

Хмельницький національний університет  
Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

### Розробка фрезерного трьохкоординатного верстату для демонтажу BGA мікросхем побутових пристроїв

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Шифр, назва


Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Шифр, назва

Освітня програма «Електропобутова техніка»

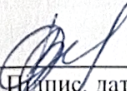
Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 4 курсу  
група ET-21-1

  
Підпис

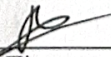
А. С. Бартков  
Ініціали, прізвище

Керівник

  
Підпис, дата

С. В. Смутко  
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

С. І. Пундик  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри МАЕЕС

  
Підпис, дата

В. С. Неймак  
Ініціали, прізвище

2 06 202 5 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень бакалавр

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Шифр і назва

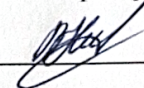
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Шифр і назва

Освітня програма Електропобутова техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС



2.06.2025

ЗАВДАННЯ  
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Бартков Андрій Сергійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка фрезерного трьохкоординатного верстату для демонтажу VGA мікросхем побуто-вих пристроїв

керівник роботи Смутко Світлана Валеріївна, к.т.н., доц

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 7 02 2025 р. № 23

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 2.06.25

3. Вихідні дані до роботи характеристики фрезерного трьохкоординатного верстату

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1 Огляд та аналіз технічної літератури з тематики бакалаврської роботи. 2. Розробка конструкції верстата. 3. Розрахунки та підбір елементів конструкції станка. Висновки. Перелік джерел посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

1. Обладнання для фрезерування (ДО, А1). 2. Гравіювально-фрезерний верстат (КЗ, А1). 3. Гравіювально-фрезерний верстат (Е1, А1). 4. Модуль керування верстатом (Е5, А1). 5. Гравіювально-фрезерний верстат (ВЗ, А1). 5. Гравіювально-фрезерний верстат (ДІ, А1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

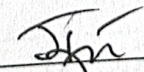
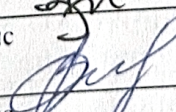
7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд та аналіз технічної літератури		
2. Розробка конструкції верстата		
3. Розрахунки та підбір елементів конструкції станка		
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу		

Студент

Керівник роботи

  
 Підпис  
  
 Підпис

А.С. Бартков  
 Ініціали, прізвище  
 С.В. Смутко  
 Ініціали, прізвище

# АНОТАЦІЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи студента спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»


1. Прізвище, ім'я та по батькові Бартков Андрій Сергійович

2. Тема бакалаврської роботи Розробка фрезерного трьохкоординатного верстату для демонтажу BGA мікросхем побутових пристроїв

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента \_\_\_\_\_

4. Об'єм бакалаврської роботи: креслень 6 арк., сторінок записки 56

5. З удосконаленням технологій та появою нових матеріалів трансформуються архітектура процесорів, що призводить до їх зменшення у розмірах, при цьому зростає їхня потужність. Однак, від поломок ніхто не в безпеці, отже, виникає необхідність вміти обслуговувати та ремонтувати різноманітну техніку з мікропроцесорами, котрі нині здебільшого закріплені на платах за допомогою BGA кулькового припою. Гравіювально-фрезерні верстати, актуальні нині в широкому спектрі виробничих сфер – від ювелірки до створення форм для лиття та оснащення, – є складним сучасним обладнанням, яке функціонує під управлінням комп'ютера. В бакалаврській роботі здійснюється розробка розробці настільного гравіювально-фрезерного верстата і залишається актуальним у поточний період, знаходячи застосування в ремонті електроприладів із мікропроцесорним управлінням, як для невеликих приватних бізнесів, так і для навчальних цілей. В розрахунково-пояснювальній записці наведено всі необхідні розробки, а також розділи, що відповідають встановленим вимогам. В першому розділі проведено огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень з тематики бакалаврської роботи, а саме процес фрезерування та обладнання для фрезерування. В другому здійснюється розробка конструкції верстата. В третьому розділі проведено розрахунки та підбір елементів конструкції станка.

Підпис студента 

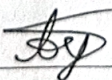
" 2 " 06 2025 р.

## РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 1 від "12" 06 2025 р.

Оцінка проекту ЕК 4,5/В  
Рекомендації ЕК впровадження у виробництво

Особливі відмітки —

Технічний секретар 

" 12 " 06 2025 р.



## ВСТУП

Ми проживаємо в епоху стрімкого прогресу різноманітної електроніки, і сучасна техніка неможлива без мікропроцесорів та мікроконтролерів. Їх можна зустріти скрізь навкруги нас – від дитячих розваг до військового виробництва. З удосконаленням технологій та появою нових матеріалів трансформується архітектура процесорів, що призводить до їх зменшення у розмірах, при цьому зростає їхня потужність. Однак, від поломок ніхто не в безпеці, отже, виникає необхідність вміти обслуговувати та ремонтувати різноманітну техніку з мікропроцесорами, котрі нині здебільшого закріплені на платах за допомогою BGA (англ. Ball grid array - кулькові решітки) кулькового припою. З огляду на швидкий розвиток технічного прогресу, важливо вивчати нові методи ремонту обладнання, щоб не відставати від сучасних тенденцій.

Сучасні мікросхеми BGA - це справжній виклик для кожного інженера, що ремонтує побутову техніку з мікропроцесорним управлінням. Щороку вони все більше витісняють з плат елементи в корпусах QFP, TQFP та інших. А все тому, що BGA-корпус зараз найдосконаліший і перевершує інші за багатьма параметрами:

- щільності монтажу;
- теплопровідністю;
- поміхостійкістю.

Їхній єдиний недолік полягає в тому, що без спеціального устаткування заміна мікросхеми в BGA корпусі неможлива. На даний момент зняти таку мікросхему реально лише з використанням інфрачервоної паяльної станції, котра забезпечує рівномірний нагрів плати до необхідної температури. Але не завжди є варіант демонтувати мікросхему за допомогою наявного обладнання, адже виробники нерідко застосовують до кріпильних елементів компаунд, котрий не реагує на зміни температури. Через це було

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

запропоновано розробити фрезерний верстат з трьома осями координат, здатен демонтувати BGA мікросхеми, не пошкодивши при цьому плату та контактні майданчики для встановлення нового компонента.

Гравіювально-фрезерні верстати, актуальні нині в широкому спектрі виробничих сфер – від ювелірки до створення форм для лиття та оснащення, – є складним сучасним обладнанням, яке функціонує під управлінням комп'ютера. Подібні верстати відмінно зарекомендували себе в модельному виробництві, у виробництві рекламної продукції та декору для інтер'єрів. Верстати також чудово справляються з одно- та двошаровими пластиками, композитами, органічним склом, деревом, штучним каменем, кольоровими металами. Вони незамінні при виготовленні кліше для тиснення, табличок, невеликих форм для лиття, ювелірних виробів та обладнання для їхнього виробництва, а також моделей, прототипів і багатьох інших речей. На сучасному етапі ринок настільних верстатів з ЧПК рясніє різноманітними варіантами, здатними суттєво підвищити продуктивність.

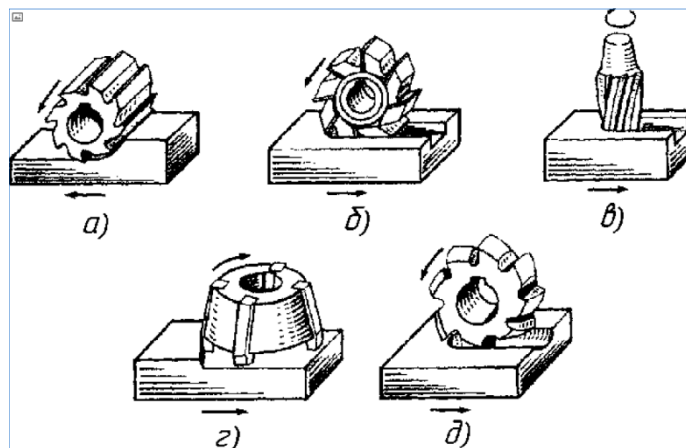
Даний проект присвячений розробці настільного гравіювально-фрезерного верстата і залишається актуальним у поточний період, знаходячи застосування в ремонті електроприладів із мікропроцесорним управлінням, як для невеликих приватних бізнесів, так і для навчальних цілей.

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ З ТЕМАТИКИ БАКАЛАВРСЬКОЇ РОБОТИ

## 1.1 Процес фрезерування

На фрезерних верстатах, застосовуючи фрези (рис. 1.1), обробляють як площини, так і фасонні поверхні. Це особливо актуально для важелів, планок, корпусних та інших деталей, котрі не є тілами обертання. Також виконують місцеві вирізи та зрізи, прорізають прямі й гвинтові канавки. У деяких випадках нарізають різьблення та зуби коліс. Обертання фрези – це основний рух, а відносне зміщення фрези та деталі – це рух подачі. Деталь закріплюється на столі, який майже завжди має прямокутну форму. Габарити робочої площини столу визначають основні розміри фрезерних верстатів: ширина від 100 до 5000 мм, довжина від 100 до 16000 мм та більше [1].



а - циліндрична; б - дискова; в - кінцева; г - торцева; д – фасонна

Рисунок 1.1 - Основні типи фрез

До режимів зрізання при фрезеруванні зараховуються (рис. 1.2):

- заглибина різання;
- швидкість різання;
- подача;
- ширини фрезерування.

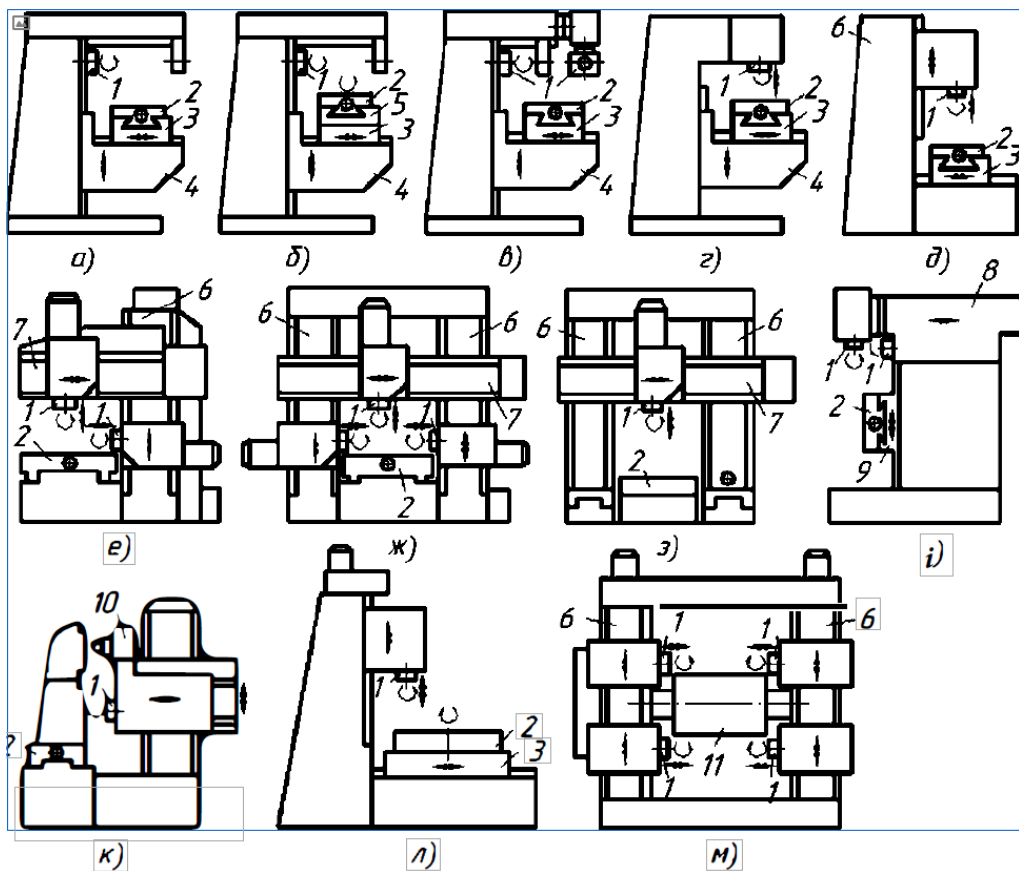
					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7



перевищує 6 мм, а також коли пред'являються підвищені вимоги до шорсткості поверхні, фрезерування використовують у два проходи: чорновий і чистовий.

Під час чистового оброблення глибина різання коливається в межах від 0,75 до 2 мм. Вnezалежності від висоти мікронервностей, глибина різання не може бути меншою за мінімально допустиму для конкретного ріжучого інструменту. Різальна кромка володіє певним радіусом заокруглення, який збільшується в процесі зносу інструменту. При незначній глибині різання, матеріал верхнього шару підминається і підлягає пластичній деформації. В такому випадку, різання фактично не відбувається. Зазвичай, при малих припусках на обробку та потребі у чистовій обробці (параметр шорсткості  $Ra = 2 \dots 0,4 \text{ мкм}$ ), глибина різання обирається близько 1 мм.

Фрезерні верстати поділяють на класи за конструктивними особливостями (кількість та розміщення шпинделів, організація рухів) або за функціональним призначенням (див. рис. 1.3).



