{ м/с}$. Час перехідного

процесу становить не менше 1,7с, що забезпечує максимальну швидкість при допустимому прискоренні.

Розроблена математична модель, адекватно відображає основні особливості пускових режимів реальної системи. Розроблену математичну модель доцільно використовувати для адаптації алгоритму запуску і зупинки електроприводу до заданих умов експлуатації.

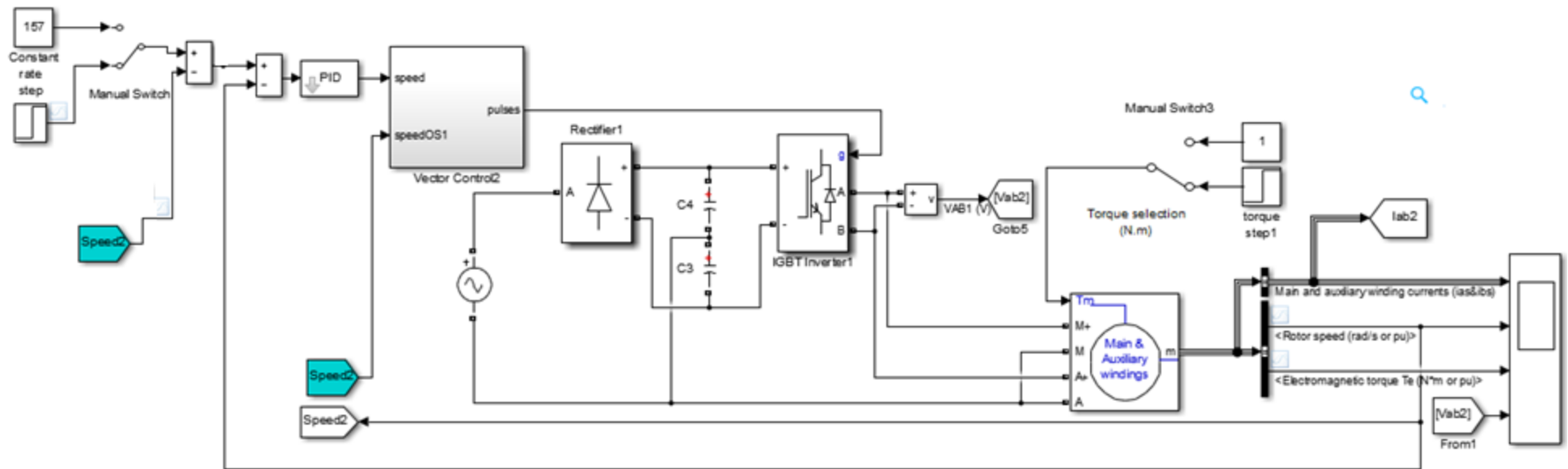


Рисунок 9 – Математична модель системи управління електроприводом супорту верстата

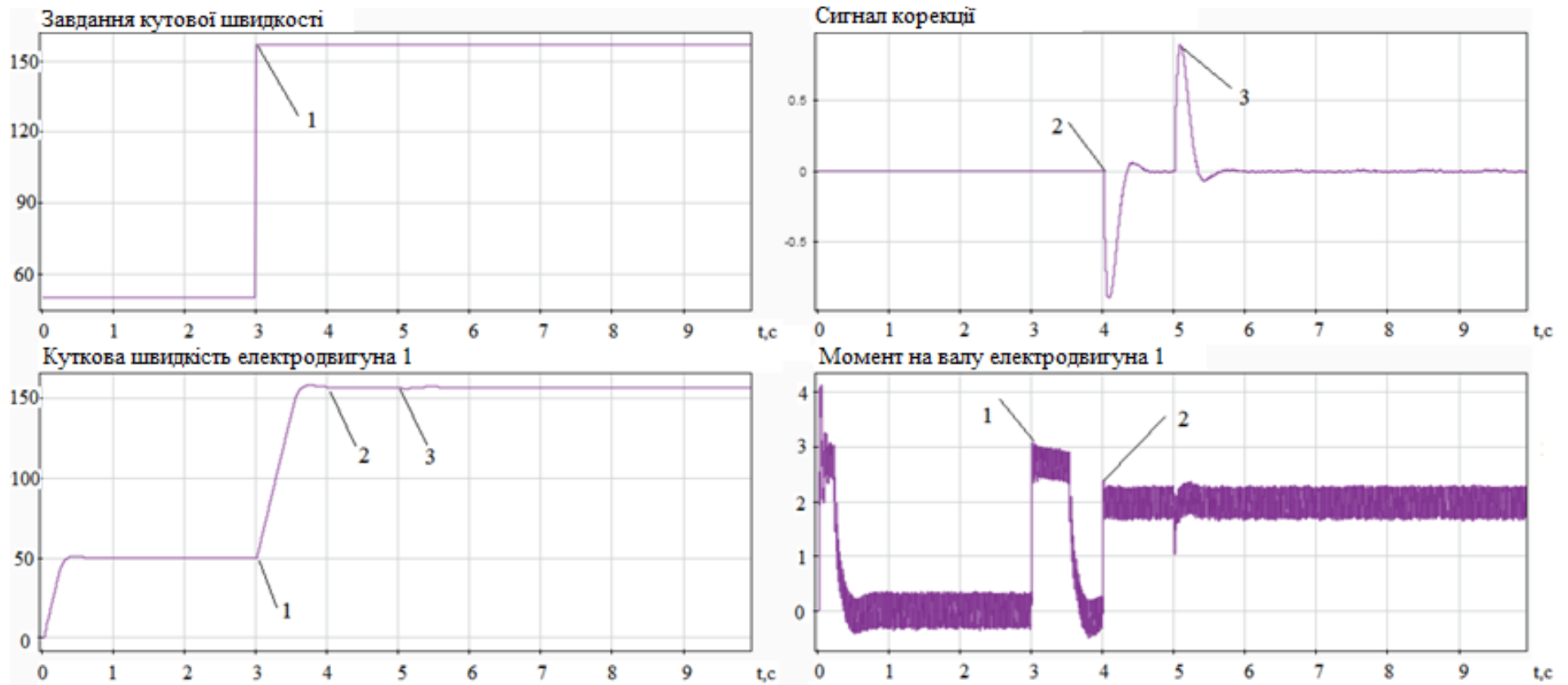


Рисунок 10 – Графіки перехідних процесів: 1 - вихід на номінальну кутову швидкість; 2 - підведення навантаження

3 ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

3.1 Розробка компонування приводної системи верстата

Визначені наступні характеристики приводної системи верстата:

1. Привод головного руху – потужність 63 кВт, номінальна частота обертання 1000 об/хв.
2. Приводи супортів – 2 осі (X і Z), номінальна потужність 21 кВт, частота обертання 1000 об/хв (по кожному приводу).
3. Пристрій керування – система ЧПУ Sinumerik 840Dsl із процесором NCU 710-2.
4. Панель оператора – OP 012 з PCU50.3.
5. Клавіатура PC – KB 310C.
6. Верстатний пульт – MCP 310C.
7. Блок живлення SITOP (24 В).

У відповідності з поставленими завданнями модернізацію електроприводів верстатом та на розробку СЧПУ електроприводом необхідно забезпечити:

- замінити приводний електродвигун постійного струму з двигуни змінного струму;
- синхронізовану роботу приводних двигунів головного руху та приводів супортів;
- точності обробки деталей згідно технологічних карт та паспортних даних верстата.

Заміна старих і громіздких систем пуску двигуна постійного струму головного приводу на двигуни змінного струму здійснимо з застосуванням перетворювачів Sinamics S120. Таке рішення дозволить зменшити габарити електричної частини приводу і більш раціонально управляти ними. Крім того, можна буде додатково використовувати простір, що звільнився, за рахунок виключення: електричних контакторів, автоматів перевантаження, потужних клемників, громіздких панелей управління оператора [5].

При застосуванні приводів Sinamics з СЧПУ верхнього рівня дозволить управління приводами таким чином, що виникає бажаний узгоджений рух. Для цього потрібен циклічний обмін даними між системою управління і всіма приводами. До сих пір цей обмін повинен був здійснюватися по польовій шині з відповідними витратами на монтаж і проектування.

У SINAMICS S120 застосовано нове рішення: центральний блок регулювання виконує всі функції регулювання для всіх підключених осей і додатково реалізує технологічні зв'язки між приводами і між

осями. Так як всі необхідні дані вже існують в центральному блоці регулювання, вони не повинні додатково переноситися між приводами. Зв'язки між двоохруховими електроприводом подач можна реалізувати в межах блоку управління.

Перетворювач частоти повинен містити наступні модулі: модуль управління, модуль живлення (ALM), модуль двигуна (MM), модуль датчиків, модуль гальмування.

Для даного типу перетворювачів випускаються два типи модулів управління: Control Unit CU320 (для невеликої кількості приводів) і розширені модулі управління SIMOTION D, що дозволяють управляти 64 приводами. Для реалізації системи управління електроприводами верстата досить модуля управління NCU. В модулі управління NCU зосереджені функції комунікації, управління та регулювання для двох модулів двигунів і активного модуля живлення.

Компонування приводної системи верстата здійснимо у програмі Sizer of Siemens Drive.

Вибираємо багатоосевий перетворювач (Multi-axis converter). Далі переходимо до вибору модуля живлення. У якості модулів живлення перетворювача можуть використовуватися три модулі: Basic Line Module (без регулювання напруги проміжного контуру й без можливості рекуперації), Smart Line Module (без регулювання напруги проміжного контуру, але з можливістю рекуперації) і Active Line Module (з регулюванням напруги проміжного контуру й з можливістю рекуперації).

Враховуючи високі вимоги до динаміки приводів верстата, вибираємо активний модуль живлення. При виборі модуля приймаємо external cooling зовнішнє охолодження так як встановлена потужність приводів буде порівняно великою (близько 63 кВт – головного приводу, та по 21 кВт – приводів супортів).

Позначаємо назву першої осі – «Головний рух» і вибираємо для цієї осі асинхронний двигун 1LE. Застосовуємо варіант режиму керування двигуном: Servo, Servo і погоджуємося з тим, що інтегрованої функціональності привод не має (No drive-based integrated functionality). Після цих налаштувань вікно Add drive system здобуває вид, показаний на рисунку 11.

Продовжуємо компонувати приводну систему, додаючи в дерево проекту приводи за вісями X, Y і Z та B, W і V. Процедура для наступних приводів залишається тією ж, за винятком:

1. Перетворювач і модуль живлення не торкаємо, тому що вони загальні для всіх приводів.

2. У якості двигуна для приводів подачі використовуємо синхронні двигуни 1FT/1FK використовуючи паспортні дані приводів верстату.

По завданню New axis, знову відкривається вікно Add drive system, у якому записуємо найменування осі у полі Designation і робимо вибір типу двигуна. Закінчивши налаштування для осей, закриваємо вікно Add drive system кнопкою OK Z.