## Рисунок 1.3 - Основні різновиди фрезерних верстатів та характерні ознаки

### 1.2 Обладнання для фрезерування

Для розв'язання окресленої проблеми існує нагальна потреба у дослідженні та аналізі конструктивних особливостей фрезерних верстатів.

Розглянуто фрезерувально-гравірувальний верстат Моделіст CNC-2535AL2 [2], призначений для здійснення операцій різання, свердління, гравіювання, фрезерування та 3D обробки різних матеріалів. Серед них: деревина, пластик, фанера (див. рис. 1.4). Робоча зона верстата дозволяє обробляти деталі з висотою до 75 мм. Верстат демонструє високу точність роботи, що забезпечується використанням кульково-гвинтових передач на всіх осях. Робоча площа верстата: 250x350x75 мм. Розміри столу - 300x400 мм. Максимально можлива висота заготовки: 75 мм.

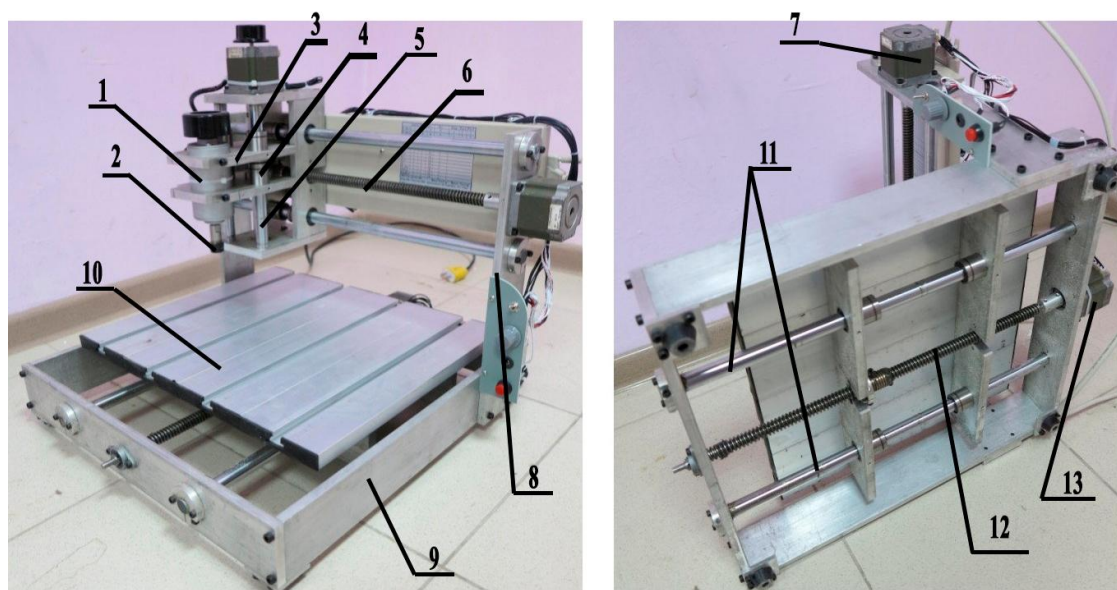


Рисунок 1.4 – Фрезерний верстат CNC-2535AL2

Цей верстат функціонує так: електродвигун 1 запускає фрезу, зафіксовану у патроні 2. Вертикальне переміщення фрези здійснюється гвинтовою передачею 3, яка розміщена у корпусі каретки 4, закріпленої на направляючих 5. Горизонтальне переміщення каретки забезпечується

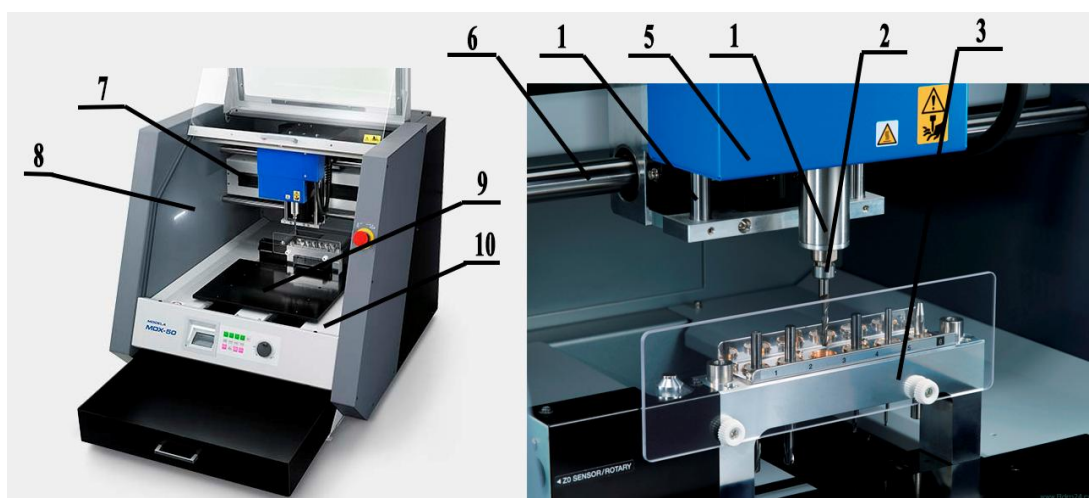
					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

гвинтовим механізмом 6, що приводиться в дію електродвигуном 7. Механізм поздовжніх та поперечних переміщень фрези встановлено на стійці 8, яка кріпиться до станини 9. Механізм робочого столу 10 розміщується на направляючих 11, що визначають його поздовжній рух. Робочий стіл 10 переміщається гвинтовою передачею 12, керованою електродвигуном 13.

Керування верстатом забезпечує програмне забезпечення, що підтримує коди у стандарті ISO 7bit (G-коди), що гарантує найвищу сумісність майже з усіма відомими CAM-системами (ArtCAM, RinoCAM, MasterCAM, PowerMill, SprutCAM). Передбачена опція встановлення четвертої поворотної осі для виготовлення балясин.

Розглянуто настільний верстат Roland modela MDX-50 з ЧПК, який забезпечує високоточне фрезерування та відзначається простотою у використанні [3]. ROLAND MODELA MDX-50 характеризується збільшеною продуктивністю, дозволяючи швидко обробляти великі області матеріалу. Roland modela MDX-50 (рис. 1.5) здатний працювати з деталями розміром 400 x 305 x 135 мм. Завдяки системі автоматичної заміни інструменту, виробничий процес не потребує перерв для зміни різального інструменту.

MDX-50 обладнано вмонтованою панеллю управління та віртуальною панеллю управління (VPanel). Завдяки VPanel взаємодія з MDX-50 є зручною, адже користувачі можуть оперативно змінювати параметри або швидкість обертання шпинделя безпосередньо під час роботи верстата.



					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Рисунок 1.5 - Фрезерний станок Roland modela MDX-50

Цей верстат функціонує у такий спосіб: електричний привід 1 активує фрезу, що зафіксована у патроні 2. Знизу, на робочому столі 11, розташований автоматичний замінювач інструменту 3. Вертикальне переміщення фрези забезпечує гвинтова передача 4, що розміщена у корпусі каретки 5, котра, своєю чергою, закріплена на напрямних 6. Горизонтальний рух каретки забезпечується гвинтовим механізмом 7, задіяним електродвигуном. Механізм поздовжніх і поперечних переміщень фрези монтується на стійці 8, яка, в свою чергу, фіксується до станини 9. Механізм робочого стола 10 встановлюється на напрямних 1, які забезпечують йому поздовжнє переміщення. Робочий стіл 10 приводиться в рух гвинтовою передачею, якою керує електродвигун.

Серійно виробляється фрезерно-гравірувальний верстат з ЧПК Suda SD-2616 (рис. 1.6). Цей верстат призначений для фрезерування, шліфування та свердління [4]. Його можливості поширюються на широкий спектр матеріалів.

Верстат здатен обробляти ПВХ, пластик, декоративний полістирол, акрилове скло, звичайне скло, деревину, фанеру, шкіру, гуму, папір, кераміку, камінь та вінілову плівку.

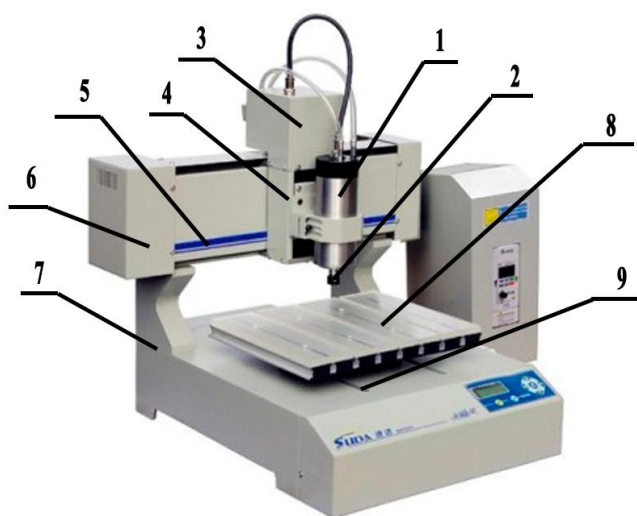


Рисунок 1.6 - Фрезерний станок Suda SD-2616

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Фрезерно-гравірувальний станок з ЧПК Suda SD-2616 демонструє високу ефективність та точність обробки. Він легко впорається з ділянками матеріалу, що мають габарити 260 x 160 x 40 мм. Використання потужного шпинделя на 800 Вт дозволяє досягати швидкості обертання до 200 обертів за секунду. Модель Suda SD-2616 додатково оснащена системою повітряного охолодження, що забезпечує стабільну роботу обладнання.

Цей верстат функціонує наступним чином: електричний привід 1 активує фрезу, що закріплена у патроні 2. Біля патрона 2 розташована система охолодження фрези 3. Вертикальний рух фрезі забезпечується гвинтовою передачею 4, яка вмонтована у корпус каретки, що, у свою чергу, змонтована на направляючих. Горизонтальний рух каретки забезпечує гвинтовий механізм 5, приводиться в дію електродвигуном 6. Механізм поздовжніх та поперечних переміщень фрези кріпиться до стійки 7, котра, в свою чергу, фіксується на станині 8. Механізм робочого столу 8 розміщується на направляючих 9, що визначають його повздовжній рух. Робочий стіл 8 рухається за допомогою гвинтової передачі, приводиться в дію електричним приводом.

Верстат управляється програмним забезпеченням TYPE3 3D, яке підтримує формати Coreldraw, CAD / CAM, Artcam, Casmate, Proe, UG, Artgrave та інші. Передача даних на верстат відбувається через USB-порт, використовуючи флеш-накопичувач.

Переваги конструкції портального типу: велика стійкість до деформацій під час обробки.

Недоліки фрезерного верстата з ЧПК портального типу: обмежена здатність обробки важких заготовок, оскільки деталь фіксується та рухається вздовж осі X, що створює додаткове навантаження через власну масу; розміри оброблюваної частини обмежені габаритами порталу.

Відомий гравірувально-фрезерний верстат SL01Б (рис. 1.7)

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

розроблений для виконання широкого спектру операцій: розкріювання, свердління, гравіювання, фрезерування та 3D обробки різноманітних матеріалів. Серед них - дерева різних порід, пластик, фанера, МДФ, ДСП, та навіть вапняк [5]. Забезпечує високу точність у 0,05 мм, що досягається застосуванням механізму кульково-гвинтових передач. Потужний шпиндель на 1500 Вт легко справляється з обробкою міцних та товстих матеріалів. Робоча зона верстата SL01Б становить 600x400x150 мм, що робить його оптимальним для обробки виробів невеликих і середніх габаритів.

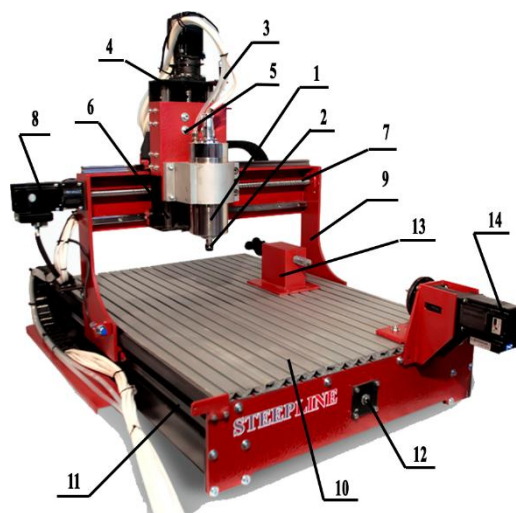


Рисунок 1.7 – Станок для гравірувально-фрезерних робіт SL01Б

Управління конфігурацією та параметрами фрезерного верстата реалізується безпосередньо з DSP контролера.

Робота верстата відбувається за наступним алгоритмом: електропривод 1 приводить у дію фрезу, зафіксовану у патроні 2. Поряд з патроном 2 розташована система охолодження фрези 3. Вертикальне переміщення фрези забезпечується гвинтовою передачею 4, що змонтована в корпусі каретки 5, котра, у свою чергу, встановлена на направляючих 6. Горизонтальне переміщення каретки забезпечує гвинтовий механізм 7 за допомогою електродвигуна 8. Механізм поздовжніх і поперечних переміщень фрези розміщений на стійці 9, що, у свою чергу, фіксується на станині 10. Механізм робочого стола 10 розташовується на направляючих 11, які дозволяють йому

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

рухатися вздовж. Робочий стіл 10 приводиться в дію гвинтовою передачею 12, що активується електроприводом. На станині знаходиться центрувальний механізм, який спільно з приводом здатен обертати невеликі об'єкти вагою до 0,6 кг для тривимірної обробки деталей складної форми.

Міні-фрезерний верстат Aman 4060 (рис. 1.8) з розміром робочої зони 400 x 600 мм [6] оснащений потужним шпинделем та повноцінними чотирма осями: XYZ + A – поворотний пристрій. Шпиндель має водяне охолодження, призначений для розкрою, 3D-фрезерування рельєфів, гравіювання, будь-яких видів різання та свердління.

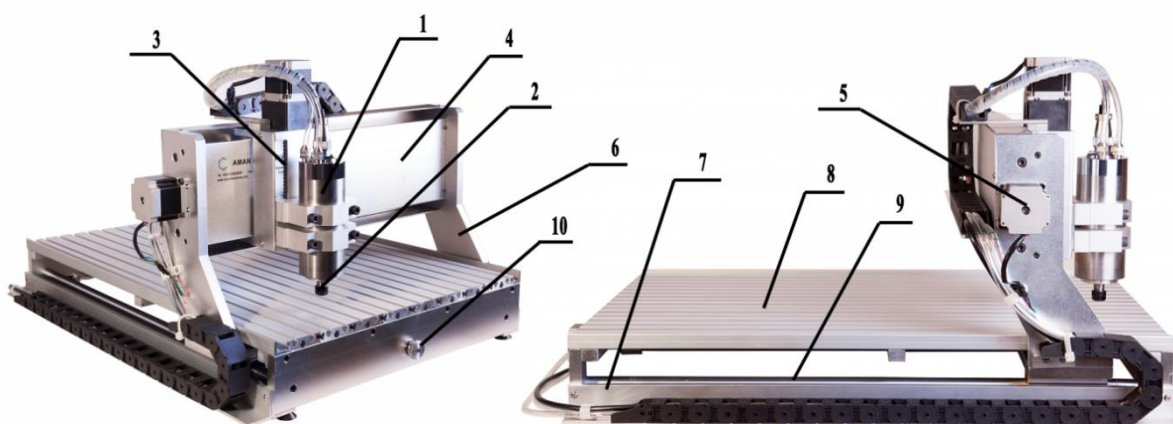


Рисунок 1.8 – Фрезерний верстат Aman 4060

3D фрезер Aman 4060 – це настільний фрезер та гравер із числовим програмним управлінням (ЧПУ), що базується на міцному алюмінієвому каркасі. AMAN 4060 ідеально підходить для обробки деревини, фанери, різноманітних пластиків, акрилу та інших матеріалів. Відмінна якість обробки досягається завдяки високоточному кроковому двигуну та можливості ручного керування шпинделем для точного налаштування. Фрезерний верстат AMAN 4060 – це 4-осьовий фрезер з робочою зоною розміром 600 x 400 x 130 мм. Компактний верстат спроектовано для механічної обробки виробів у форматах 2D та 3D.

3D фрезер AMAN 4060 здатний обробляти різноманітні матеріали для заготовок: деревину, пластик, фанеру, ДСП, а також легкі метали та інші

подібні.

Цей верстат оснащено хромованими валами, що майже не деформуються, завдяки чому модель 4060 є чудовим рішенням для тривалої експлуатації. Гнучка муфта в верстаті служить для пом'якшення вібрацій на кульково-гвинтовій передачі, які виникають під час обертання крокового двигуна. Високоточний кроковий двигун сприяє отриманню надзвичайно точного позиціонування різального інструменту, що забезпечується співвідношенням кута кроку та кроку різьби кульково-гвинтової передачі.

Він здатний працювати під ручним контролем або ж керуватися комп'ютерною системою. Керування через персональний комп'ютер реалізується завдяки спеціалізованому програмному забезпеченню, такому як MACH3, ARTCAM, TYPE 3, UCANCAM, KCAM та інші.

Цей верстат функціонує так: електричний привід 1 активує фрезу, закріплену у патроні 2. Вертикальний рух фрези забезпечується гвинтовою передачею 3, інтегрованою в корпус каретки, що закріплений на направляючих. Горизонтальне переміщення каретки забезпечує гвинтовий механізм 4, керований електродвигуном 5. Механізм для поздовжнього та поперечного руху фрези монтується на стійці 6, що кріпиться до станини 7. Механізм робочого столу 8 розташований на направляючих 9, що визначають його поздовжнє переміщення. Робочий стіл 8 приводиться в дію гвинтовою передачею 10, що живиться від електроприводу.

Переваги: легкість виготовлення; існує можливість обробляти заготовку будь-якої довжини вздовж осі Y.

Недоліки: вимагає використання міцної та жорсткої направляючої для осі X, адже саме на цю вісь припадуть значні навантаження під час обробки.

Відомо фрезерно-гравірувальний станок з ЧПК Hobby RK0404-01 (рис. 1.9) від виробника PureLogic. Специфікою цього фрезерного верстата з ЧПК є можливість переміщення як шпинделя, так і самої заготовки, враховуючи

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

розміри обладнання та тип обробки [7].

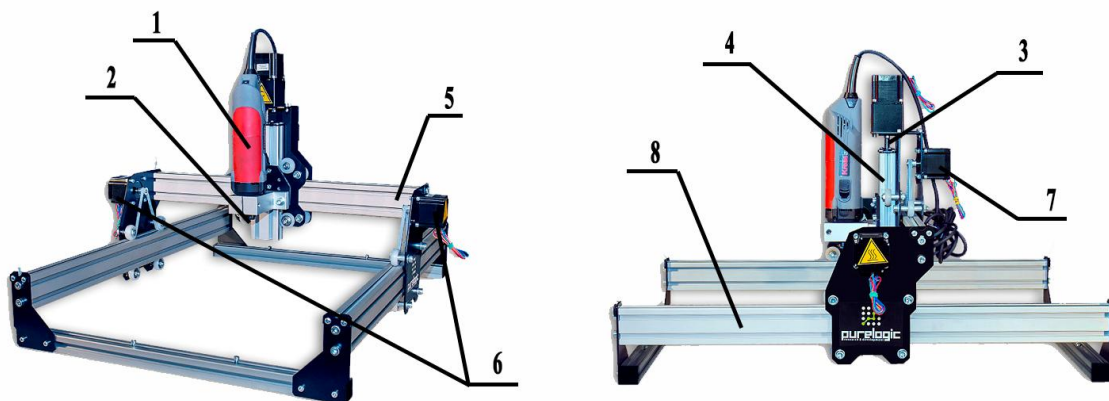


Рисунок 1.9 - Фрезерно-гравірувальний станок Hobby  
RK0404-01

Даний верстат функціонує так: електричний привід 1 запускає фрезу, котра фіксується у патроні 2. Вертикальне переміщення фрези забезпечується гвинтовою передачею 3, що встановлена у корпусі каретки 4, котра закріплена на направляючих. Горизонтальний рух каретки визначається гвинтовим механізмом 5 за допомогою електродвигуна 6. Механізм поздовжніх та поперечних переміщень фрези змонтовано на рамі та активується стосовно нижньої платформи 7, яка у свою чергу кріпиться до станини 8.

Фрезерувально-гравіювальний станок з ЧПУ Hobby RK0404-01 дає змогу оперативно обробляти значні площі матеріалу. Станок Hobby RK0202-01 використовує кроковий двигун PL57H56, що гарантує точність позиціонування 0,015 мм та максимальну швидкість переміщення 1200 мм/хв; діаметр посадкового місця шпинделя: 43 / 52 мм.

За допомогою верстату з ЧПУ Hobby RK0404-01 реалізуються проекти з виготовлення меблів, рекламних продуктів, та різних моделей.

Робоча зона фрезерно-гравірувального верстата з ЧПУ Hobby RK0404-01 становить 400 x 400 x 65 мм. Верстат Hobby RK0404-01 інтегрується з системою управління PureMotion, що включає в себе спеціалізований

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

контролер та оригінальне програмне забезпечення.

### 1.3 Демонтаж BGA мікросхем

Демонтаж BGA мікросхем можна умовно поділити на три основні методи:

1) Термоповітряний метод - це спосіб демонтажу, що використовує потік гарячого повітря, температура якого підібрана таким чином, щоб розплавити паяльні кульки, котрі утримують кристал на платі. Мінусом такого підходу є потенційна неконтрольованість температури в зоні робіт, що може негативно позначитися на багатошаровому текстоліті плати. Надмірне нагрівання може призвести до здуття матеріалу та пошкодження внутрішніх сполучних доріжок плати.

2) Інфрачервоний спосіб ґрунтується на використанні світлового променя в інфрачервоному спектрі як переносника теплової енергії. Завдяки чому сфокусований пучок інфрачервоного випромінювання можна точково спрямувати тепловий потік у потрібне місце на платі. У поєднанні з термодатчиками це забезпечує контрольоване нагрівання зони демонтажу мікросхеми. Як наслідок, гарантується якісний демонтаж, а згодом — монтаж необхідної мікросхеми.

3) Фізичний спосіб демонтування використовується тоді, коли інші методи, описані вище, не можуть бути застосовані. Щоб краще усвідомити необхідність фізичного демонтажу, проаналізуємо структуру BGA мікросхем (рис. 1.10). Якщо припойні кульки залиті компаундом, проведення демонтажу термоповітряним або інфрачервоним способом стає неможливим. Це обумовлено інертністю компаунду до температурних коливань, а також його клейовими та герметизуючими властивостями.

У подібних випадках вдаються до фізичного демонтажу, що передбачає фрезерування всієї BGA мікросхеми аж до плати, а точніше - до місця, де монтуватиметься нова мікросхема.

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

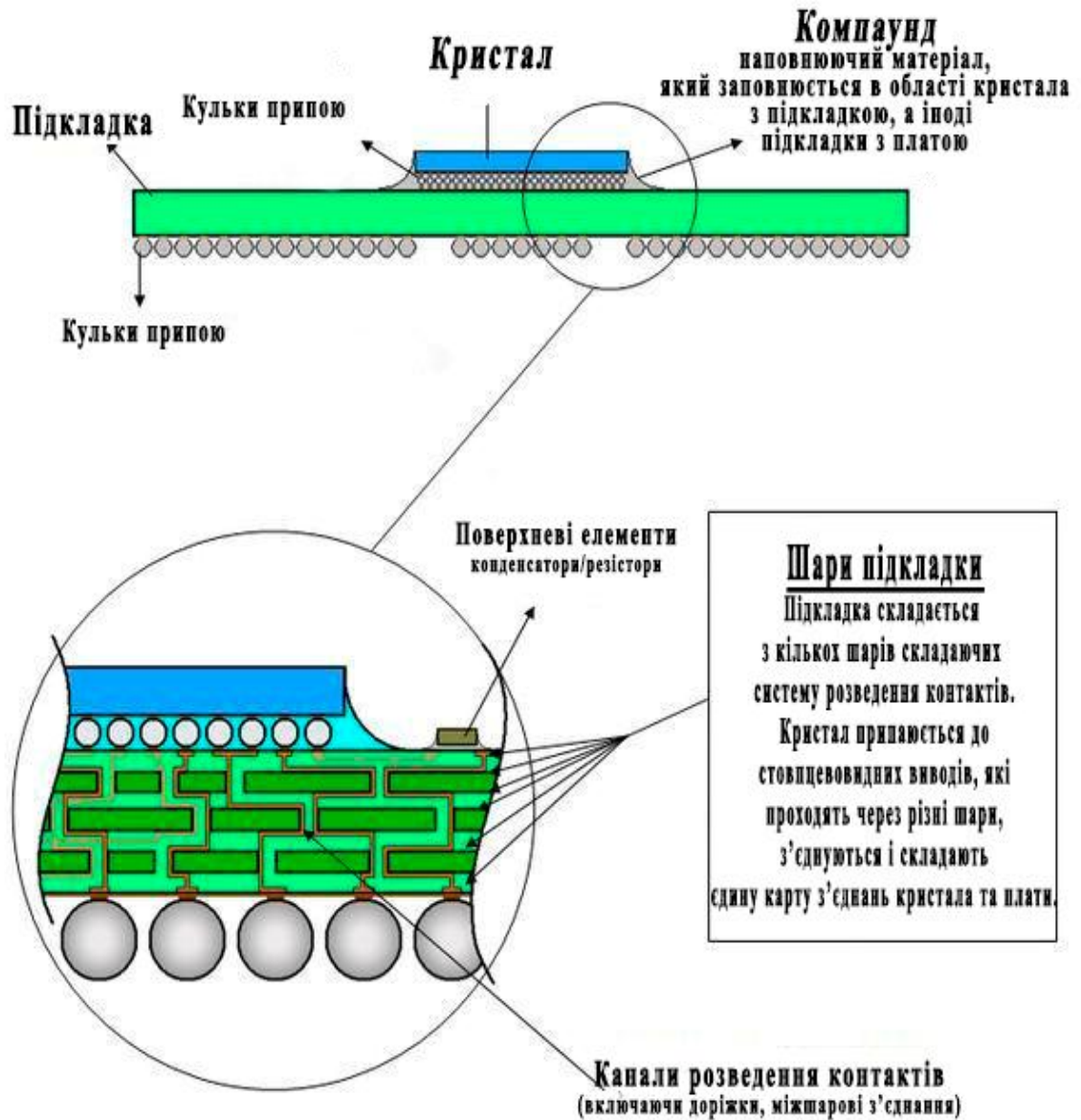


Рисунок 1.10 – Будова BGA мікросхем

Виробники плат, що містять BGA мікросхеми, дедалі активніше застосовують компаунд як невід'ємну частину мікросхеми. Це покращує монтаж, проте ускладнює заміну елемента. Отже, для якіснішого фізичного демонтажу виникає потреба у розробці трикоординатного верстата, призначеного саме для цієї мети.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БРМА 24.00.00.000 ПЗ

Арк.