12. У результаті дерево проекту здобуває вид, показаний на рисунку

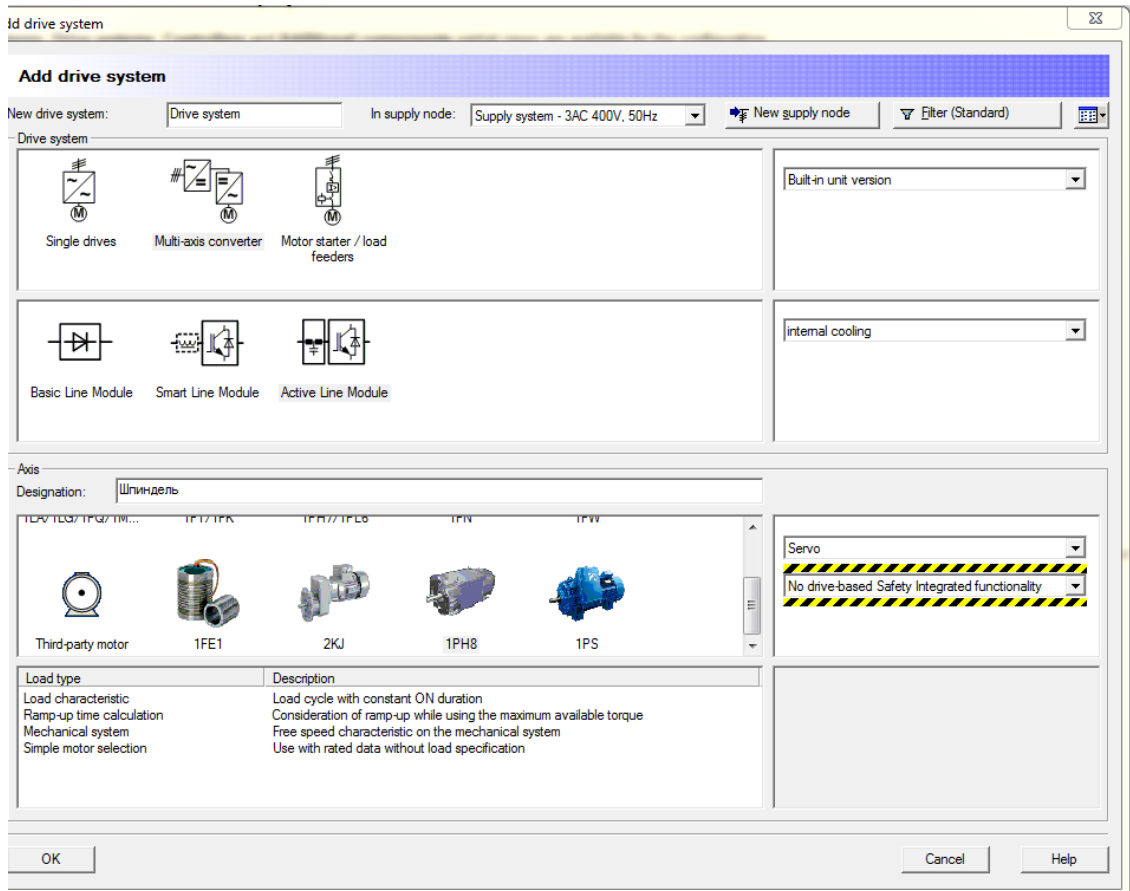


Рисунок 11 – Результати налаштування Add drive system

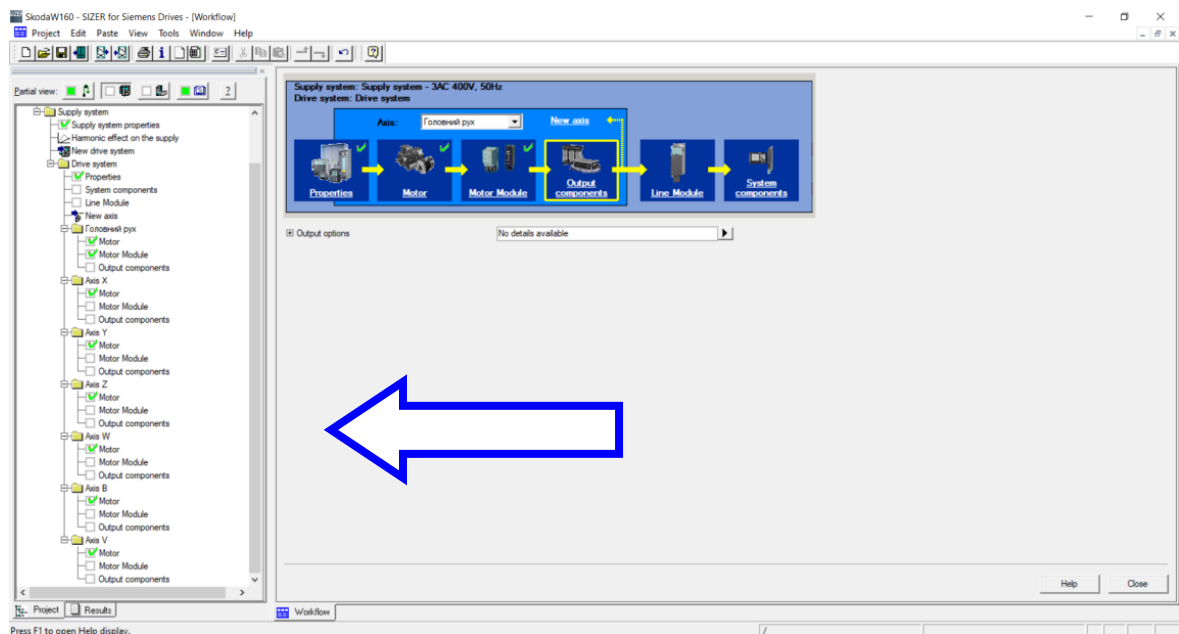


Рисунок 12 - Дерево проекту

Переходимо до конфігурування кожного привода. Призначення параметрів по кожному з приводів проводиться в строгій послідовності.

3.2 Конфігурування привода головного руху

Здійснюємо вибір приводного двигуна приводу головного руху/

У рядку Motor додержуємося вказівки Click here to dimension the motor. При цьому відкривається вікно Motor wizard 1LE Step 1, яке показано на рисунку 13, у якому потрібно пройти чотири кроки настроювань. На першому кроці Basic data 1 введемо дані результатів розрахунку потужності та швидкості електродвигуна головного руху, які визначені в таблиці 1.

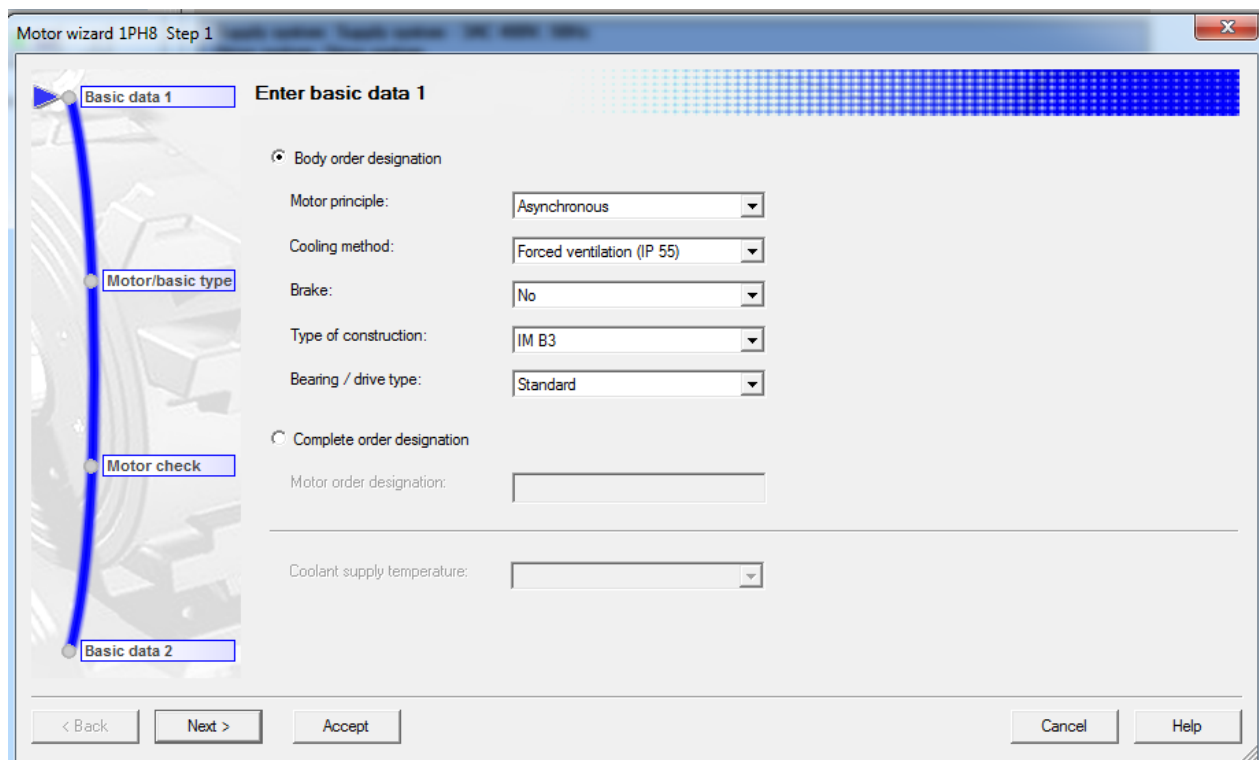


Рисунок 13 - Вікно Motorwizard Step 1

Застосовуємо варіант послідовного вибору Body or der designation. Далі послідовно (зверху вниз) вибираємо: асинхронний двигун, охолодження примусовою вентиляцією (виконання IP55), без застосування гальма (Brake – No), застосовуємо конструкцію типу IM B3 (горизонтальна вісь обертання), застосовуємо підшипники (Bearing) стандартного типу.

Після цього натискаємо кнопку Next і переходимо до наступного кроку – вибору конкретного типу двигуна. З списку електродвигунів вибираємо асинхронний електродвигун 1LE1503-2CB63-4CF4 (див. розділ 2) для приводу головного руху верстата з вбудованим датчиком швидкості потужністю 63 кВт і номінальною швидкістю обертання 2200 об/хв. Механічні характеристики електродвигуна 1LE1503-2CB63-4CF4 наведені на рисунку 14.

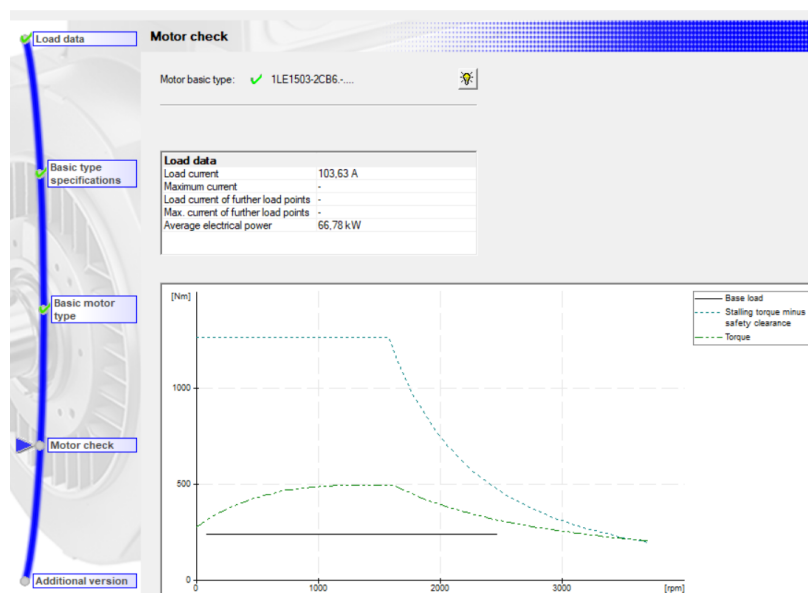


Рисунок 14 - Механічні характеристики електродвигуна 1LE1503-2CB63-4CF4

3.3 Вибір вимірювальних перетворювачів швидкості

В результаті тривалої експлуатації верстата, датчики, використовувані на приводі головного руху, морально і фізично застаріли і не відповідають сучасним вимогам точності. Тому необхідна зробити заміну застарілих датчиків на більш сучасні датчики.

Розрізняють інкрементальний і абсолютний метод вимірювання. У інкрементальних датчиків після кожного відключення живлення необхідно реферування верстата, так як положення часто не зберігається в СЧПУ і рух верстата при відключенні живлення не реєструються.

Абсолютні датчики, навпаки, реєструють рухи при відключенні живлення і видають фактичну позицію при відновленні живлення, не вимагають реферування.

У двигунах головного руху застосовуються різні типи датчиків

1. Інкрементальний кругові датчики. До цього типу належать:

- Датчики положення і швидкості шпинделя з імпульсними сигналами TTL і HTL (HighVoltage).
- Датчики кута повороту з аналоговими сигналами \sin / \cos рівня напруги 1 Vpp (Voltpeaktopeak: напруга від піку до піку).
- Вимірювальна інкрементальна система датчика типу SIMAG H для реєстрації кута повороту порожнистих шпинделів (двигуни 1PH2, 1FE1), що складається з шестерні і голівки, що зчитує (замінює колишню версію SIZAG 2).

2. Датчики абсолютного значення (кодові датчики положення).

До цього типу належать:

- Датчики з синхронним послідовним інтерфейсом (SSI).
- Датчики з екодером за даними (інтерфейс EnDat).
- Датчики з інтерфейсом PROFIBUS-DP.

Інкрементальні і кодові датчики є енодерами в тому сенсі, що вони створюють імпульси, що характеризують рух.

При цьому в інкрементальних датчиках, що містять синусний (A) і косинусний (B) канали, а також канал R для референтної мітки початку обороту, порядок чергування імпульсів дозволяє визначити напрямок обертання, підрахунок імпульсів в лічильниках - відстань, а визначення числа імпульсів за одиницю часу - швидкість. Діаграми сигналів TTL і аналогових сигналів \sin / \cos рівня напруги $1 V_{pp}$ показані на рисунках 15 і 16, відповідно.