19

## Висновки до першого розділу

1. З'ясовано, що в деяких випадках єдиний варіант зняття BGA мікросхем полягає у фізичному видаленні через механічну обробку.
2. Для демонтажу BGA мікросхем рекомендується застосовувати обладнання, що використовує процес вертикального фрезерування поверхні.
3. Зважаючи на потребу покращити ремонт техніки, де використовуються мікропроцесори, а також можливості їх зняття та подальшої установки, було прийнято рішення застосувати верстат з числовим програмним керуванням (ЧПК) для фрезерування тонких матеріалів. За основу обрано порталний тип верстата ЧПК, оскільки він відзначається простотою у виготовленні та дасть змогу виконати поставлену технічну задачу.

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ВЕРСТАТА

Гравіювально-фрезерні верстати, нині присутні у багатьох сферах промисловості, від виготовлення прикрас до виробництва ливарних форм та обладнання, є складним високотехнологічним обладнанням, керованим комп'ютером. Ці верстати відмінно підходять для роботи з одно- та двошаровими пластиками, композитними матеріалами, оргсклом, деревом, штучним каменем, кольоровими металами, створення кліше для тиснення, табличок, невеликих ливарних форм, ювелірних виробів та обладнання для їх виготовлення, моделей, прототипів та багато іншого.

Для переміщення шпинделя з різальним інструментом у гравіювально-фрезерних верстатах найчастіше застосовують крокові двигуни. Завдяки гвинтовій передачі, обертальний рух перетворюється на поступальний, що дозволяє досягти точності позиціонування до 0,001 мм.

Прилад, що проектується, повинен відповідати визначеним вимогам:

- точність позиціонування має сягати 0,2мм;
- робоча поверхня для фіксації деталі – розмірами 150x150мм;
- інтуїтивне та легке використання;
- нескладне технічне обслуговування.

### 2.1 Розробка кінематичної схеми верстата

Кінематика в верстатах з ЧПК, якщо розглядати її узагальнено, - це комплекс механічних складових: ланок, передач, механізмів та пристроїв. Вони взаємодіють між собою, їх призначення - забезпечувати широкий спектр функціоналу верстатів. Йдеться про регулювання, керування і злагоджене виконання усіх робочих переміщень верстата.

Для виконання певних операцій у верстатах використовуються різноманітні пристрої та механізми, котрі виконують як одну, так і декілька

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

функцій одночасно.

Кінематичну схему розроблюваного пристрою представлено на рис. 2.1.

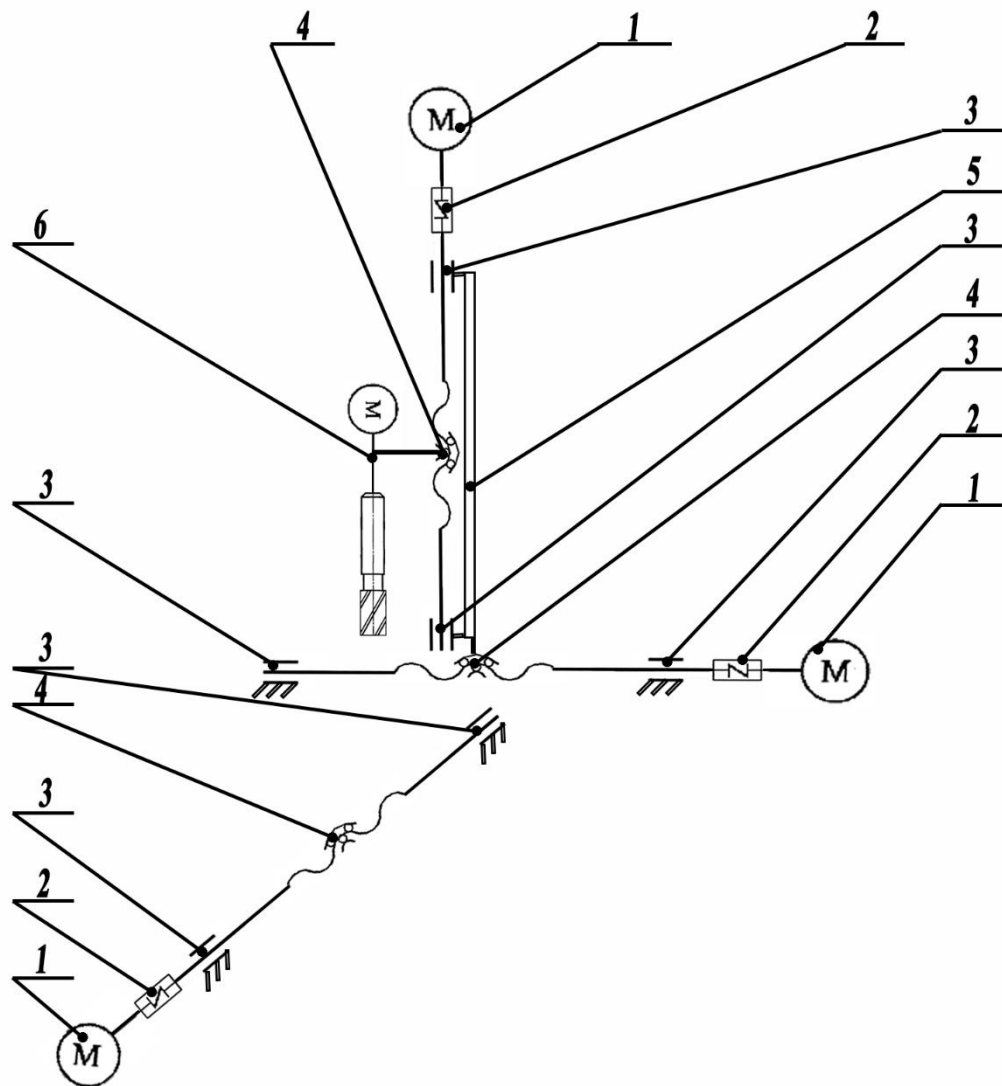


Рисунок 2.1 – Схема кінематична станка

У верстаті використано гвинтову передачу з гайкою кочення. Вона приводиться в рух завдяки кроковому двигуну, який з'єднаний з гвинтом гнучкою муфтою. Муфта в свою чергу гасить вібрації від обертів двигуна. Гвинт кріпиться за допомогою радіальних підшипників, що дозволить зменшити вібрації при обертах та шум від роботи верстата.

У конструкції верстата застосовано три гвинтові передачі, що

відповідають за одну з осей верстата: вертикальну, поздовжню та поперечну.

Гвинт поздовжнього переміщення зафіксовано на станині верстата й приводить в рух стіл, на якому буде закріплено об'єкт для обробки.

Гвинт поперечного переміщення змонтовано на станині верстата, а вже він приводить в рух механізм вертикального переміщення.

Вертикальний гвинт натомість рухає шпindel по вертикальній осі. Таке компонування гвинтів, у поєднанні з кроковими двигунами, забезпечує верстату три ступені свободи для позиціонування інструменту.

## 2.2 Розробка схеми електричної

Принцип функціонування систем ЧПК полягає у передачі контролером керуючого сигналу (електричних імпульсів визначеної тривалості) до виконавчих механізмів верстата, і одночасному контролі їхнього переміщення («зворотний зв'язок»). Це необхідно для реалізації руху різального інструменту, відповідно до запрограмованого алгоритму обробки.

Виконавчими елементами фрезерних верстатів виступають крокові двигуни, що приводять в рух портал для інструментів, разом із фрезою та низкою допоміжних систем.

При роботі з кроковими двигунами, "зворотний зв'язок" вже інтегровано в їхній дизайн. Двигун точно "знає", на скільки кроків повернеться ротор, коли на обмотки подається електричний струм. Для більш продуктивних верстатів використовуються серводвигуни, контроль переміщення яких забезпечується спеціальними датчиками позиції. Для втілення засад цифрового програмного забезпечення, система ЧПК мусить розуміти, в якому напрямку пересувати різальний інструмент, і відстежувати його поточне розташування. За перше відповідальна програма обробки, а за друге – датчики положення інструменту.

Отже, контролер ЧПК конче мусить містити такі складові:

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

- мікропроцесор – щоб перетворювати коди програми на керуючі імпульси, а ще й контролювати геть усі головні та проміжні процеси верстата;

- оперативну пам'ять – задля зберігання актуальної інформації в процесі обробки;

- постійну пам'ять – щоб зберігати файли керуючих програм, установок обладнання та іншу допоміжну інформацію;

- роз'єми для завантаження програм (приміром, через USB-інтерфейс).

Структурна електрична схема станка з ЧПК представлена на (рис. 2.2).

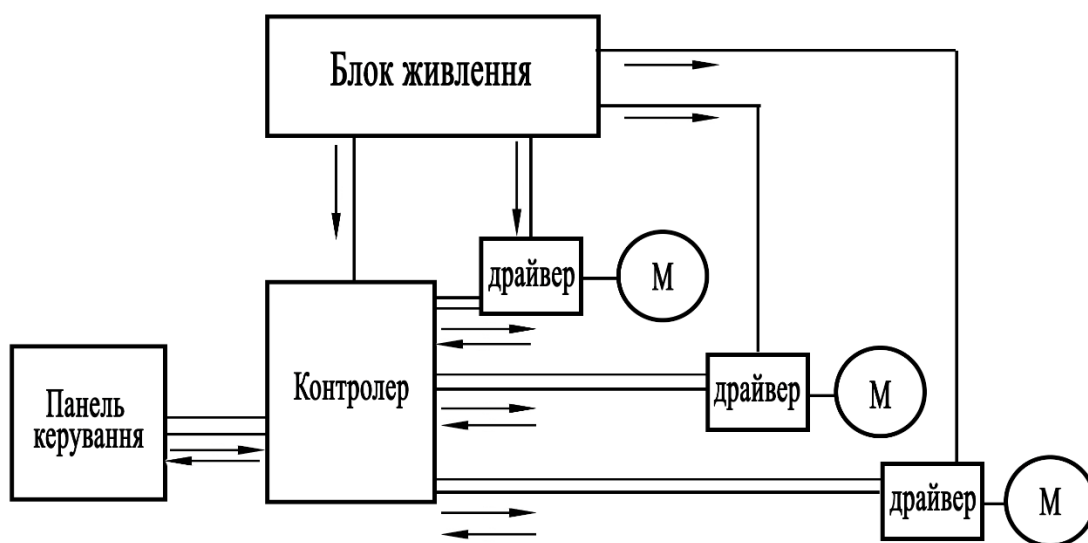


Рисунок 2.2 – Схема структурна електрична

Приводи верстата функціонують під впливом імпульсних сигналів, що генеруються контролером. Ці сигнали формуються на основі інформації, яку контролер отримує через кабель та USB-інтерфейс від панелі керування. Панель керування може бути реалізована як персональний комп'ютер, що має спеціальне програмне забезпечення. Це програмне забезпечення розроблене для полегшення та оптимізації процесу управління верстатом.

Контролер надсилає імпульси на драйвери крокових двигунів. Ці драйвери, зі свого боку, керують живленням фаз двигуна, досягаючи бажаного кроку. Існують різні підходи до управління кроковим двигуном:

- режим повного кроку без перекриття фаз;
- режим повного кроку з перекриттям фаз;
- режим напівкроку;
- режим мікрокроку.

Ті ж самі драйвери та контролер отримують живлення від блока живлення.

### 2.3 Розробка конструкції фрезерного станка

Під час проектування фрезерного верстата з ЧПК було прийнято рішення створити каркас із конструкційного алюмінієвого профілю, поєднавши його зі сталевими пластинами. Робоча зона матиме розміри 150x150 мм, що дозволить надійно фіксувати наші заготовки.

Механіка верстата з ЧПК, щойно спроектованого, включає 3 основні компоненти:

- 1) Система переміщення по осі X, яка сформована з таких складових:
  - напрямних рейок;
  - опорних підшипників (для фіксації ходового гвинта);
  - ходового гвинта;
  - муфти для з'єднання вала ходового гвинта з валом крокового двигуна (КД);
  - ходової гайки;
  - столу для закріплення заготовки.
- 2) Механізм пересування по осі Y, що включає в себе:
  - напрямні рейки;
  - опорні підшипники, призначені для фіксації ходового гвинта;
  - власне ходовий гвинт;
  - з'єднувальна муфта, яка з'єднує вал ходового гвинта з валом крокового двигуна;

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

- ходова гайка.