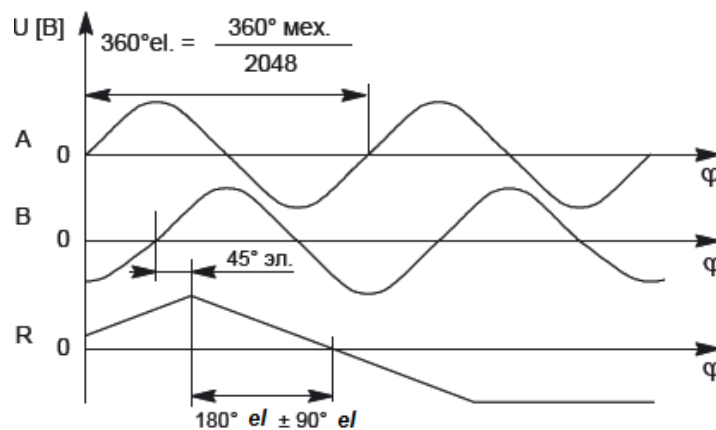


Рисунок 15 – Діаграми сигналів TTL інкрементального датчика

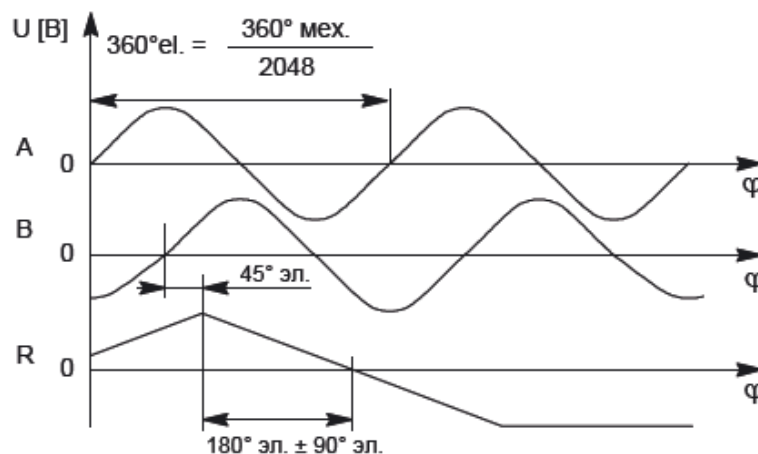


Рисунок 16 – Діаграми сигналів \sin / \cos рівня напруги $1 V_{pp}$ інкрементального датчика

На рисунку 17 показаний варіант управління приводом головного руху з застосуванням інкрементального датчика.

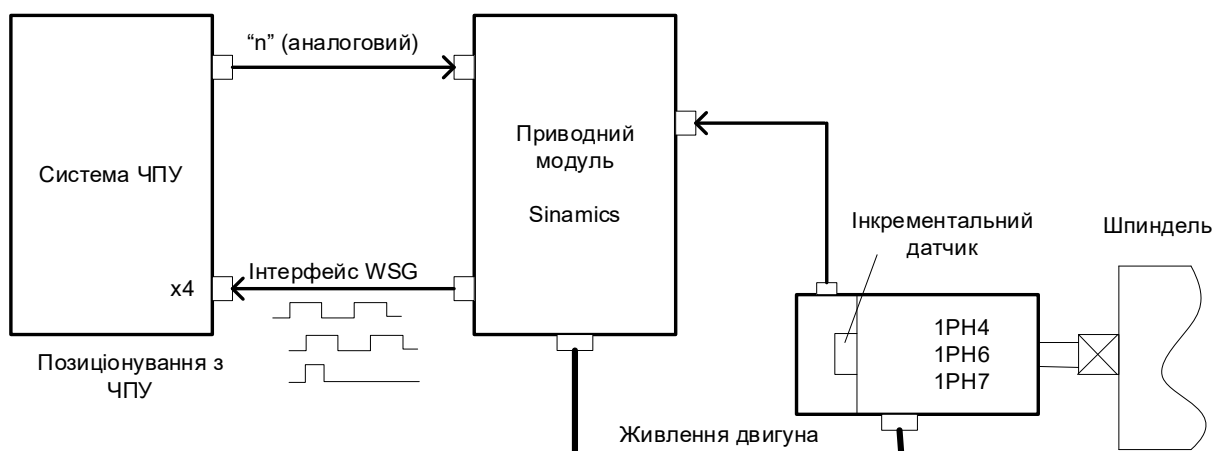


Рисунок 17 – Управління приводом головного руху з інтерфейсом WSG імітації інкрементального датчика

Так як точність такого датчика досягає $\pm 0,006$ град, то число імпульсів (кроків) на оборот валу може бути значно більше. Розрахунок максимального числа кроків виконується за формулою:

$$M = 4k \times Z, \quad (3.1)$$

де k – встановлюваний в приводі коефіцієнт множення (0,5, 1, 2, 4),
 Z – число штрихів на диску датчика.

Так, для $Z = 2048$ штрихів на один оборот отримаємо:

$$M = 4 \times 4 \times 2048 = 32768 \text{ штрихів/об.}$$

Розділивши 360° на отримане число кроків, отримаємо ціну одного кроку, тобто похибка вимірювання кута повороту:

$$G_{розр} = \frac{360}{32768} = 0,011 \text{ град.}$$

Отримане значення яке не суперечить нормі вимог до вибору вимірювальних пристроїв, відповідно до якої похибка вимірювального пристрою (в даному випадку 0,006 град) повинна бути, принаймні, в 2 рази менше необхідної похибки вимірювання, яка дорівнює кроку вимірювальної системи (0,011 град).

У кодових датчиках інформація про становище створюється за допомогою N доріжок, кожна з яких відображає 1 біт інформації на рисунку 18..

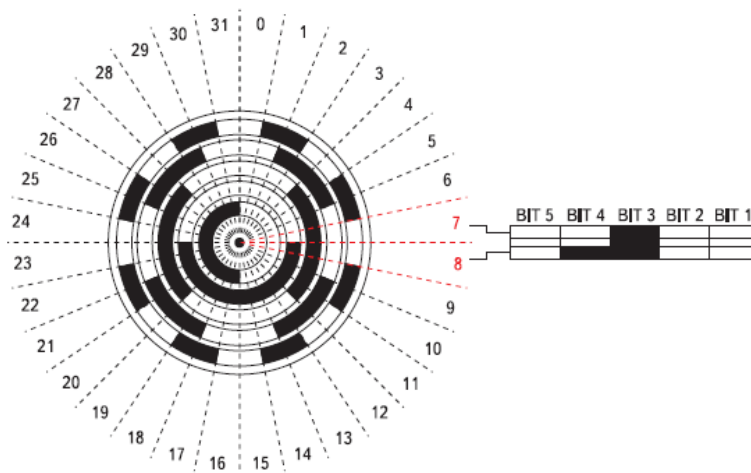


Рисунок 18 – Принцип створення коду положення в абсолютному датчику

Дозвіл N залежить від конструкції датчика. Однооборотні датчики послідовного інтерфейсу SSI мають дозвіл 12 біт (4096 дискрет на оборот), а багатооборотні - 24 біта (4096 дискрет× 4096 оборотів). Такий же дозвіл мають датчики з інтерфейсом PROFIBUS-DP. У датчиків з кодером інтерфейсу за даними (EnDat) дозвіл на 1 оборот в 2 рази більше - 8192 дискрет, кількість обертів - 4096.

Непряма реєстрація положення і швидкості переміщення робочого органу при цифровому управлінні приводами головних рухів здійснюється принципово однаково. Базове виконання системи управління показано на рисунку 19.

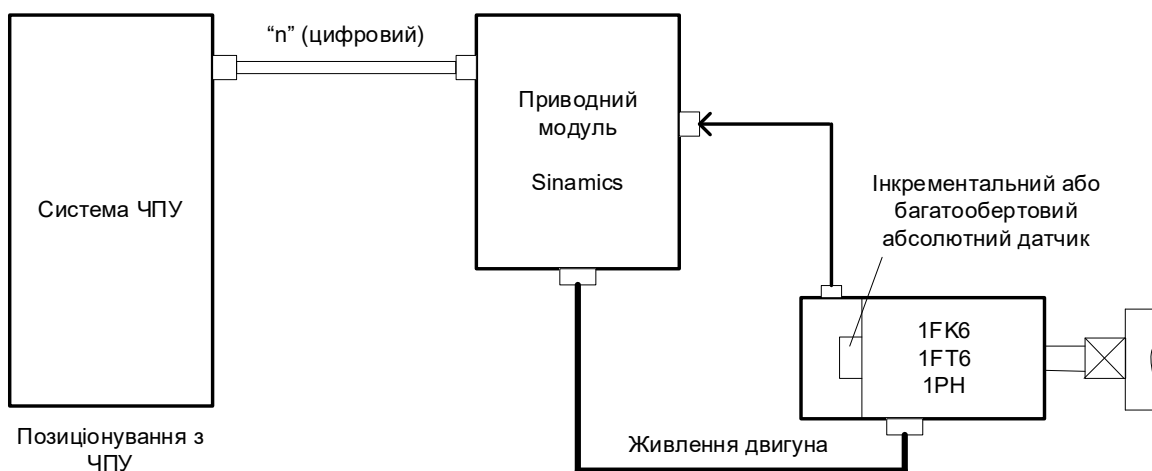


Рисунок 19 – Непряма реєстрація положення і швидкості з цифровим інтерфейсом

Датчик визначає швидкість двигуна, яка задається перетворювачем частоти. Час комутації складає 3,3 мс. Для стійкості системи регулювання швидкості період дискретності повинен бути $T_0=4$ мс.

Визначимо діапазон регулювання швидкості:

$$D_C = \frac{\omega_{\text{дв}} \cdot T_0}{d} = \frac{151 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{0,001} = 604, \quad (3.2)$$

де d – ціна дискрети, $d=0,001$; ω – номінальна кутова швидкість електродвигуна двигуна.

Максимальна роздільна здатність датчика:

$$N_D \geq \frac{2\pi \cdot D_C}{T_0 \cdot \omega_{\text{дв}}} = \frac{2\pi \cdot 604}{4 \cdot 10^{-3} \cdot 151} \approx 6300 \frac{\text{дискрет}}{\text{об}}, \quad (3.3)$$

Слід врахувати, що інкрементальні і кодові датчики є оптикоелектричними приладами і живляться напругою постійного струму. Для контролю кута повороту ротора (див. рис 20),

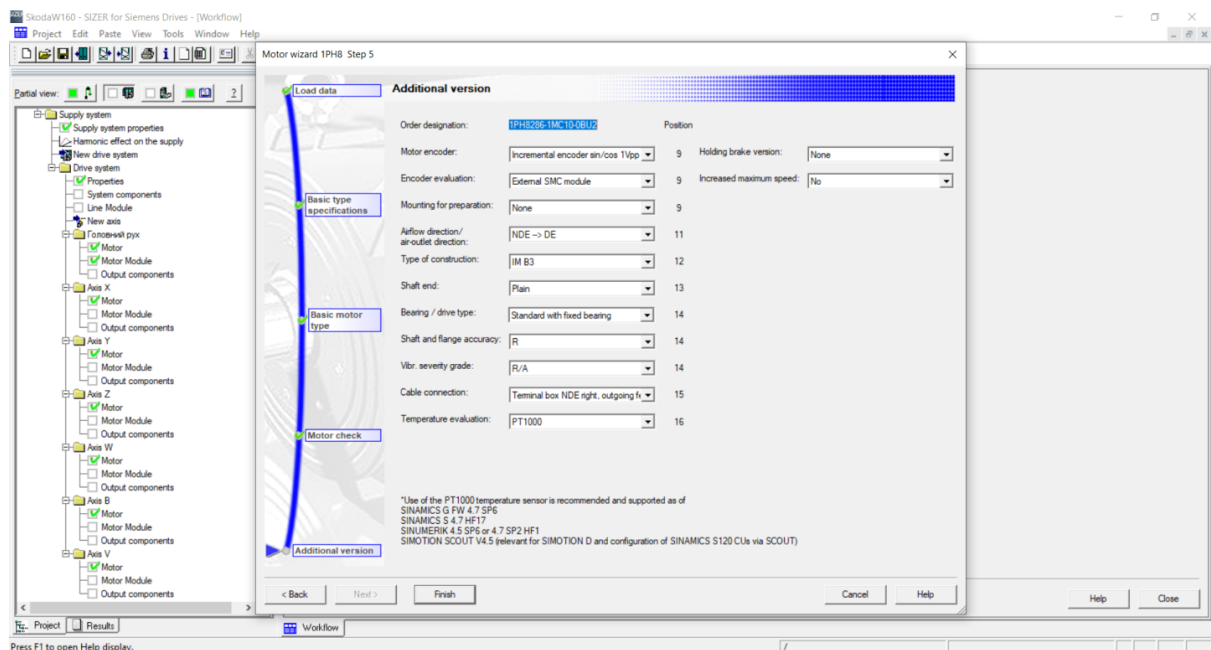


Рисунок 20 – Вибір датчика контролю кута повороту ротора

Застосовано інкрементальний датчик з додатковими C і D доріжками «Incrementalencodersin/cos 1 Vpp 2048 S/R with C, D track».

Налаштовуємо – Encoderevaluation (Обробка сигналів датчика) – установити зовнішній SMC модуль датчика для переходу від сигналів sin/cos 1 Vpp до інтерфейсу DRIVE-CLIQ.

У рядку Air flow direction (Напрямок потоку повітря) вибираємо варіант DE→NDE. Потік повітря стандартно спрямований від вала

двигуна (DE) до задньої сторони двигуна (NDE) для відводу втрат тепла двигуна від верстата.

Результати вибору приводного електродвигуна головного руху наведені на рисунку 21.