3) Механізм переміщення за віссю Z, що включає:

- направляючі;

- опорні підшипники, котрі фіксують ходовий гвинт;

- ходовий гвинт;

- з'єднувальна муфта для сполучення валу гвинта з валом крокових двигунів;

- ходова гайка;

- муфта для закріплення дремеля.

Раму зібрано з верстатного профілю.

Алюмінієвий верстатний профіль - елемент системи конструкційних профілів. Ці алюмінієві профілі знайшли широке застосування у виробництві верстатів та різноманітних виробничих ліній, використовуються як основа каркасних конструкцій.

Алюмінієві верстатні профілі піддаються анодуванню для утворення захисного шару, що протидіє корозії, та надання їм привабливого, декоративного вигляду. Переважно ці алюмінієві профілі виробляються з алюмінієвого сплаву АД31 Т1, з урахуванням технічних вимог, зазначених у ДСТУ Б В.2.6.-3-95 [11].

Верстатний профіль (несучий профіль, конструкційний профіль) має наступні параметри:

- верстатний профіль алюмінієвий 60x60 мм;

- артикул СТ60x60;

- сплав АД31 Т5 (ГОСТ 4784-97);

- покриття - Ан.Окс.15;

- термообробка – Т5;

- вага 1 м.п. – 2 кг.

Геометричні параметри алюмінієвого профілю для верстатів подано на (рис.2.3).

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

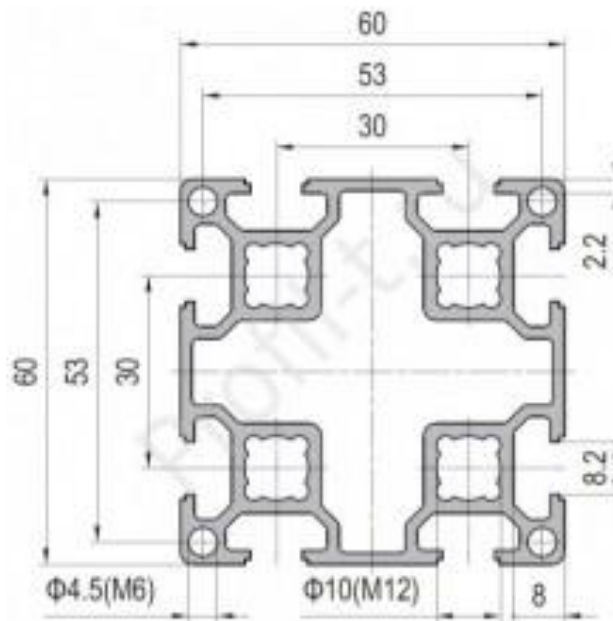


Рисунок 2.3 – Геометричні розміри алюмінієвого верстатного профілю

Стіл верстата змонтовано з алюмінієвого профілю СТ80х20.

Верстатний профіль (несучий, конструкційний) характеризується такими параметрами:

- верстатний профіль алюмінієвий 80х20 мм;
- артикул СТ80х20;
- сплав АД31 Т5;
- покриття - Ан.Окс.15;
- термообробка – Т5;
- вага 1 м.п. - 0.77 кг.

Геометричні параметри алюмінієвого профілю для верстата показано на (рис. 2.4).

Механіка пересування по одній з координат верстата базується на таких стандартизованих складових:

- гвинт SBN-1605-5;
- кінцева опора гвинта BF12;
- кінцева опора гвинта BK12;
- гнучка муфта 6,35х10;

					<b>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

- гайка SFU 1605-C7;
- кроковий двигун Nema23 57HS8430B4.

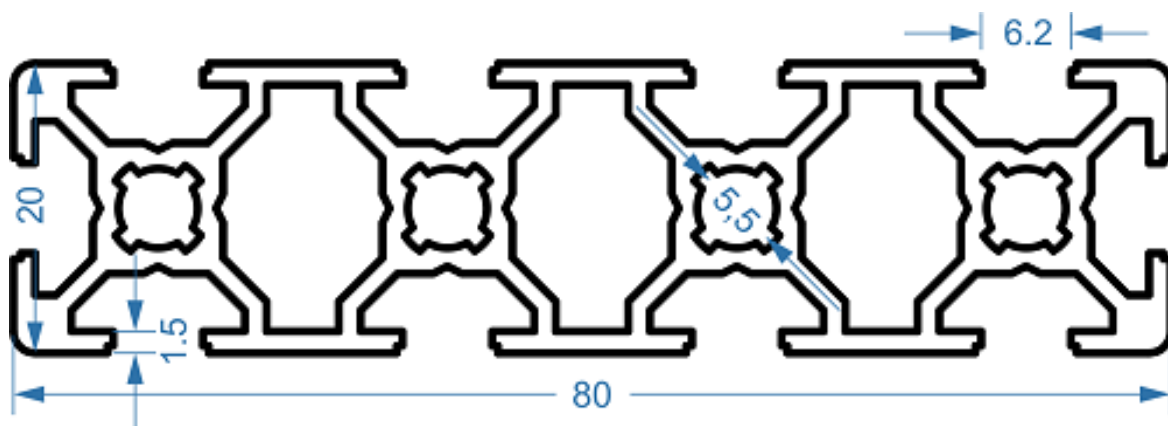


Рисунок 2.4 - Геометричні розміри алюмінієвого верстатного профілю

Кінцеві опори було обрано відповідно до рекомендацій виробника гвинта щодо його монтажу. Гнучка муфта виконує роль сполучної ланки між кроковим двигуном та гвинтом. Її застосовують для компенсації перекосів та осьових зміщень, що забезпечує плавність обертання, запобігаючи пропускам кроків. Гнучка муфта спроможна передавати значні обертальні моменти без будь-якого люфту. Підбір здійснено з урахуванням посадкових місць гвинта та двигуна. Гайка SFU 1605-C7 сумісна з гвинтом SBN-1605-5 згідно стандарту.

Загальний вигляд усіх деталей у зборі показано на рисунку 2.5.

Напрямні верстата реалізуються з наступних складників:

- вал, що спирається на опору SBR16;
- підшипник лінійний відкритого типу в корпусі SBR16UU.

Лінійний підшипник обирався відповідно до габаритів опорного валу. Ці підшипники, розміщені в анодованих алюмінієвих корпусах, виготовлені з легких алюмінієвих сплавів. Вони гарантують просте встановлення підшипника та надійну, високоточну фіксацію до рухомої частини – столу або порталу фрезера. Корпус оснащено чотирма монтажними різьбовими отворами.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БРМА 24.00.00.000 ПЗ

Арк.

28

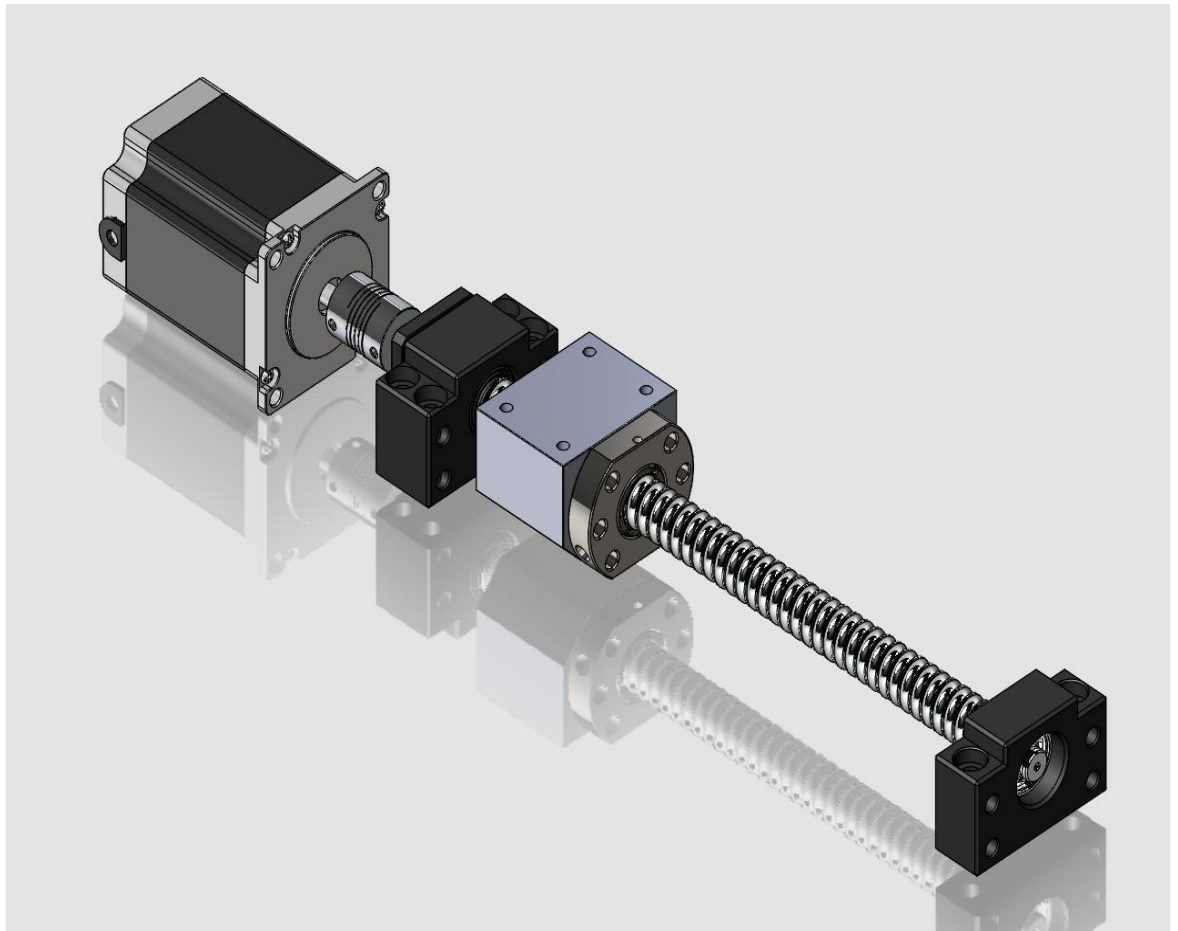


Рисунок 2.5 – Механізм переміщення однієї із координат

Загальний вигляд показано на рисунку 2.6.



Рисунок 2.6 – Направляюча верстата

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Загальний вигляд верстата, змодельованого у програмному забезпеченні Solidworks 2023 (рис. 2.7).

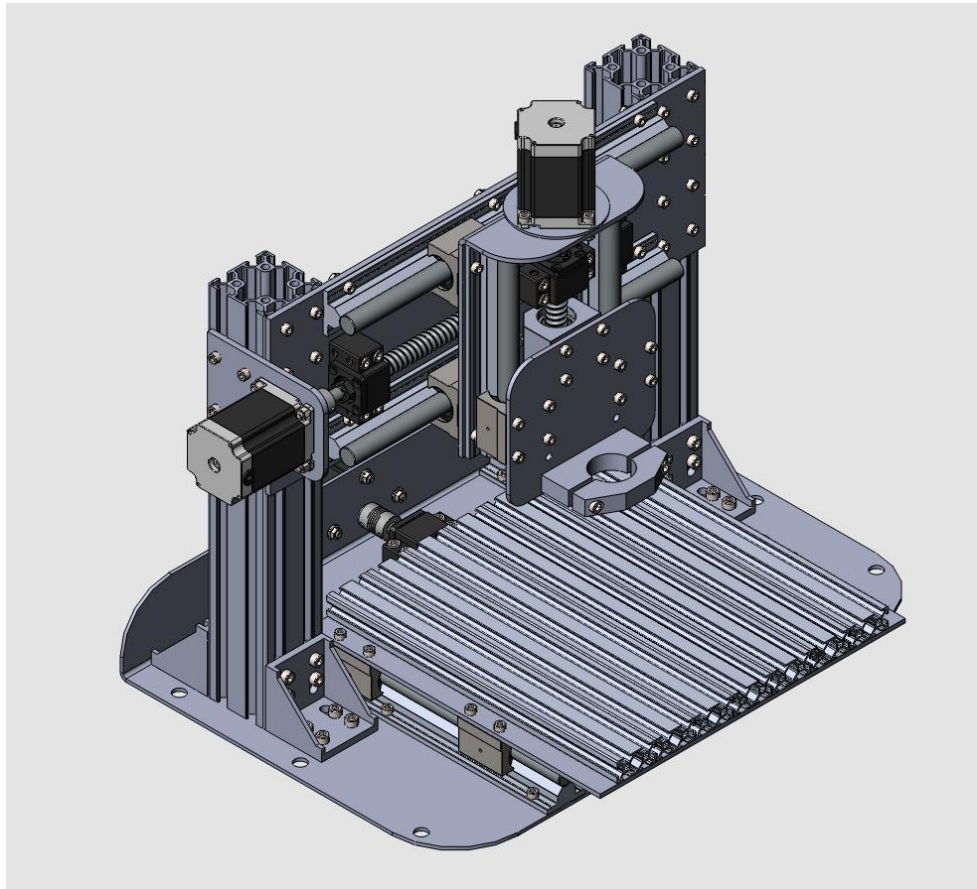


Рисунок 2.7 – Верстат для фрезерування

#### 2.4 Розробка керуючої частини фрезерного станка

Для організації керування фрезерним верстатом, потрібне інтегрування певних електричних компонентів в його структуру. Зокрема:

- драйвер крокового двигуна;
- контролер;
- аварійна кнопка вимкнення;
- блок живлення;
- крокові двигуни.

Ці складові відіграють центральну роль у створенні системи управління верстатом. Драйвер крокового двигуна з'єднано з контролером, котрий

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

генерує потрібні імпульси. Через ці імпульси драйвер передає необхідну напругу на обмотки двигуна. Від того, на які обмотки подається напруга, залежить, який саме крок здійснить двигун. В результаті зв'язку кроку двигуна та гвинта забезпечується точне позиціонування різального інструменту.

Блок живлення конче потрібен для забезпечення живленням усіх електричних компонентів. Він повинен функціонувати безперервно, протягом усього часу роботи верстата, та стабільно видавати напругу на виході. Від його надійності безпосередньо залежить стабільність функціонування верстата.

Кнопка аварійного вимкнення передбачена для екстреного припинення роботи верстата у разі пошкодження фрези або виникнення інших технічних проблем.

Контролер відіграє центральну роль у фрезеруванні, адже в нього буде закладено програму. Ця програма управлятиме режимами різання, зокрема швидкістю подачі інструменту та точністю позиціонування. Контролер повинен передбачати можливість перепрограмування у разі оновлення керуючої програми та переналаштування при зміні оброблюваної деталі.

Крокові двигуни виступають одним з найважливіших компонентів конструкції, оскільки вони реалізують перетворення електричної енергії на кінематичну енергію руху.

#### 2.4.1 Драйвер крокового двигуна

Використовуючи двигун NEMA23 57HS8430B4, треба підібрати драйвер, що зможе ним управляти. Для цього драйвер має відповідати таким вимогам:

- підтримка режимів напівкрокового та мікрокрокового керування двигуном;
- можливість підключення біполярного двигуна;

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

- забезпечення струму в 3А (відповідно до технічних специфікацій двигуна).

Для управління кроковими двигунами та можливості зміни режиму мікрокроку двигуна, що покращить точність позиціонування фрези, було обрано драйвер BL-TB6600-V1.2. Серед основних переваг цього драйвера варто виділити інтелектуальне керування струмом та застосування широтно-імпульсної модуляції.

З'єднання драйвера з платою комутації або, простіше кажучи, контролером, реалізується двома шляхами, що визначаються схемою та налаштуваннями портів контролера (див. рис. 2.8).

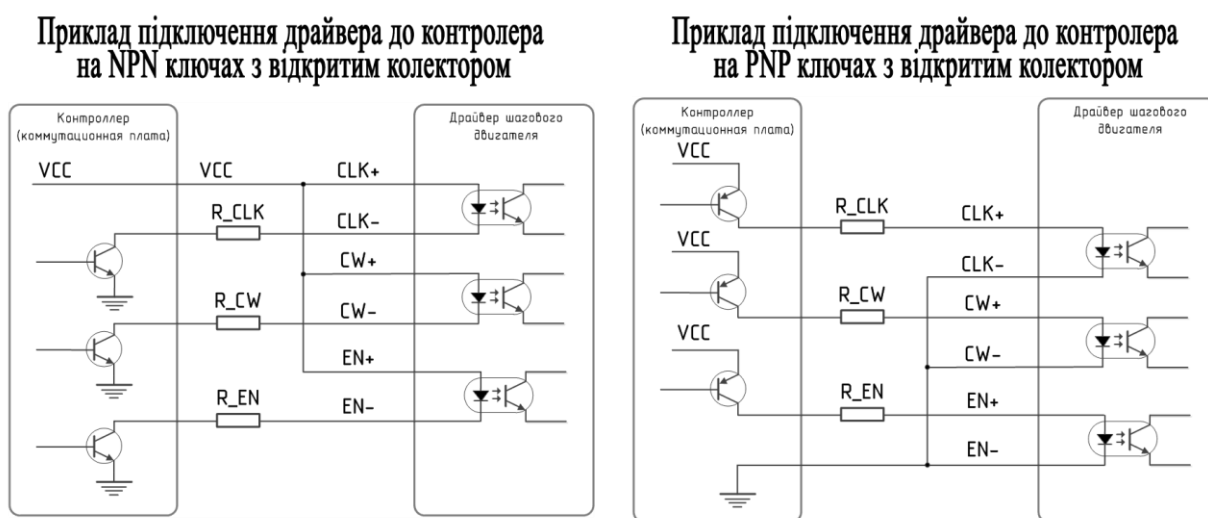


Рисунок 2.8 – Схеми підключення

Драйвер, (див. рис. 2.9) обладнано вбудованим захистом від перегріву, падіння напруги та струмового перевантаження. Завдяки цьому, пристрій чудово підходить для управління біполярними й уніполярними кроковими двигунами, що працюють зі струмом до 4,5А. Регулювання робочого струму відбувається за допомогою регулятора Current regulation potentiometer. Він дозволяє обрати силу струму в межах від 0,5 до 4,5А.

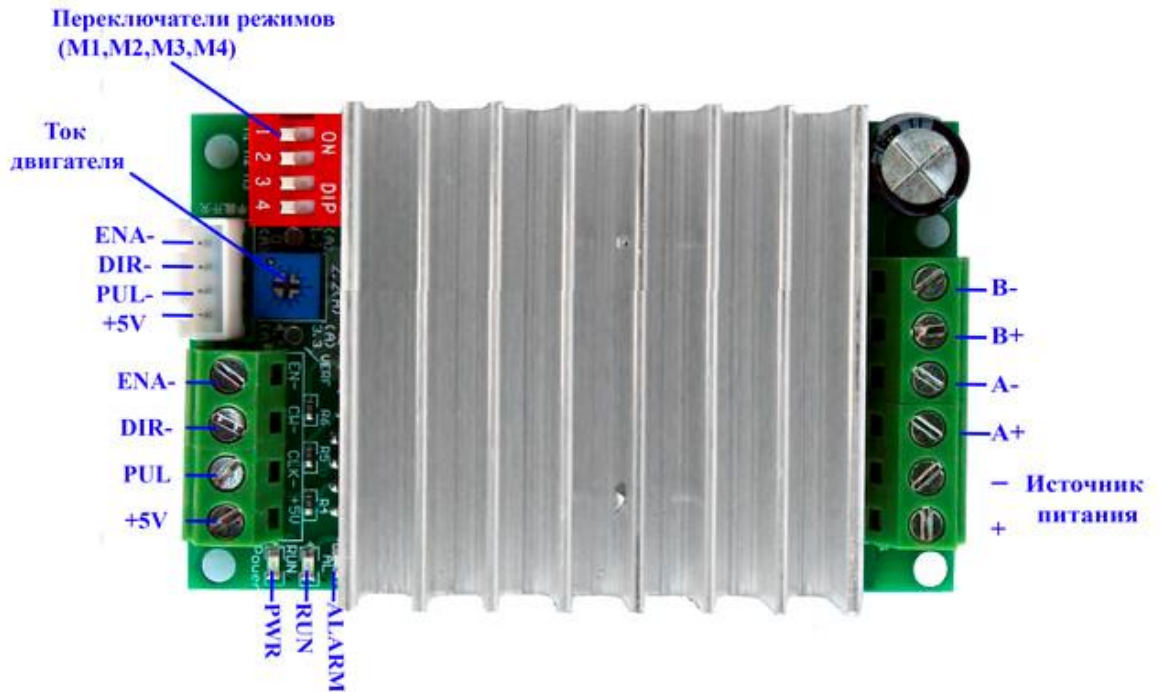


Рисунок 2.9 – Входи та виходи драйвера

Цей драйвер дозволяє змінювати величину струму в фазах, коригуючи їх значення так, щоб положення фіксації ротора на крок співпадало з точкою між полюсами. Залежно від співвідношення значень струмів у фазах, що активуються одночасно, кількість таких кроків може бути різною.

Регулюючи співвідношення струмів та налаштовуючи кількість робочих співвідношень, досягають мікрокроків, що забезпечує надзвичайно точне позиціонування ротора.

Регулювання мікрокроків двигуна (рис. 2.10)

	M1	M2	M3
1 Step	OFF	OFF	ON
1/2 Step	OFF	ON	OFF
1/4 Step	ON	OFF	OFF
1/8 Step	ON	OFF	ON
1/16 Step	ON	ON	OFF

Рисунок 2.10 – Вибір мікро кроків двигуна

Оскільки кроковий двигун виконує 200 кроків на один повний оберт, то у взаємодії з підібраним вище механізмом позиціонування точність визначатиметься відношенням кроку гвинта до кількості його кроків.

У випадку налаштування драйвера на режим мікрокроку 1/8, досяжна точність позиціонування буде: . Це перевищує початкову вимогу, зазначену у технічному завданні.

#### 2.4.2 Контролер

Контролер зобов'язаний відповідати зазначеним характеристикам, щоб забезпечити продуктивну роботу верстата:

- сумісність з різноманітним програмним забезпеченням для керування кроковими двигунами, яке функціонує на ПК;
- наявність опцій для розширення його функціональних можливостей;
- робоча тактова частота повинна перевищувати 267 Гц;
- гарантія високої точності обробки сигналів для забезпечення стабільної роботи.
- легке встановлення драйверів для крокового двигуна;
- окреме налаштування робочого та стартового струму крокових двигунів;
- під'єднання датчиків кінцевого положення;
- попередня обробка сигналу (багатократне повторення, одиничний сигнал);
- невисока вартість.

З усього розмаїття контролерів, присутніх на ринку, було відібрано Arduino Uno, збудований на мікроконтролері ATmega328. Цей контролер вміщує всі потрібні складники для функціонування мікроконтролера, а також дає змогу генерувати імпульси із заданою частотою для управління двигунами верстата. Достатньо під'єднати USB-кабель до комп'ютера та

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

забезпечити живлення. Мікроконтролер розміщено у гнізді, що полегшує його заміну у разі поломки. Схема контролера Arduino Uno (рис. 2.11)

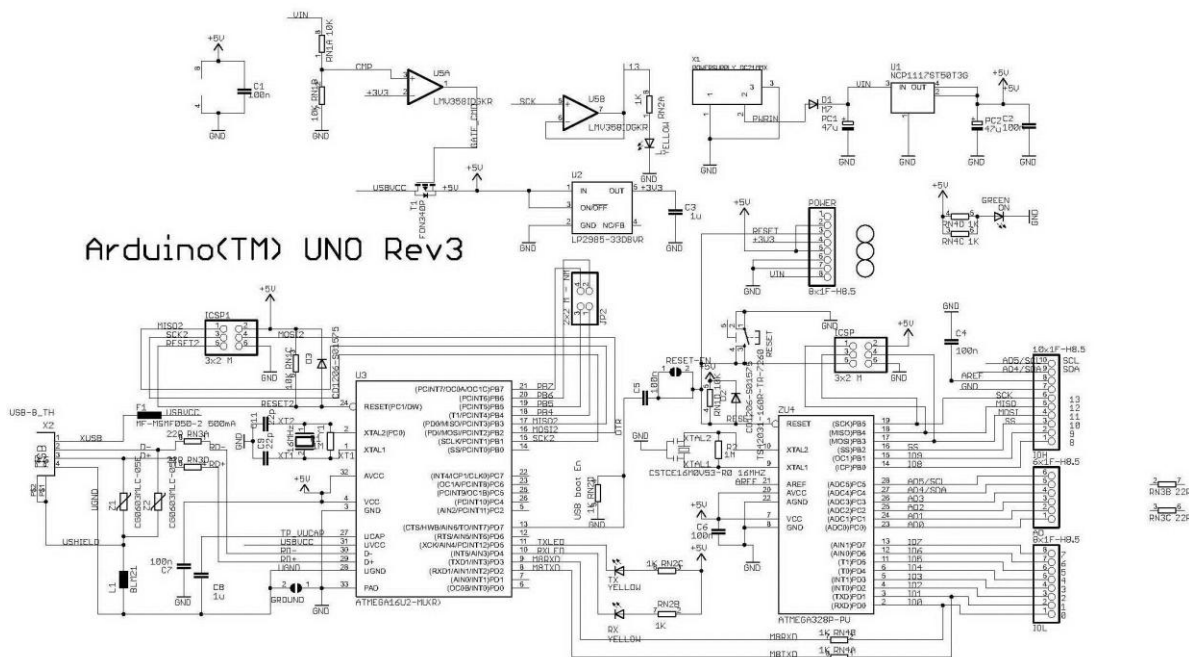


Рисунок 2.11 – Схема Arduino Uno

Модуль Arduino UNO надає можливості для взаємодії з комп'ютером, іншою платою UNO або ж іншими мікроконтролерами. З цією метою на платі вбудований інтерфейс UART, що працює з логічними рівнями TTL (5 В), і з'єднаний з контактами 0 (RX) та 1 (TX). Мікросхема ATmega16U2, розміщена на платі, відповідає за сполучення інтерфейсу UART з USB-портом комп'ютера. Після підключення до комп'ютера, створюється віртуальний COM-порт, через який комп'ютерні програми взаємодіють з Arduino. Мікроконтролер ATmega328 додатково підтримує комунікаційні протоколи I2C (TWI) та SPI.