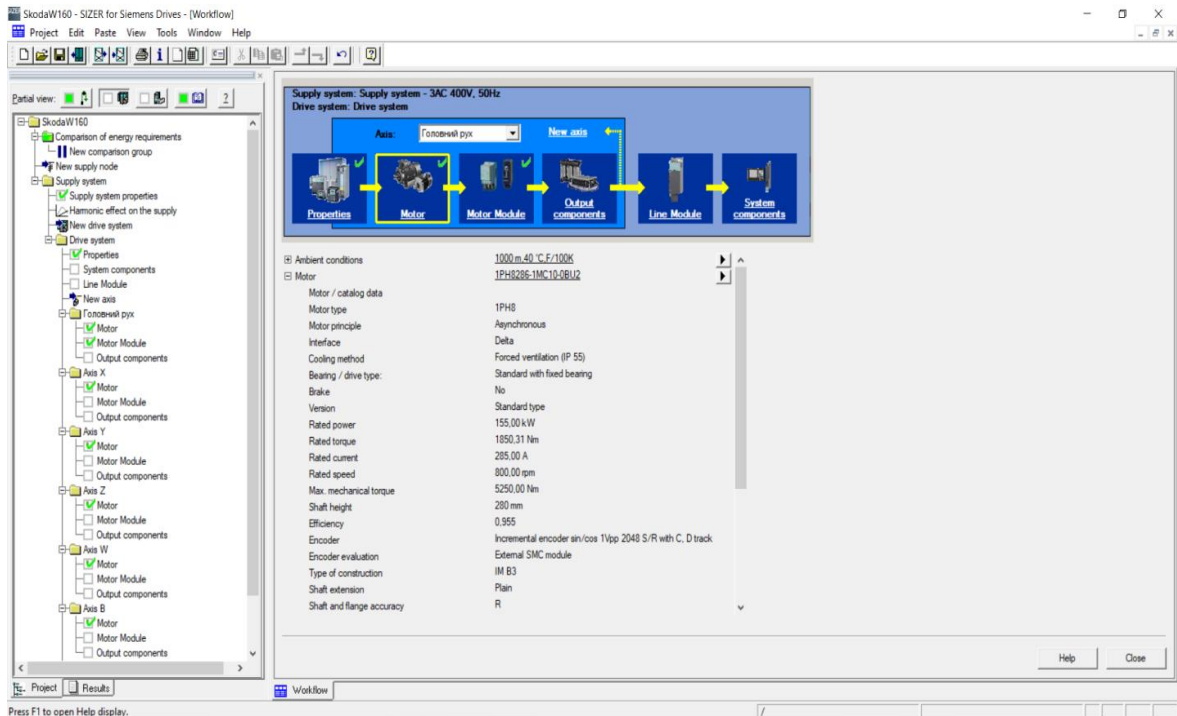


Рисунок 21 - Результати вибору приводного електродвигуна головного руху

Приводні електродвигуни верстата підключаються безпосередньо до модулю двигунів. Модуль двигуна - це силова частина (інвертор DC-AC), що живить підключений двигун енергією. Енергопостачання здійснюється через проміжний контур приводного пристрою.

Модулі приводних електродвигунів скіпа з'єднані через загальну силову шину DC активного модуля живлення. Завдяки спільному проміжного контуру постійної напруги можливий баланс енергії між модулями двигунів, тобто якщо один модуль двигуна виробляє генераторну енергію, то вона може споживатися іншим модулем двигуна в моторному режимі. Живлення проміжного контуру постійної напруги здійснюється напругою мережі від модуля живлення.

Вибір модуля двигуна (перетворювача частоти) здійснюється за довідковими даними на основі обраного двигуна.

У вікні Motor Module виведений список припустимих по струму варіантів модулів двигунів, а сірим кольором підфарбований найбільш підходящий варіант. Вибираємо цей варіант. Здійснюємо вибір Модуля двигуна – Motor Module Приймаємо Motor Module 6SL3121-1TE32-0AA4 Booksize (книжкового формату), з технічними характеристиками зазначеними на рисунку 22.

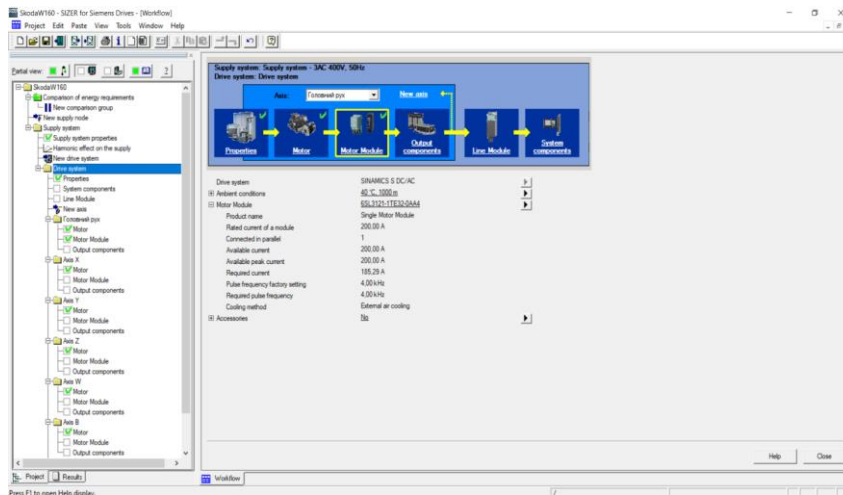


Рисунок 22 - Технічні характеристики MotorModule 6SL3121-1TE32-0AA4 Booksize

При цьому в рядку Motor Module з'являється замовлений номер модуля, а нижче стає доступним новий рядок – Accessories (Акcesуари).

Враховуючи, що додаткових приналежності не потрібно, переходимо до наступного етапу й клацаємо по іконці Output components.

Визначаємо довжину кабельних підключень Supply cable У рядку Outputoptions з параметрами зазначеними на рисунку 23.

Надалі визначаємо компоненти приводної системи осей подачі за етапами Motor, Motor Module і Output components. Параметри осей подачі зазначаємо з паспортних даних верстата дивитись таблицю 1.

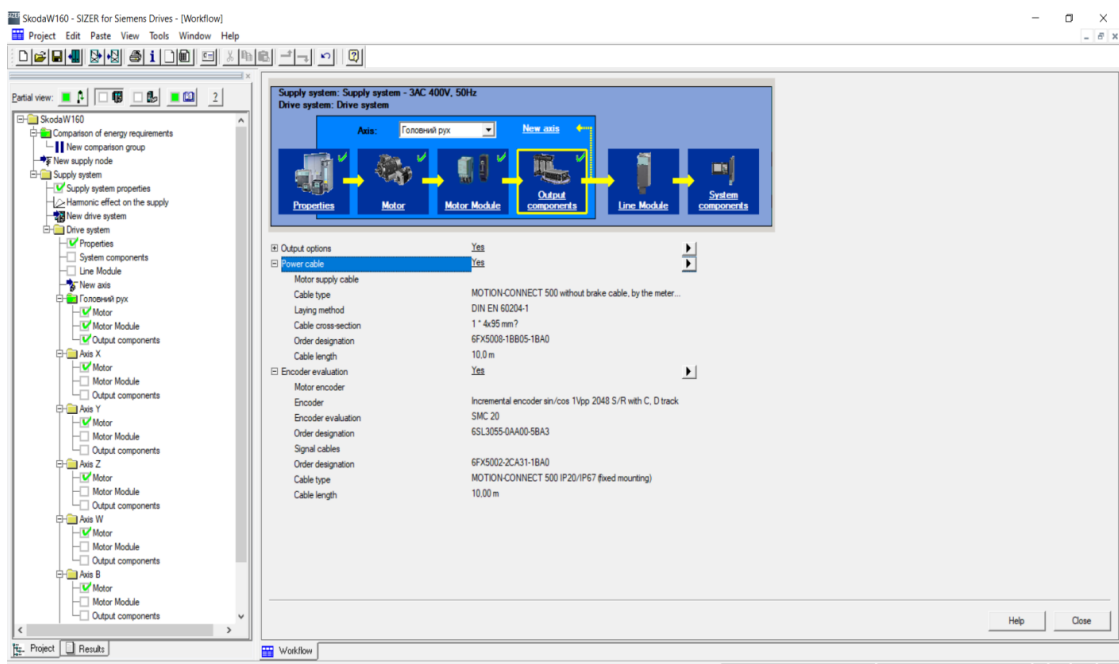


Рисунок 23 - Визначення довжини кабельних підключень Supplycable

Закінчивши конфігурування приводів усіх осей, переходимо до проектування Line Module і System components.

3.4 Конфігурування приводів подач

Переходимо до проектування привода супортів. Для цього в списку Axis вибираємо вісь X і клацаємо по іконці Motor. У результаті з'являються два списки – Ambient conditions (Умови навколишнього середовища) і Motor (Двигун), як показано на рисунку 24.

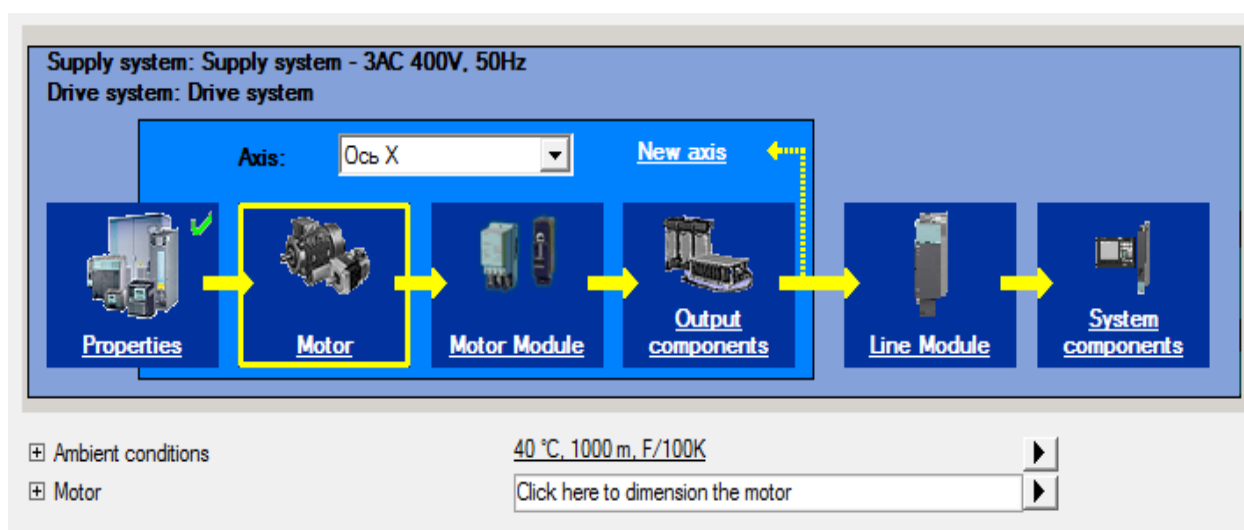


Рисунок 24 – Вікно вибору приводного електродвигуна супорту

Умови навколишнього середовища залишаємо без зміни.

У рядку Motor додержуємося вказівки Click here to dimension the motor відкривається вікно Motor wizard 1FT/1FK Step 1,

Для приводної системи застосовуємо двигун 1FT6 із прибудованим планетарним редуктором типу SP+.

У вікні Motor check (рисунок 25) представлені результати розрахунків робочих характеристик на номінальній швидкості обраного двигуна у розділі 2 електродвигуна 1LE1503-3BB63-4A44. Вони свідчать про те, що в обраного двигуна крутний момент на номінальній швидкості перевищує задане значення, а значить задовольняє вимогам.

Переходимо до останнього кроку Basic data 2. На рисунку 26 показаний вид вікна Basic data 2.

У позиції 12 тип конструкції визначається розташуванням вала. Ухвалюємо горизонтальне розташування й у позиції 12 встановлюємо

IM B5. Далі приймаємо вказаний напрямок виходу силового кабелю в позиції 13. У позиції 14 для обраного двигуна 1LE1503-3BB63-4A44 вибираємо інкрементальний енкодер з доріжками C і D без інтерфейсу DRIVE-CLIQ.

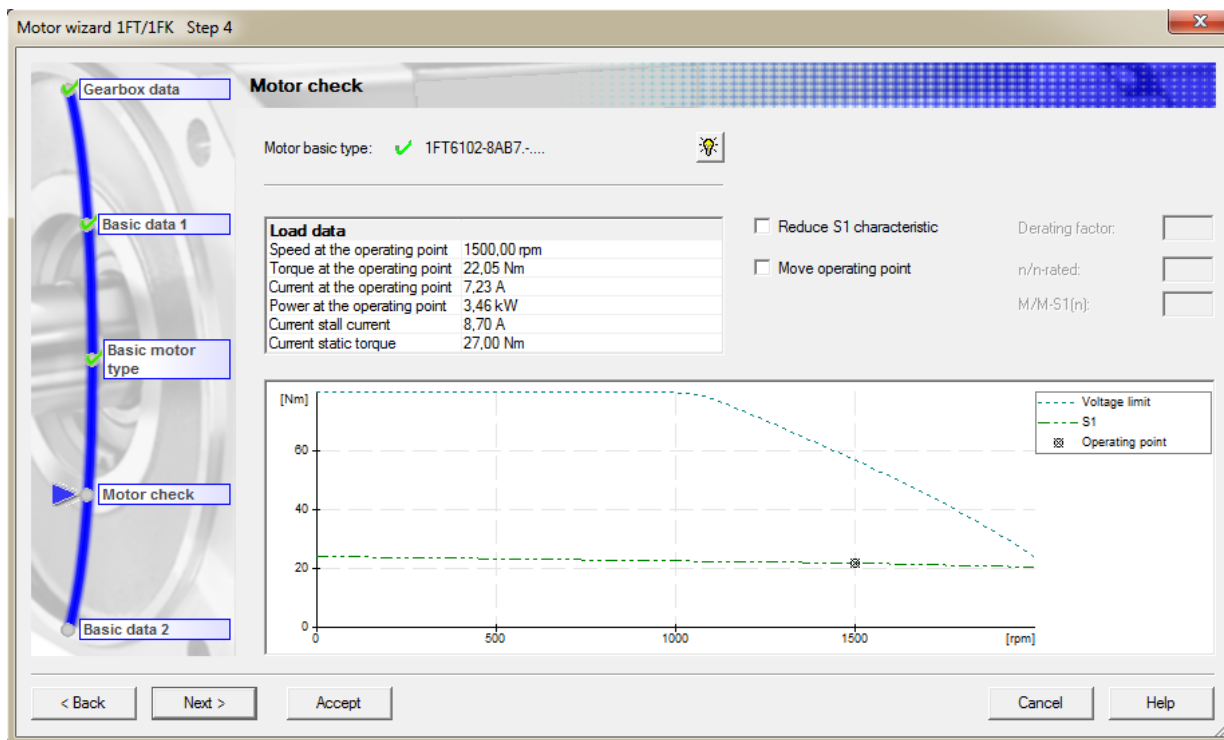


Рисунок 25 - Результати розрахунків робочих характеристик на номінальній швидкості

У позиції 15 погоджуємося із застосуванням зовнішнього SMC модуля для сполучення енкодера з DRIVE-CLIQ інтерфейсом.

Enter basic data 2

Order designation: 1FT6102-8AB71-3AB0

Mounted gearbox: None

Z-opt	Name	i	n-max	n-cont	M-max	M-cont	Inertia	Efficiency	Shaft end
No mounted gearbox type selected. If a gearbox type cannot be selected, the load requirement (speed, torque) may be too high (refer to the help for details).									

Position

Type of construction:	IM B5 (IM V1, IM V3)	12	Radial eccent. toler.:	N	15
Power connection:	Direction of power plug connect	13	Vibr. severity grade:	A	16
Motor encoder:	IC2048S/R - incremental encod	14	Degree of protection:	IP 64	16
Encoder evaluation:	External SMC module	14	Paint finish:	Anthracite	16
Shaft end:	With featherkey and half-key bz	15			

Рисунок 26 - Крок Basic data 2 налаштування параметрів приводного двигуна

Проведемо вибір моторного модуля Motor Module, а потім на рядку Motor Module, яке показано на рисунку 27, виведений список модулів, які задовольняють вимогам по навантаженню, при цьому перший модуль у списку підфарбований сірим кольором, як найбільш підходящий.

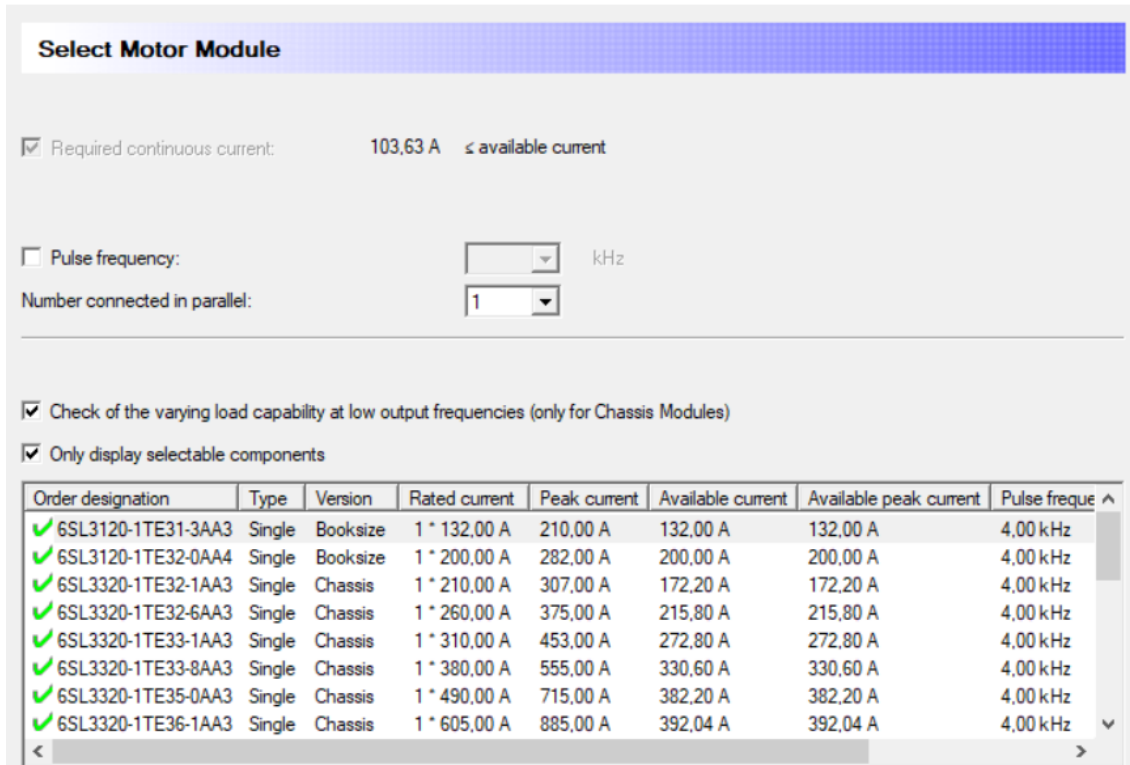


Рисунок 27 - Список модулів двигунів, які задовольняють вимогам по навантаженню

Виділяємо цей модуль і закриваємо вікно кнопкою ОК. На іконці Motor Module повинна з'явитися зелена галочка.

Переходимо до наступного етапу Output components.. У вікні Output options на робочім полі стають доступними два нові списки – Supply cable (Кабель живлення) і Encoder evaluation (Визначення енкодера).

У вікні Encoder evaluation, фрагмент якого показано на рисунку 28. У цьому вікні відображаються дані про енкодер, вбудований у двигун. Нижче у вікні розташований інтерфейс для вибору й конфігурування додаткових (зовнішніх) енкодерів,.

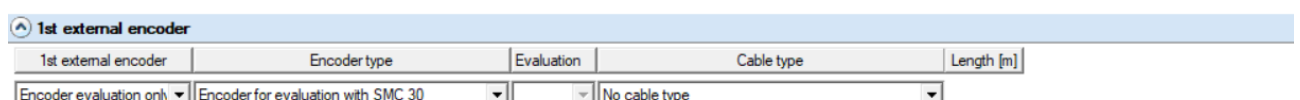


Рисунок 28 – Вікно налаштування параметрів енкодера

Закриваємо вікно Encoder evaluation, завершуючи тим самим усі налаштування привода осі X.

3.5 Конфігурування модуля живлення

Функціональна схема підключення активного модуля живлення стосовно до проєктованого електроприводу верстата приведена на рисунку 29.

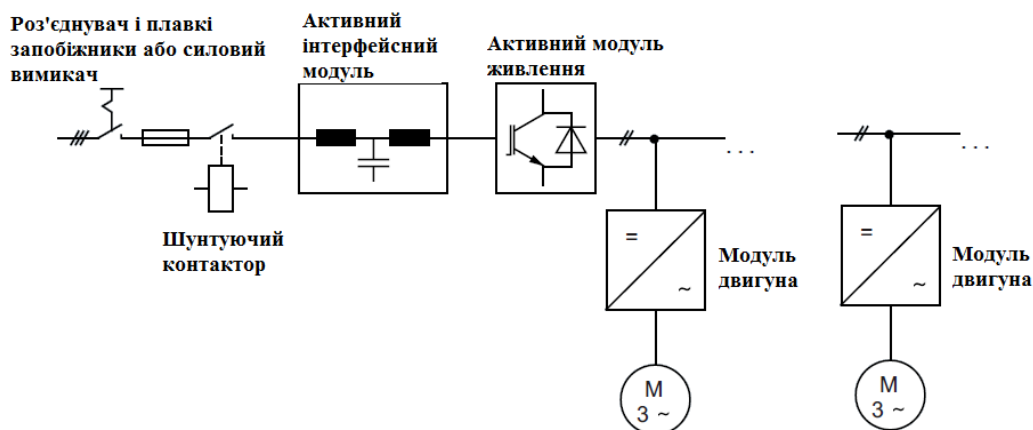


Рисунок 29 – Функціональна схема підключення активного модуля живлення

Через активний модуль живлення один або кілька модулів двигунів підключаються до мережі енергопостачання. Активний модуль живлення виробляє постійну напругу проміжного контуру для модулів двигунів. При цьому коливання напруги мережі не відображаються на напрузі проміжного контуру.

Підтримка рекуперації активного модуля живлення може бути деактивовано через параметри. Активний модуль живлення підходить для прямої експлуатації як на мережах TN, так і на мережах IT і TT. Активний модуль живлення в генераторному режимі двигунів здійснює рекуперацію енергії в мережу.

При конфігуруванні модуля живлення виконуються розрахунки необхідної потужності для лінійного модуля шляхом розрахунків загальної потужності (коефіцієнт збігу для всієї групи осей) або за допомогою рейтингу класу потужності (коефіцієнт збігу для кожного класу потужності).

Скористаємося методом Powerclassrating (див. рис. 3.10), суть якого полягає в тому, що приводи всіх осей розділяються на класи по потужності. Діапазони потужностей, що утворюють клас, стандартизовані. Крім того стандартизовані коефіцієнти одночасності роботи осей (Standard coincidencefactor).

На рисунку 30 видно, що при включенні прапорця Powerclassrating програма SIZER виділила в проєкті два класи потужностей приводів. Перший клас визначено в діапазоні 1,8...8,8 кВт, де є шість приводів подач потужністю 12,76 кВт кожний. Для цього класу стандартний, тобто розрахунковий коефіцієнт (coincidencefactor) рівний 0,28. Другий клас потужності – від 75 до 150 кВт відповідає головному приводу. Враховуючи те, що тут один двигун, приймаємо його coincidencefactor рівним 1,0.

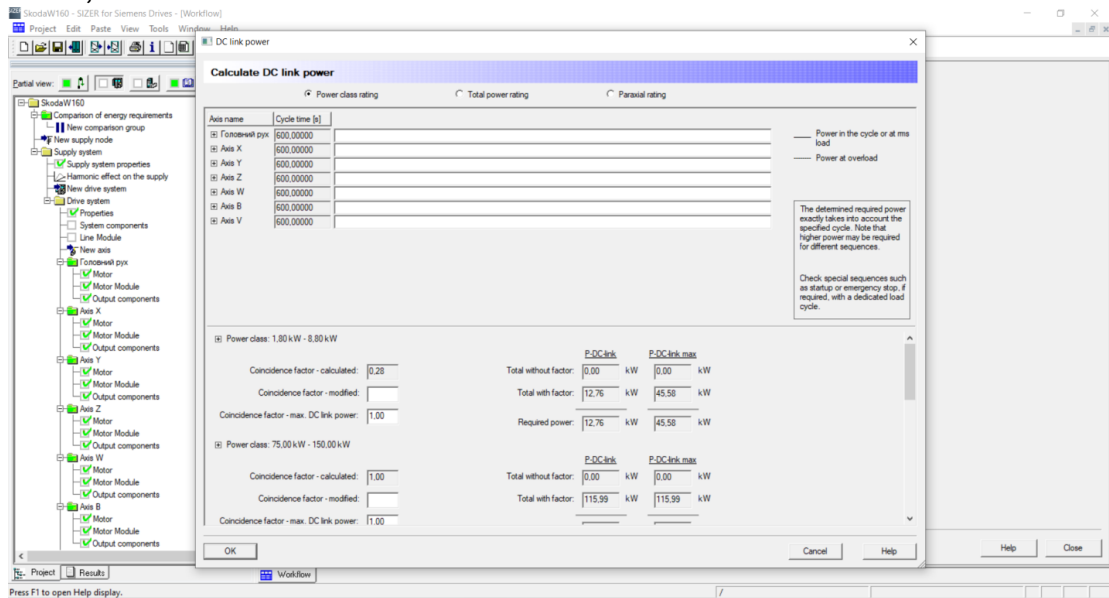


Рисунок 30 – Класи потужностей приводів верстата

У нижче розташованому списку модулів живлення один з модулів підфарбований сірим кольором (перший у списку). Враховуючи те, що цей модуль повною мірою відповідає розрахунковим даним. Вибираємо LineModule 6SL3131-7TE31-2AA3 з характеристиками зазначеними на рисунку 31.