### 2.4.3 Блок живлення

Для того, щоб електрична частина верстата почала функціонувати, потрібно забезпечити її струмом та напругою, потрібними для роботи. Отже, необхідно вибрати блок живлення, який задовольняє такі вимоги:

						Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА 24.00.00.000 ПЗ	

- вихідний струм 10А (враховуючи, що три крокові двигуни споживатимуть 9А);
- вихідна напруга 30-36V (відповідно до необхідної напруги для безперебійної роботи драйверів);
- коефіцієнт корисної дії щонайменше 0,95% (для забезпечення стабільної роботи електричної системи верстата);
- імпульсний блок живлення.

Зважаючи на вказані раніше вимоги, було обрано імпульсний блок живлення Somrom на 36В/10А, вироблений у Китаї (див. рис. 2.12).

Вузли цього блоку живлення розподілені таким чином:

- червоний колір визначає: вхідний фільтр живлення, діодний міст та силовий вузол;
- червоно-фіолетовий (розташований знизу, зліва) відповідає за вузол, що керує потужними транзисторами інвертора;
- зелений колір вказує на: мікросхему – ШІМ контролер та всі її допоміжні елементи;
- синій колір охоплює: вихідний випрямляч, дросель і фільтрувальний конденсатор;
- блакитний колір представляє собою: ланцюг, що контролює вихідний струм;
- фіолетовий колір показує: вузол, що відповідає за контроль вихідної напруги;
- жовто-рудий колір відносить до: вузла, що блокує перетворювач у випадку падіння напруги на виході.

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						36
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

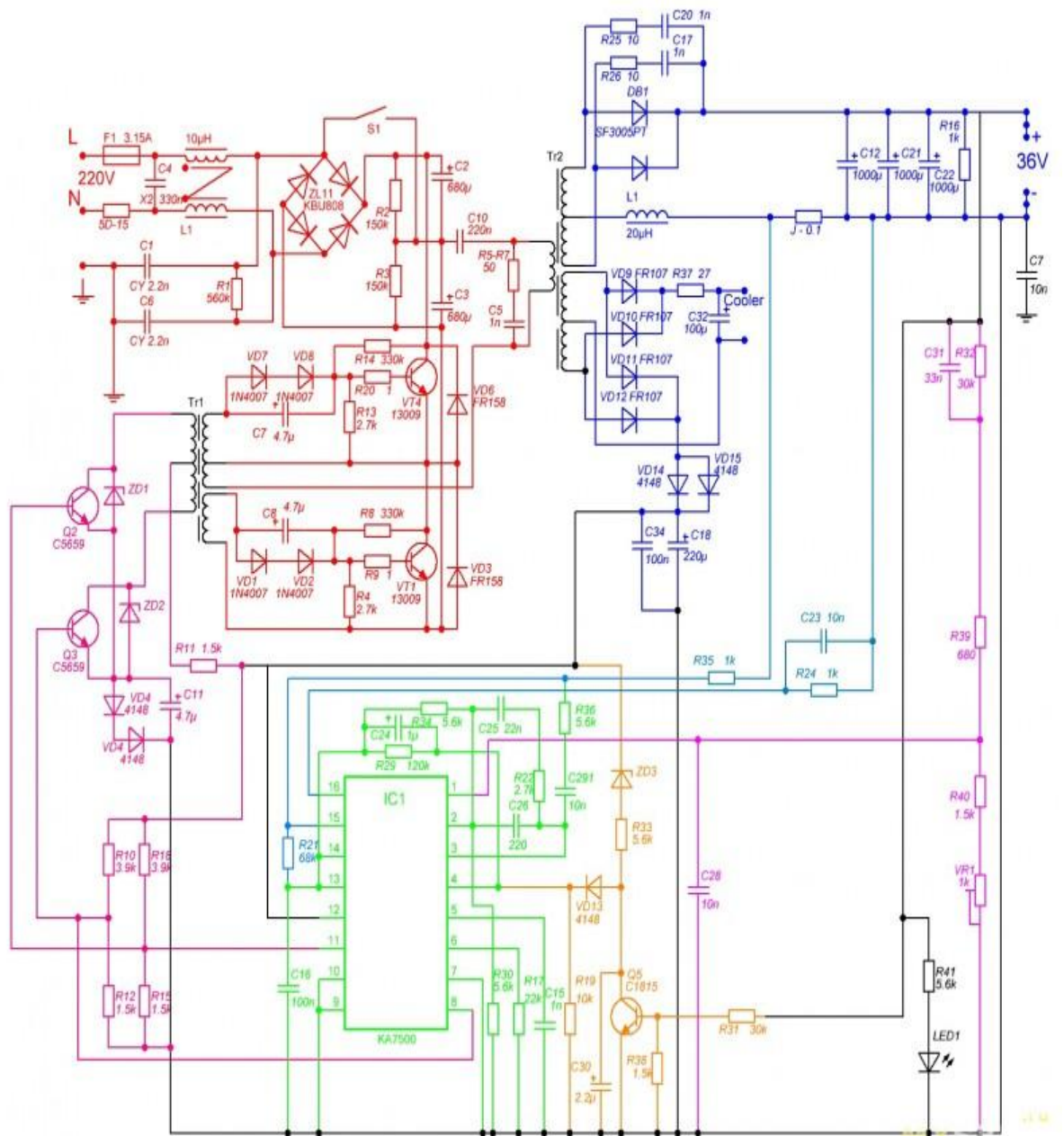


Рисунок 2.12 – Схема імпульсного блока живлення Soprnot

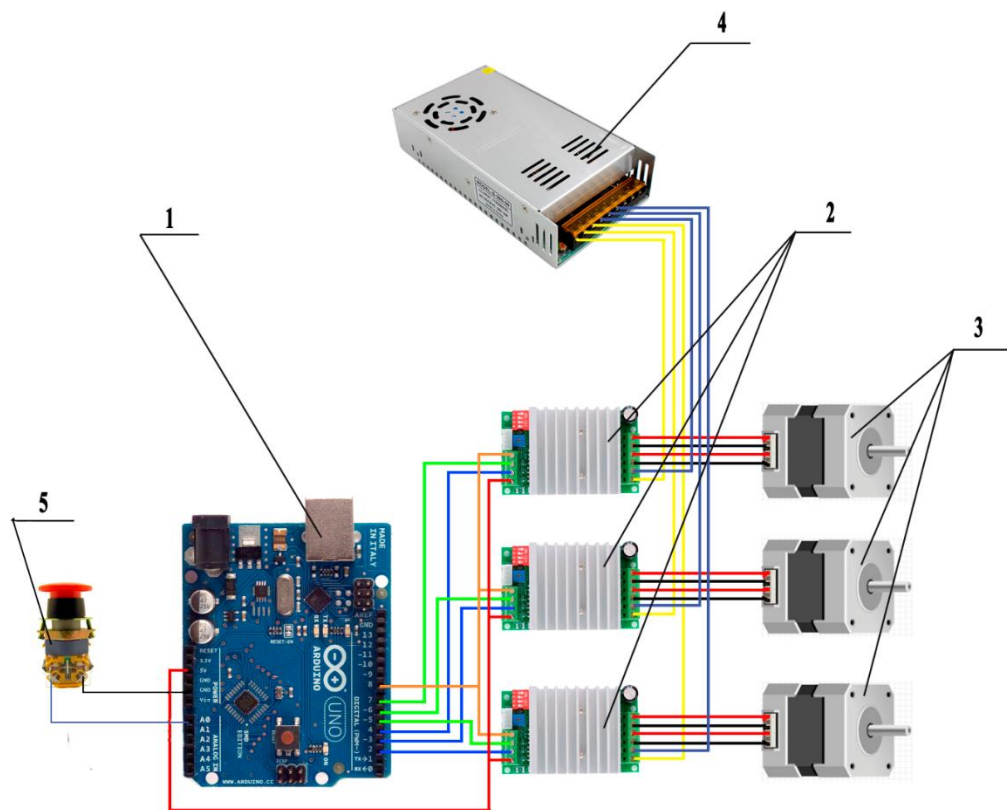
Однією з підвалин для використання імпульсного блока живлення в верстаті є менше виділення тепла, зумовлене використанням широтно-імпульсної модуляції. Додатково, це покращує ККД і зменшує споживання струму.

Інша причина полягає у випрямленні мережевої змінної напруги вхідним випрямлячем з конденсаторним фільтром. Після цього постійна

напруга з невеликими пульсаціями перетворюється потужним ключовим транзистором на високочастотну змінну напругу прямокутної форми, яка трансформується до потрібних величин, випрямляється та фільтрується.

#### 2.4.5 Схема підключення

Використовуючи вище наведені модулі для електричної частини, підключення всіх елементів разом з кроковими двигунами виглядатиме наступним чином (рис.2.13)



1 - Arduino Uno; 2 - BL-TB6600-V1.2; 3 - Nema 23HS8430; 4 - Sompron 36V/10A; 5 – Кнопка аварійного вимкнення

Рисунок 2.13 – Схема підключення

На представленій схемі керування застосовано як контролер плату Arduino UNO. Для управління кроковими двигунами NEMA23, моделі 57HS8430B4, використовуються драйвери BL-TB6600-V1.2. Аварійне

відключення забезпечується кнопкою, приєднаною до контактів A0 та Gnd. Живлення схеми здійснюється від імпульсного блоку Somprom, який видає 36В з силою струму 10А.

Кожна вісь має сигнали керування Step, Dir, Enable. Для вісі X сигнал Step(2), Dir(5), Enable(8). Вісь Y – Step(3), Dir(6), Enable(8). Вісь Z – Step(4), Dir(7), Enable(8).

#### Висновки до другого розділу

1. Згідно з технічним завданням, було створено принципову кінематичну схему верстата. Його основна функція – розбирання компонентів мікропроцесорних систем, що використовуються в управлінні електроприладами для домашнього вжитку.

2. Створено структурну електричну схему для розроблюваного обладнання. Вона визначає взаємодію електричних компонентів.

3. Проведено попередній відбір виконавчих механізмів та систем для верстата. Це дозволить обрати оптимальні рішення для його функціонування.

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3 РОЗРАХУНКИ ТА ПІДБІР ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ СТАНКА

#### 3.1 Підбір ріжучого інструменту

Вихідні дані для розрахунку режимів різання такі:

- матеріал заготовки – алюміній, мідь, кремній;
- межі міцності матеріалу заготовки,  $\sigma_B = 115 \text{ МПа}$  [14];
- потрібна шорсткість оброблюваної поверхні,  $R_a = 0,8 \text{ мкм}$ ;
- глибина різання,  $h = 1 \text{ мм}$ ;
- ширина фрезерування за один прохід,  $B = 2 \text{ мм}$ .

Зважаючи на глибину зрізу та необхідну шорсткість поверхні, було обрано торцеву фрезу.

Діаметр фрези:

$$D = 1,5 \cdot B, \quad (3.1)$$

$$D = 1,5 \cdot 2 = 3 \text{ мм.}$$

Обрано фрезу: діаметр фрези,  $D=3 \text{ мм}$ ; кількість зубів,  $z=3$ .

##### 3.1.1 Розрахунок швидкостей різання та подачі

$$v = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot h^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot z^p} \cdot K_v \quad (3.2)$$

де  $C_v$  – коефіцієнт, який характеризує матеріал заготовки,  $C_v = 245$ ;  $T$  – стійкість фрез,  $T=16 \text{ хв}$ ;  $q, m, x$  – показники степенів:  $q=0,25$ ;  $m=0,2$ ;  $x=0,1$ ;  $y=0,2$ ;  $u=0,15$ ;  $p=0,1$ ;  $K_v$  – загальний поправочний коефіцієнт.

					<b>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</b>	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$K_v = K_\mu \cdot K_{nv} \cdot K_{uv} \cdot K_{\varphi v}, \quad (3.3)$$

де  $K_v$  – коефіцієнт, що враховує фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу,  $K_v = 0,938$ ;  $K_{nv}$  – коефіцієнт, що враховує стан поверхневого шару,  $K_{nv} = 1$ ;  $K_{uv}$  – коефіцієнт, що враховує інструментальний матеріал,  $K_{uv} = 1$ ;  $K_{\varphi v}$  – коефіцієнт, що враховує величину  $\varphi$ ,  $K_{\varphi v} = 1$ .

$$K_v = 0,938 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 0,938,$$

$$v = \frac{245 \cdot 3^{0,25}}{16^{0,2} \cdot 1^{0,1} \cdot 0,005^{0,2} \cdot 2^{0,15} \cdot 3^{0,1}} \cdot 0,938 = 156 \frac{\text{мм}}{\text{хв}}.$$

Подача під час фінішної обробки для фрези на зуб має становити  $S_z = 0,005 - 0,01 \text{ мм / зуб}$ .