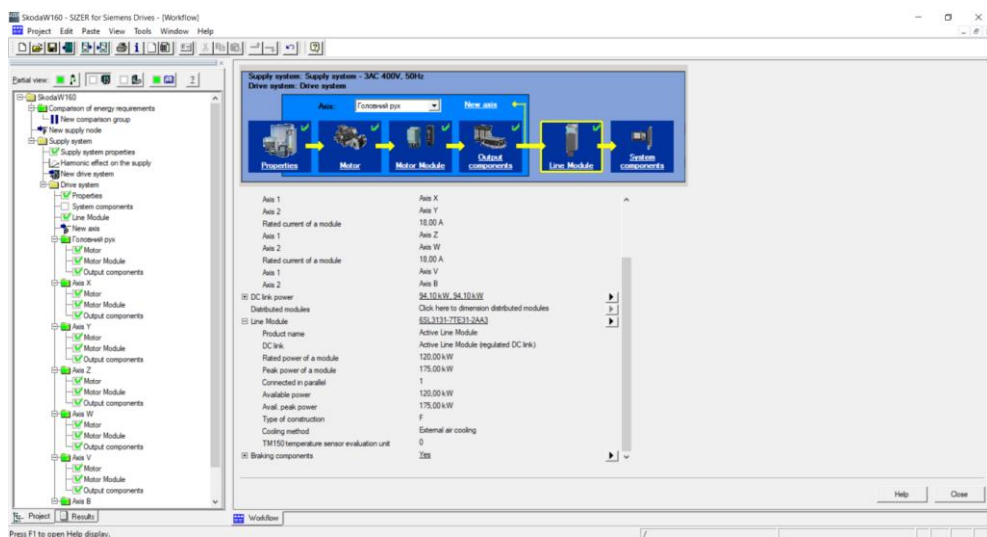


Рисунок 31 – Характеристики Line Module 6SL3131-7TE31-2AA3

При цьому у вікні програми з'являється замовлений номер LineModule і стає доступним новий рядок – Brakingcomponents (Гальмові компоненти).

До гальмових компонентів ставляться гальмові резистори (вони встановлюються за межами шафи) і електронні модулі, які підключають ці резистори до проміжного контуру. Гальмові компоненти потрібні для керованої зупинки привода при відключенні живильної мережі (аварійний останов), а також при динамічній гальмуванні, при яким відбувається рекуперація енергії навантаження і її розсіювання у вигляді тепла на гальмовому резисторі. У вікні Braking components виведений список гальмових компонентів для установки в приводну систему.

3.6 Вибір системних компонентів

Переходимо до наступного етапу – Вибір системних компонентів System components. При цьому обновляється графічний інтерфейс і з'являється список Input options. Відкриваємо вікно Input options, у якому, як опція включене застосування активного модуля живлення. Закриваємо вікно, при цьому стає доступним новий список – Add accessories.

Застосовуємо систем керування системою ЧПУ SINUMERIK

У вікні Open-loop/closed-loop control electronics вибираємо тип системи SINUMERIK – 840Dsl, далі процесор ЧПУ типу NCU 710.3BPNwithPLC 317-3PN/DP, потім термінальний процесор HMI PCU Simatic IPC 4777E 15`` with Win10 для панелі оператора, а також програмне забезпечення панелі оператора – SINUMERIK Operate.

При конфігуруванні СЧПУ SINUMERIK, зазначаємо підключення по мережі Ethernet панелі оператора, клавіатури та верстатного пульта. Обрані компоненти й засоби інтерфейсу для їхнього підключення показано на рисунку 32.

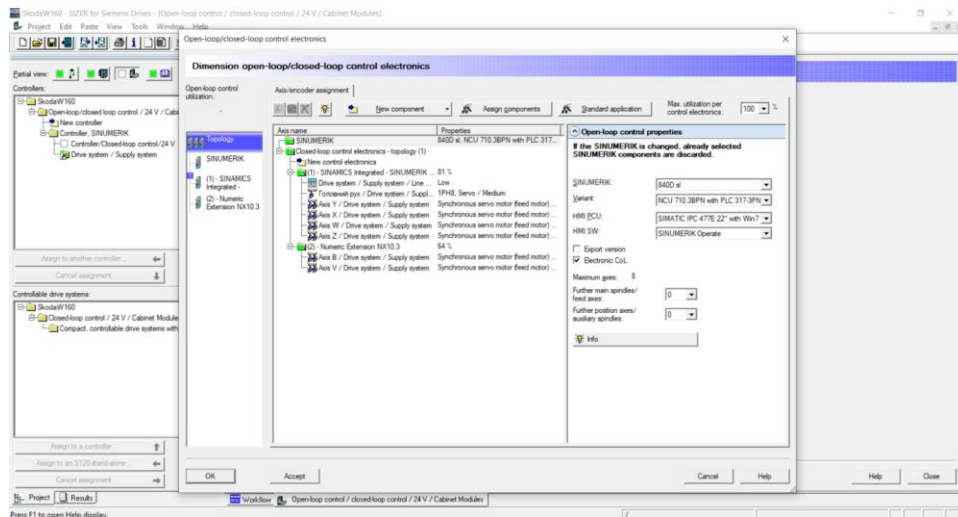


Рисунок 32 - Обрані компоненти й засоби інтерфейсу СЧПУ

На наступному етапі здійснимо конфігурування – Drive-cliq topology (рисунок 33). На рисунках 24 та 25 представлена топологічна схема з'єднання ЧПУ-процесора NCU 710.2 з модулями приводної системи.

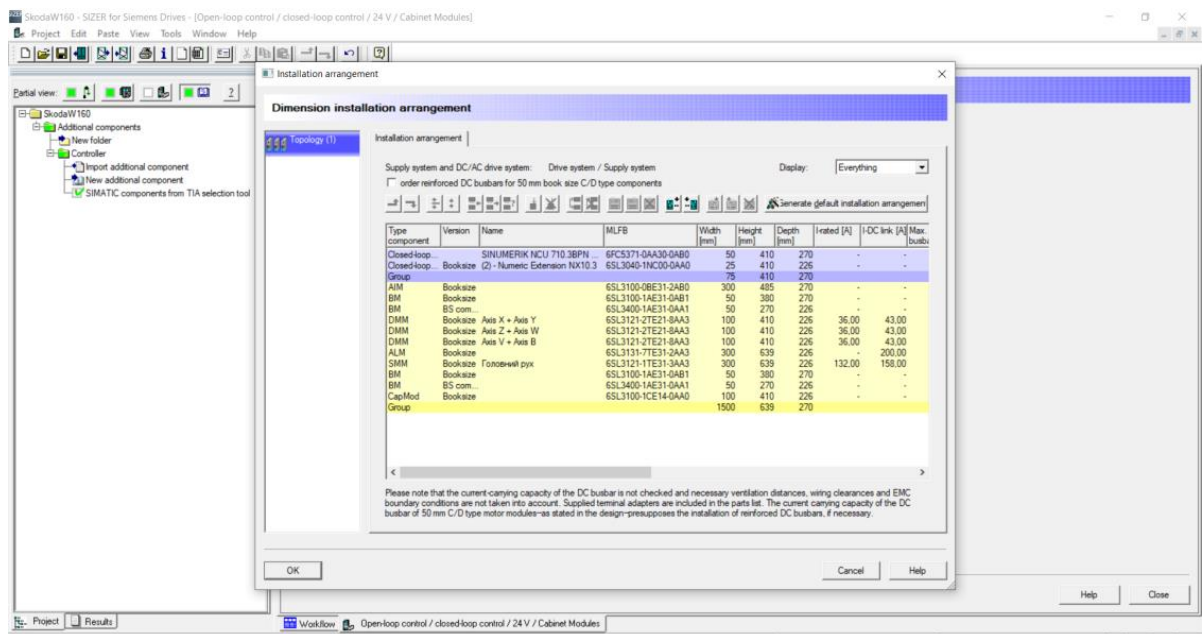


Рисунок 33 - Конфігурування – Drive-cliq topology

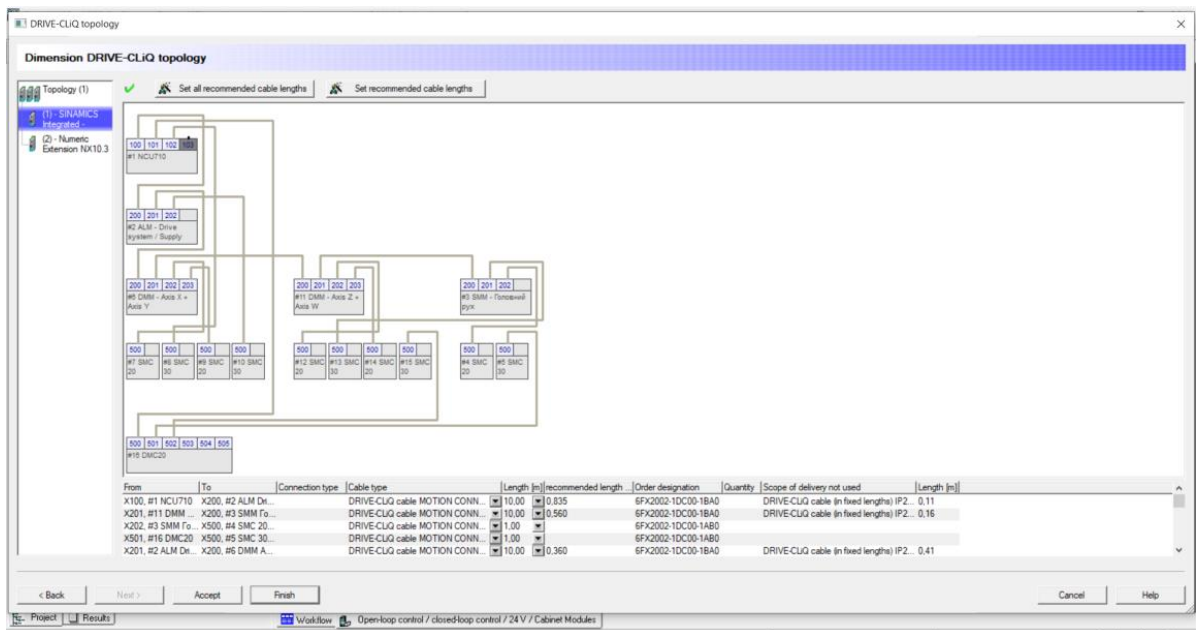


Рисунок 34 - Топологічна схема з'єднання ЧПУ-процесора NCU 710.2 з модулями приводної системи

Призначаємо споживачів потрібно відкрити кнопку Optimize список блоків живлення. У списку показані блоки на 5 А, 10 А, 20 А и на 40 А два типи – modular (модульна конструкція) і smart (компактна конструкція). Вибираємо більш досконалий модуль SITOP modular з рекомендованим значенням сили струму 40,00 А.

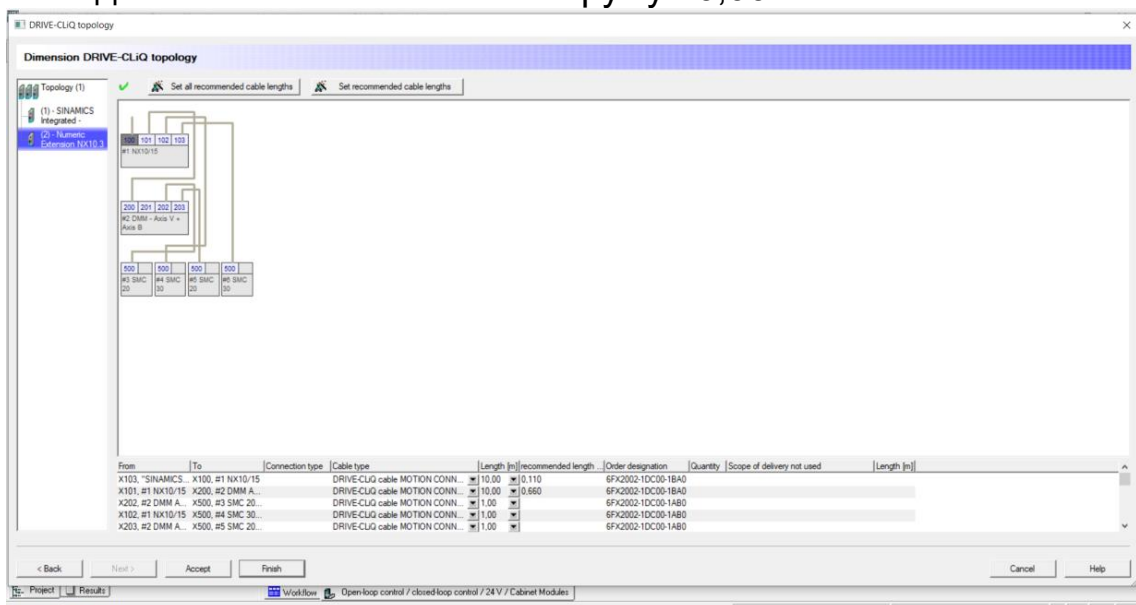


Рисунок 35 - Топологічна схема з'єднання ЧПУ-процесора NCU 710.2 з модулями приводної системи

Результаті всі споживачі підключаються до модуля живлення із вказівкою споживаного струму, як показано на рисунку 36.

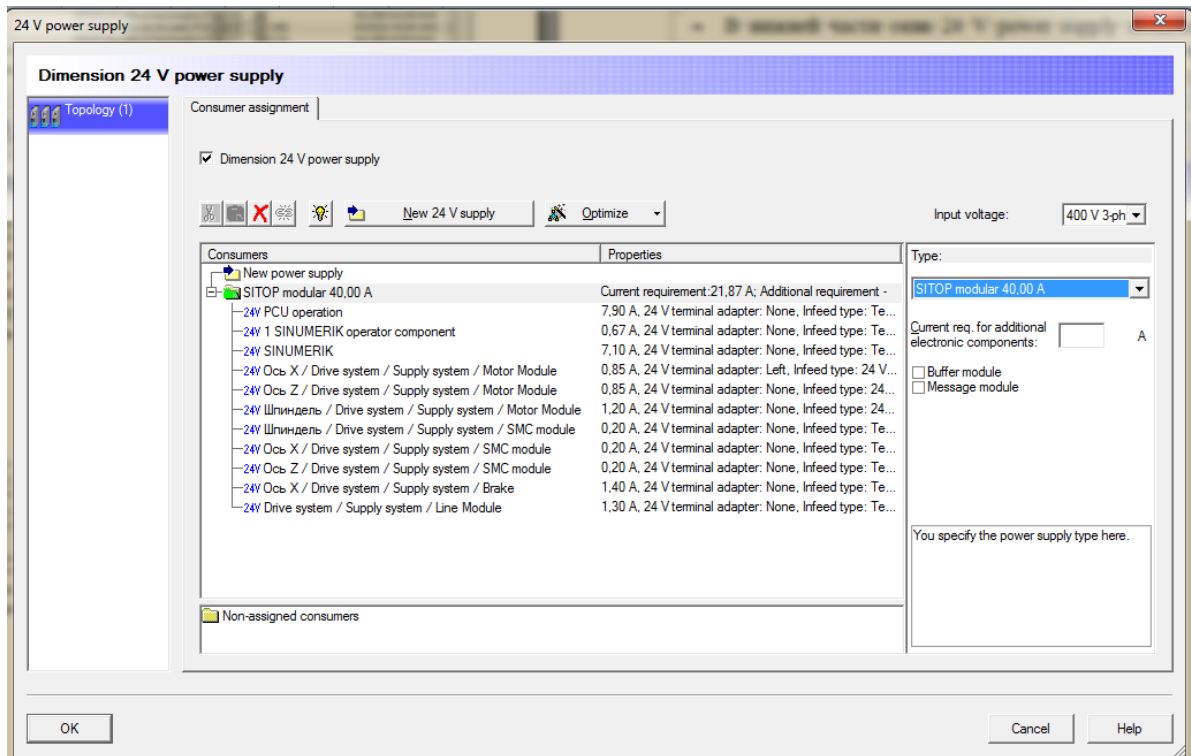


Рисунок 36 – Підключення спожива до модуля живлення SITOP modular

У розділі проведено конфігурування, та вибір компонентів СЧПУ верстата, що модернізується.

3.7 Розробка алгоритму функціонування системи

Програмне управління верстатом є типовим завданням управління в реальному масштабі часу. Це вимагає вірного сполучення апаратних і програмних ресурсів системи із зовнішніми пристроями. У загальному випадку управління устаткуванням зводиться до обміну інформацією між управляючою ЕОМ і зовнішніми пристроями, що входять у його склад.

Специфіка програмування апаратури й, зокрема, розроблювальної системи управління полягає в підвищених вимог до швидкодії програмного забезпечення й у необхідності одержання програми мінімального розміру. Для цього доводиться використати спеціальні методи й алгоритми.

Головний модуль програми управління верстатом представлений на рисунку 37.

Він являє собою диспетчер, що направляє роботу системи по одному із двох шляхів, що відповідають двом можливим режимам роботи верстата: автоматична обробка (AVTO), ручне управління (HAND). Перед селекцією режиму робиться ініціалізація системи управління підпрограмою SYSINIT.

При ініціалізації виконуються наступні дії:

- підготовка силової частини приводів й електроавтоматики;
- установка робочих органів у нульове положення;
- скидання системи управління приводами й інформаційною системою.

Після ініціалізації треба підтвердження початку роботи, у іншому випадку програма завершується з видачею відповідного повідомлення.

Режим автоматичної обробки починається з підпрограми PRGIN, що дозволяє вводити програму обробки із клавіатури або завантажувача готову з диска.

Програма вводиться покадрово, кожен кадр відповідає якій-небудь технологічній операції. Для перетворення вхідної програми у внутрішній формат дані системи використовується підпрограма-транслятор TRANS.

Після перетворення даних потрібен запит на початок обробки. У випадку позитивної відповіді на даний запит, починається циклічне виконання програми обробки.

Цикл починається з перевірки на закінчення програми (EOP).

Якщо програма ще не закінчена, то виконується зчитування кадру управляючої програми підпрограмою RD_KADR і його аналіз (визначення типу інтерполяції, робочого квадранта, визначення величини переміщення, у напрямку яких вісей воно повинне вироблятися й т.д.), тобто підготовляється інформація для підпрограм нижнього рівня (інтерполятора, регулятора й т.п.). Перед відпрацюванням кадру виконується аналіз верстата на аварійні ситуації підпрограмою TSTSTAT.

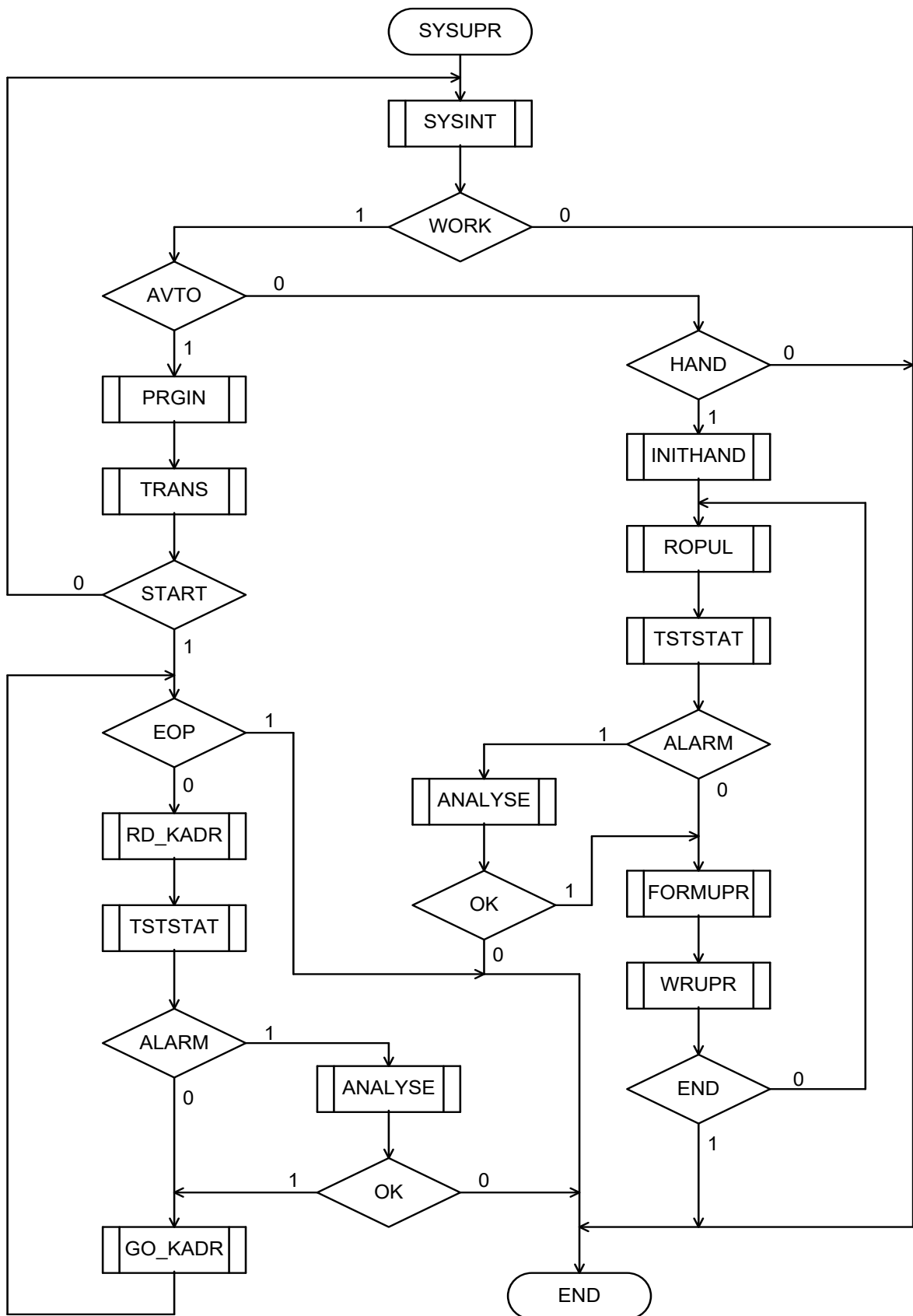


Рисунок 37 - Головний модуль програми управління верстатом

У випадку виникнення аварійної ситуації (ALARM=1) відбувається аналіз несправності й аналізується можливість її усунення, що виконує підпрограма ANALYSE, у випадку успішного завершення якої управління передається підпрограмі виконання кадру управляючої

програми GO_KADR. Дана підпрограма містить у собі програми інтерполяції (лінійної й круговий), програми читання й обчислення положення й швидкості виконавчих органів, програми регуляторів й інші програми нижнього рівня.

Ручний режим роботи починається підпрограмою INITHAND, що робить необхідне настроювання параметрів системи. Далі йде робочий цикл, що починається читанням стану пульта оператора (RDPULT).

Тестування стану робиться підпрограмою TSTSTAT, що виконує, як було описано вище, перевірку наявності аварійної ситуації. У цьому випадку в дію вступає програма ANALYSE, дії якого абсолютно ідентичні подібній до програми в автоматичному режимі роботи.

При відсутності аварії відбувається формування підпрограмою FORMUPR управляючих слів:

- коду швидкості подачі за координатою;
- слова управління електроавтоматикою.

Дані слова записуються у відповідні реєстри системи управління (підпрограма WRUPR). По закінченні режиму ручної обробки видається відповідне повідомлення, і програма завершує свою роботу. Процедури основної програми й виконання ними дії наведені в таблиці 4.

Таблиця 4 – Процедури головного модуля

Процедур а	Виконання дії
SYSINIT	Підготовка системи до роботи, установка робочих органів у нульове положення, скидання блоку управління приводами й інформаційною системою, ввімкнення силових ланцюгів і ланцюгів захисту.
PRGIN	Підкадрове введення управляючої програми із клавіатури у вигляді виразу вхідної мови або зчитування готової програми з диска.
TRANS	Трансляція вхідної програми у формат, що використовується при обміні інформацією в системі. Формування масиву кадрів.
RD_KADR	Читання кадру управляючої програми з масиву, що сформований процедурою TRANS. Аналіз кадру: визначення виду інтерполяції, робочого квадранта, величин переміщення й швидкостей по координатах. Визначення технологічних функцій
GO_KADR	Відпрацьовування кадру управляючої програми. Прийом й обчислення швидкості і положення та їхнє цифрове регулювання. Інтерполяційні розрахунки.
INITHAND	Підготовка системи до роботи в ручному режимі

Продовження таблиці 4

RD_PULT	Читання пульта оператора. Завдання із клавіатури величин швидкості й переміщення по координатах, вибір виду інтерполяції. Завдання стану електроавтоматики верстата
TSTSTAT	Читання стану електроавтоматики верстата: стану кінцевих вимикачів, контактів реле захистів і силових контакторів.
ANALYSE	Аналіз аварійної ситуації, визначення можливості продовження роботи верстата.
FORMUP R	Формування кодів управління: коду завдання швидкості переміщення по координаті, коду управління електроавтоматикою.
WRUPR	Запис управляючих кодів у відповідні регістри системи. Відпрацьовування завданого переміщення по відповідних координатах.

Розроблена блок-схема алгоритму дозволяє здійснити функціонування системи ЧПУ в автоматичному режимі при обробці на верстаті.

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ

Модернізація токарно-карусельного верстату моделі SKD-50 полягає в удосконаленні системи управління переміщень координат супорту. Оскільки верстат бере участь в основному виробництві, то вона має пряму дію на підвищення продуктивності. Вдосконалення характеристик верстата веде до зниження експлуатаційних витрат, витрат на ремонт устаткування і збільшення робочого фонду часу роботи.

Передбачені економічні показники при використанні нової системи управління будуть збільшені, відбудеться збільшення точності при обробці деталей до 0,001 мм. і скорочення часу на дану операцію, що спричинить поліпшення продуктивності роботи на верстаті, а зокрема можна буде уникнути позапланових простоїв обладнання при роботі і браку вироблюваної продукції. Зараз у виробництві все ще використовують застарілі версії систем управління верстатами, які є повільнішими за швидкістю і менш точними. Дана система управління в процесі своєї роботи принесе вигоду, поліпшить показники точності, понизить витрати часу на одну операцію.

У розділі перераховані всі переваги в технічному і економічному плані вибраного технічного рішення застосування засобів автоматизації в порівнянні з вибраним аналогом. На підставі перерахованих переваг, проведений розрахунок економічного ефекту і техніко-економічних показників.

Початкові дані для розрахунку економічної ефективності верстата, що модернізується, приведені в таблиці 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1 – Початкові дані для розрахунку економічної ефективності верстата

Найменування даних, позначення, розмірність		Базовий варіант	Новий варіант
Призначення устаткування		Основне	
Вид продукції		Броня	
За одиницю продукції прийнято		Тона деталі	
Показники	Позначення	До модернізації	Після модернізації
Виробнича тон/рік	<i>A</i>	772	1007
Тривалість роботи устаткування на рік, доба	<i>T_{доба}</i>	365	365
Кількість змін в добі	<i>n_{зм}</i>	2	2
Тривалість робочої зміни, год	<i>t_{зм}</i>	11,5	11,5

Продовження таблиці 4.1

Показники	Позначення	До модернізації	Після модернізації
Електр. потужність, кВт/ч	$H_{\text{э}}$	63	63
Вартість 1 кВт	$Ц_{\text{э}}$	2,64	2,64
Норма амортизації, %	H_A	15	15
Норма відрахувань на ремонт, %	H_P	3	3
Норма обслуговування, чол. за зміну	$НОБС$	2	2
Годинна тарифна ставка, грн.	$ЧТС$	89	89
Додаткова зарплатня, грн.	$\%Дз$	47	47
Нарахування на зарплату до соціальних фондів, %	$\%Осф$	22	22
Ціна продукції 1 тона грн	$Цп$	148000	148000

Вартість капіталовкладень до основних виробничих фондів підприємства, де буде встановлена машина. Основні виробничі фонди беруть участь у виробничому процесі тривалий час (не меншого року), зберігаючи при цьому свою натуральну форму, а їх вартість переноситься на вартість продукції, що виготовляється, поступово, по частинах, у міру зносу.

Загальна орієнтовна вартість капіталовкладень (або реальних інвестицій, або, простіше кажучи, грошових коштів) до основних виробничих фондів (ОПФ) в балансових цінах (т.е. у цінах, по які вони числяться на балансі підприємства, на першому році експлуатації) підприємства, яке придбає і встановить у себе машину $K_{\text{Общ}}$, грн., визначається по формулах:

$$K_{\text{Общ}}^B = C_{\text{МАШ}}^B + (K_{\text{Ф+К}} + K_{\text{П.З.Д.}} + K_{\text{Д.Ф}}) \cdot C_{\text{МАШ}}^B, \quad (4.1)$$

$$K_{\text{Общ}}^H = C_{\text{МАШ}}^H + (K_{\text{Ф+К}} + K_{\text{П.З.Д.}} + K_{\text{Д.Ф}}) \cdot C_{\text{МАШ}}^H, \quad (4.2)$$

де $C_{\text{МАШ}}^B$, $C_{\text{МАШ}}^H$ - вартість реалізації машини, грн., в базовому і новому варіантах визначена по формулах; $K_{\text{Ф+К}}$ - коефіцієнт обліку витрат на фундамент і підведення комунікацій, за наявності фундаменту рівний 0,35; $K_{\text{П.З.Д.}}$ - коефіцієнт обліку витрат на виробничу будівлю, в якій встановлюється машина, за відсутності необхідності споруди виробничої будівлі рівний 0; $K_{\text{Д.Ф}}$ - коефіцієнт обліку витрат на

інші основні фонди (виробничий інвентар тривалого терміну використання, побутові і складські будівлі, споруди і ін.) рівний 0,35.

4.1 Витрати на модернізацію

Для підрахунку витрат на модернізацію, нижче наведена таблиця товаро-матеріальних цінностей.

Таблиця 4.2 – Перелік товаро-матеріальних цінностей для виконання модернізації

Найменування	Кількість	Ціна, грн	Загалом, грн
Центральний процесор 1214C 6ES7214-1AG40-0XB0	1	19800	19800
Гідроаккумулятор АО2-21-4	1	5566	5566
Блок живлення SITOP (24 В).	1	4006,6	4006,6
SIMATIC S7-300, UR0, монтажна стійка для базових блоків 6ES7390-1AE80-0AA0	1	186,2	186,2
Серводвигун швидкого переміщення супортів	2	17930	35860
Модуль дискретного 16DI/16DO модуль вводу/ виводу 6ES7223-1BL32-0XB0	5	14320	71600
Модуль аналогового вводу 6ES7231-4HD32-0XB0	2	11700	23400
Верстатний пульт – MCP 310C.	1	48916,4	48916,4
Енкодер	4	10000	40000
Головний привід змінного струму	1	500000	500000
Привод супортів	2	120000	240000
Панель оператора – OP 012 з PCU50.3.	1	38258	38258
система ЧПУ Sinumerik 840Dsl із процесором NCU 710-2.	1	162110	162110
Кабель OLFLEX 140 4G4	30	350	10500
Загалом ($C_{пр}$)	-	928685	1200203

Таблиця 4.3 – тип витрат з описанням до модернізації та після модернізації.

Тип витрат	До модернізації	Після модернізації
Витрати на амортизацію, грн	262258,5	534104,5
Витрати на ремонт, грн	52451,7	106820,9
Витрати електроенергію, грн	128399,04	167484,2
Витрати на зарплату, грн:		
Тарифний фонд заробітної плати, грн	1444320	1158720
Додаткова зарплатня, грн	433296	347616,0
Фонд заробітної плати, грн	1877616	1506336
Відрахування до соціальних фондів, грн	413075,52	331393,92
Зарплата з відрахуваннями на соц. фонди, грн	2290691,52	1837729,92

4.2 Фонд часу роботи нової машини

Модернізація або реконструкція визначеною завданням на проектування машини, дозволяє змінити тривалість її експлуатації, тобто збільшити річний ефективний фонд часу роботи $\Phi_{\text{Э}}^H$, годину., в порівнянні з базовим $\Phi_{\text{Э}}^B$, год.

Розрахунок ціни і чистого прибутку річного випуску продукції.

Розрахунок ціни здійснюється виходячи з прогнозованих об'ємів виробництва в рік, цін, що склалися на ринку на аналогічну продукцію, внутрішніх витрат підприємства і багатьох інших чинників об'єктивного і суб'єктивного характеру. Відповідно до цього припускаємо, що за перший рік випуску продукції її собівартість буде такою, яку ми визначили, і вся продукція буде реалізована.

Існує три стратегії ціноутворення:

1 Стратегія, заснована на витратах: розраховують витрати виробництва, а потім додають бажаний прибуток, попит не враховується, використовуються нижня ціна товару - мінімальний рівень покриття витрат.

2 Стратегія, заснована на попиті: встановлюють ціну після вивчення потреб ринку, при цьому призначається максимальний рівень ціни, який споживач може «осилити».

3 Стратегія, заснована на конкуренції: ціни призначають залежно від споживачів, сервісу, що надається, реальних і передбачуваних відмінностей між власними товарами і товарами конкурентів.

У нашому випадку використовуємо першу стратегію. Ціна на продукцію визначається по спрощеній методиці і розраховується по двох варіантах- базовому і новому.

Таблиця 4.4 – Показники витрат

Найменування показника	Позначення	Значення
Капітальні витрати на модернізацію, грн	K_{ABT}	3560696,832
Зниження собівартості тонни продукції:		
а) абсолютне, грн,	DC_{ABC}	913,4
б) відносне, %.	$DC\%$	25,8
Додатковий прибуток, грн	DP	34867661,2
Термін окупності витрат, років	T_{OK}	0,1
Коефіцієнт рентабельності капіталовкладень, частки од.	r_K	9,79
Річний економічний ефект, грн	\mathcal{E}_ϕ	34333556,65

4.3 Складання техніко-економічних показників модернізації

Складання техніко-економічних показників (ТЕП) зводиться до порівняння двох варіантів проекту машини - до і після модернізації. Це порівняння виконується за декількома показниками. Техніко-економічні показники проекту зведені в таблицю 4.5.

Таблиця 4.5 – Техніко-економічні показники модернізації

Показник	Значення	До модернізації	Після модернізації	Зміна показника D
Річний випуск продукції, т	A	772,0	1007,0	-235,0
Витрати на амортизацію системи керування, грн.	P_A	262258,5	534104,5	-271846,0
Витрати на ремонт системи керування, грн.	P_P	52451,7	106820,9	-54369,2
Витрати на електроенергію, грн.	$P_{\mathcal{E}}$	128399,0	167484,2	-39085,2

Продовження таблиці 4.5

Показник	Значення	До модернізації	Після модернізації	Зміна показника D
Витрати на зарплатню, грн.	P_3	2290691,5	1837729,9	452961,6
Собівартість циклу, грн.	C	3541,2	2627,7	913,4

ВИСНОВКИ

В даній кваліфікаційній роботі розглянуто принцип роботи та технологія металообробки великогабаритної продукції токарно-карусельного верстату моделі SKD 50.

Впроваджено сучасні рішення реалізацій АСУ електроприводної системи з регулювання швидкості обертання електродвигунів супортів токарно-карусельного верстату SKD шляхом застосування перетворювачів швидкості.

Детально виконана заміна головного приводу постійного струму на змінний, розробка компонування приводної системи верстату, вибір вимірювальних перетворювачів швидкості. Впровадження якого дозволяє підвищити плавність, діапазон та точність переміщення супортів верстату.

Доведено техніко-економічне обґрунтування модернізації шляхом підвищення точності процесу металообробки токарно-карусельного верстату моделі SKD-50, та зростання виробничих показників. Зменшення часу позапланового простою обладнання. Збільшено виробничі показники верстата на 235т на рік.

У графічній частині наведені: схема підключення модулів живлення електроприводу верстата, схема підключення модулів двигуна супортів, схема підключення модуля управління. Блок схема алгоритму функціонування СЧПУ, плакат математичне моделювання електроприводу розрахунків.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Електричний привід. Терміни та визначення / за ред. С.К. Козирєва. - К.: Видавництво МЕІ, 2015. - 96 с.
2. Інжиніринг електроприводів і систем автоматизації: навчальний посібник для студ. вищ. навчальн. закладів / [М.П. Белов, О.І. Зементов, О.Є. Козярук та ін.]; за ред. В.А. Новікова, Л.М. Чернігова. - М.: Видавничий центр "Академія", 2006. - 368 с.
3. Мартинов А.А. Проектування електроприводів: Навч. посібник / СПбДУАП. СПб., 2004. - 97 с. (pdf)
4. Методичні вказівки до виконання контрольної роботи з дисципліни "Автоматизований електропривод" (для студентів спеціальності 7.092501)/Сост. О.В. Суботін. - Краматорськ: ДДМА, 2006. - 32 с.
5. Методичні вказівки до комп'ютерного практикуму по дисципліні "Цифрові системи керування й обробки інформації" (для студентів спеціальності 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології») / Уклад. О. О. Сердюк. - Краматорськ: ДДМА, 2018 – 87 с.
6. Москаленко В.В. Електричний привід: підручник для студ. вищ. уч. закладів / В.В. Москаленко. Москаленко. - М.: Видавничий центр "Академія", 2007. - 368 с. (djvu)
7. Новіков В.А., Савва С.В., Татаринцев М.І. Електропривод у сучасних технологіях / Під ред. В.А.Новікова. Підручник для студентів вишів - М: Академія, 2014. - 400 с.
8. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та інш. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка» / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та інш. – К.: Либідь, 2005. – 680 с. Ч1.
9. Самосейко В.Ф. Теоретичні основи керування електроприводом: Навчальний посібник. - СПб.: Елмор, 2007. - 464 с. (djvu)
10. Соколовський Г.Г. Електроприводи змінного струму з частотним регулюванням: підручник для студ. вищ. уч. закладів / Г.Г. Соколовський. - М.: Видавничий центр "Академія", 2006. - 272 с.
11. Фіраю Б.І. Теорія електроприводу: Навч. посібник / Б.І. Фіраго, Л.Б. Павлячик. - Мн.; ЗАТ "Техноперспектива", 2004. - 527 с.