Взявши до уваги менше значення, величина подачі фрези за один оберт буде такою:

$$S_0 = S_{z1} \cdot z, \quad (3.4)$$

$$S_0 = 0,005 \cdot 3 = 0,015 \text{ мм / об.}$$

Частота обертів фрези:

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D}. \quad (3.5)$$

$$n = \frac{1000 \cdot 156}{\pi \cdot 3} = 16552 \frac{\text{об}}{\text{хв}}.$$

					<b>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Хвилинна подача  $Fm$  (мм/хв) – це значення відносного переміщення фрези або столу з деталлю за хвилину часу. Хвилинна подача розраховується як результат множення подачі на один оберт та частоту обертання фрези:

$$Fm = S_0 \cdot n, \quad (3.6)$$

$$Fm = 0,015 \cdot 16552 = 248 \text{ мм/хв.}$$

### 3.1.2 Визначення сили різання, крутного моменту та потужності

Основна складова потужності різання, при фрезеруванні:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S^y \cdot B^u \cdot z}{D^q \cdot h^w} \cdot K_p, \quad (3.7)$$

де  $C_p$  – коефіцієнт характеризуючий оброблюваний матеріал,  $C_p = 50$  [8, таблиця 16, стр.50];

$K_p$  – загальний поправочний коефіцієнт.

$$K_p = K_{\mu p} \cdot K_{vp} \cdot K_{\gamma p} \cdot K_{\phi p}, \quad (3.8)$$

де  $K_{\mu p}$  – коефіцієнт, який враховує властивості матеріалу, що оброблюється,  $K_{\mu p} = 1,02$ ;  $K_{vp}$  – коефіцієнт, який враховує швидкість різання,  $K_{vp} = 0,71$ ;  $K_{\gamma p}$  – коефіцієнт, який враховує величину переднього кута  $\gamma$ ,  $K_{\gamma p} = 1,2$ .

$$K_p = 1,02 \cdot 0,71 \cdot 1,2 \cdot 1 = 0,869,$$

					<b>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</b>	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_z = \frac{10 \cdot 50 \cdot 1^{0,1} \cdot 0,005^{0,2} \cdot 2^{0,15} \cdot 3}{3^{0,25} \cdot 16552^{0,2}} \cdot 0,896 = 56,27 \text{ Н}.$$

Обчислюємо крутний момент на шпинделі верстата згідно з формулою:

$$M_{кр} = P_z \cdot \frac{D}{2 \cdot 1000}, \quad (3.9)$$

$$M_{кр} = 56,27 \cdot \frac{3}{2 \cdot 1000} = 0,08 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Енергія, потрібна для фрезерування:

$$N = \frac{M_{кр} \cdot n}{60}, \quad (3.10)$$

$$N = \frac{0,008 \cdot 16552}{60} = 20 \text{ Вт}.$$

### 3.2 Визначення геометричних параметрів кульових гвинтових передач

Внутрішній діаметр нарізі:

$$d_1 = 1,2 \cdot \sqrt[4]{F_a \cdot [n_y]} \cdot (\mu \cdot l)^2 / E, \quad (3.11)$$

де  $F_a$  - сила, що навантажує гвинт, прийнято  $F_a = P_z = 56,27 \text{ Н}$  враховуючи силу різання;  $n_y$  - коефіцієнт запасу міцності в горизонтальних гвинтах,  $n_y = 2,3$ ;  $\mu$  - коефіцієнт, що враховує спосіб встановлення,  $\mu = 0,7$ ;

					<b>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

$l$  - відстань між двома встановленими опорами, прийнято 160мм;  $E$  - модуль Юнга,  $E = 2,06 \cdot 10^{11} \text{ Н / м}^2$ .

$$d_1 = 1,2 \cdot \sqrt[4]{56,27 \cdot [2,3] \cdot (0,7 \cdot 160)^2} / 2,06 \cdot 10^{11} = 9,8 \text{ мм.}$$

Визначено найближчий більший гвинт з серії виробництва - SBN 1605-5.

Характеристики підбраного гвинта [16]:

- зовнішній діаметр гвинта  $d=16$ мм;
- крок різьби  $Ph=5$ мм;
- міжцентрова відстань між кулями  $d_p = 16,75$ ;
- діаметр різьби по впадинам  $d_c = 13,2$ ;
- грузопід'ємність  $C_a = 9,2 \text{ кН}$ ,  $C_0 a = 12,9 \text{ кН}$ .

3.2.1 Перевірка гвинта на статичну стійкість:

$$F_{кр} = \pi^3 \cdot E_d^4 / [64 \cdot S \cdot (\mu \cdot l)^2], \quad (3.12)$$

де  $E$  - модуль пружності матеріалів гвинта,  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па;  $S$  - коефіцієнт запасу,  $S = 3$ ;  $\mu$  - коефіцієнт, який залежний від способу закріплення гвинта,  $\mu=0,7$ ;  $d$  - діаметр різьби гвинта по впадинам,

$$d = d_0 \cdot D_w, \quad (3.13)$$

$D_w$  - діаметр кульки,  $D_w = 3$ ;

Статична стійкість забезпечена, якщо:

					<b>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</b>	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F_{\max} \leq F_{кр},$$

де  $F_{\max}$  - найбільша осьова сила, навантажуючи гвинт на довжині  $l$ ,  
 $F_{\max} = F_a = 56,27Н$ .

$$d = 16 - 3 = 13,$$

$$F_{кр} = \pi^3 \cdot 2,1 / 64 \cdot 3 \cdot (0,7 \cdot 160)^2 = 23740Н.$$

Умова виконана,  $F_{\max} \leq F_{кр}$ , що свідчить про здатність обраного гвинта витримувати статичні навантаження.

### 3.2.2 Перевірка гвинта на динамічну стійкість

Критичну частоту визначають з умови уникнення резонансу:

$$n_{кр} = 5 \cdot 10^7 \cdot \nu \cdot K_B \cdot d / l^2, \quad (3.14)$$

де  $\nu$  - коефіцієнт, який залежить від способу закріплення гвинта,  $\nu = 3,4$ ;  $K_B$  - коефіцієнт запасу по частоті обертання,  $K_B = 0,625$ ;

Частота обертання є в межах допустимого, якщо виконується умова:

$$n_{\max} \leq n_{кр}$$

де  $n_{\max}$  - найбільша частота обертання,  $n_{\max} = 16552 \text{об} / \text{хв}$ .

$$n_{кр} = 5 \cdot 10^7 \cdot 3,4 \cdot 0,625 \cdot 13 / 160^2 = 53955 \text{об} / \text{хв}$$

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Умова дотримана,  $n_{\max} \leq n_{кр}$ , що свідчить про спроможність обраного гвинта протистояти критичній частоті обертання з метою уникнення резонансу.

### 3.2.3 Визначення ККД гвинтової передачі

ККД кулькової гвинтової передачі:

$$\eta = \operatorname{tg}\psi \cdot K_{нат} / \operatorname{tg}(\psi + \rho), \quad (3.15)$$

де  $K_{нат}$  – коефіцієнт, що враховує вплив натягу,  $K_{нат} = 1$ ;  $\psi$  – кут підйому різьби;  $\rho$  – наведений кут тертя в різьбі:

$$\psi = \operatorname{arctg} \left[ P \cdot \frac{z}{\pi \cdot d_0} \right], \quad (3.16)$$

$$\rho = \operatorname{arctg} \left[ P \cdot \frac{f_k}{0,5 \cdot D_w \cdot d \sin a} \right], \quad (3.17)$$

$f_k$  – коефіцієнт тертя-кочення,  $f_k = 0,01 \text{ мм}$ ;

$a$  – кут контакту,  $a = 45^\circ$ .

$$\rho = \operatorname{arctg} \left[ 5 \cdot \frac{0,01}{0,5 \cdot 3 \cdot \sin 45} \right] = 0,077 \text{ радіан},$$

$$\psi = \operatorname{arctg} \left[ 5 \cdot \frac{3}{\pi \cdot 16} \right] = 0,3 \text{ радіан},$$

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

$$\eta = \operatorname{tg} 0,3 \cdot 1 / \operatorname{tg} \cdot (0,3 + 0,77) = 0,8.$$

### 3.2.4 Перевірка осьової міцності

Осьова міцність визначається:

$$C_B = \pi \cdot d_{KB}^2 \cdot \frac{E}{4 \cdot 10^3 \cdot l}, \quad (3.18)$$

де  $d_{KB}$  - діаметр кочення по гвинту

$$d_{KB} = d_0 - 2r_w \cdot \cos a, \quad (3.19)$$

$r_w$  – радіус кульки:

$$r_w = D_w / 2, \quad (3.20)$$

$$r_w = 3 / 2 = 1,5 \text{ мм},$$

$$d_{KB} = 16 - 2 \cdot 1,5 \cdot \cos 45 = 12,02 \text{ мм},$$

$$C_B = \pi \cdot 12,02^2 \cdot \frac{2,1 \cdot 10^{11}}{4 \cdot 10^3 \cdot 160} = 148,93 \text{ Н / мм}.$$

Після проведення перевірки гвинта SBN-1605-5 на динамічну, статичну та осьову стійкість, було встановлено, що він здатен витримати вказані навантаження. Це забезпечує досягнення необхідної точності позиціонування у нашому верстаті.

					<b>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

### 3.3 Розрахунок підшипників

#### 3.3.1 Підбір підшипників

Зважаючи на специфікації гвинта SBN 1605-5, було попередньо визначено підшипник, керуючись ГОСТ 8338-75, а саме підшипник, котрий має внутрішній діаметр 10 мм. для фіксації гвинта – 1000800. Цей конкретний різновид підшипника відноситься до радіально-однорядних підшипників [19].

#### 3.3.2 Розрахунок підшипника на статичну міцність

Статична вантажопідйомність буде гарантована, якщо навантаження на підшипник не перевищуватиме допустимого значення, тобто буде виконана умова:

$$P_{or} \leq C_{or} ,$$

де  $C_{or}$  - допустиме навантаження згідно каталогу,  $C_{or} = 630 \text{ Н}$  [13, таблиця 1];  $P_{or}$  - статичне навантаження,

$$P_{or} = X_0 \cdot F_r + Y_0 \cdot F_r, \quad (3.21)$$

де  $X_0, Y_0$  – коефіцієнти, які залежать від типу підшипника,  $X_0 = 0,6; Y_0 = 0,5$  [12, таблиця 59, стр.111];  $F_r$  – навантаження, яке приходиться на підшипник,  $F_r = P_z = 56,27 \text{ Н}$ .

$$P_{or} = 0,6 \cdot 56,27 + 0,5 \cdot 56,27 = 61,897 \text{ Н}.$$

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Аби переконатися, чи гарантує підшипник потрібну безшумність під час функціонування та легкість руху, введемо змінну. Тоді умова для статичної міцності матиме наступний вигляд:

$$P_{or} \leq \frac{C_{or}}{S_o}$$

Підставивши наші дані отримаємо:

$$61,897 \leq \frac{630}{4} = 157,5.$$

Умова виконана,  $P_{or} \leq C_{or}/S_o$ , що засвідчує коректність підбору підшипника для нашого верстата. Він гарантуватиме необхідну статичну міцність, що забезпечить потрібну точність під час роботи.

### 3.4 Підбір електродвигуна

#### 3.4.1 Розрахунок крокового кута

Мінімальний крок подачі, тобто кут кроку, що необхідний електродвигуну та приводному механізму, визначається формулою, яка базується на найменшому значенні подачі, кроці кульково-гвинтової передачі та коефіцієнті пониження:

$$E = \frac{360 \cdot S}{Ph \cdot A}, \quad (3.22)$$

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $S$  - мінімальне значення подачі за крок,  $S = S_{01} = 0,015\text{мм}$ ;  $P_h$  - крок різьби ходового гвинта кульково-гвинтової передачі,  $P_h = 5\text{мм}$ ;  $A$  - передаточне відношення, прийнято за 1.

Отже,

$$E = \frac{360 \cdot 0,015}{5 \cdot 1} = 1,8^\circ.$$

### 3.4.2 Крокова швидкість

Крокова швидкість розраховується виразом:

$$f = \frac{V \cdot 1000}{S}, \quad (3.23)$$

де  $V$  - швидкість подачі, прийнято:

$$V = Fm / 60 = 248 / 60 = 4\text{мм} / \text{с} = 0,004\text{м} / \text{с};$$

$$f = \frac{V \cdot 1000}{S} = \frac{0,004 \cdot 1000}{0,015} = 267\text{Гц}.$$

### 3.4.3 Розрахунок потужності електродвигуна

Потужність визначається за формулою:

$$F = m \cdot a, \quad (3.24)$$

де  $m$  – маса столу,  $m=5$ ;  $a$  – прискорення:

					<b>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

$$a = \frac{v}{60}, \quad (3.25)$$

$$a = \frac{0,156}{60} = 0,0026 \text{ м / с}^2,$$

$$F = 5 \cdot 0,0026 = 0,013 \text{ Н}$$

Беручи до уваги силу різання  $P_z$  та додаючи її, ми виведемо формулу:

$$F_0 = P_z + F, \quad (3.26)$$

$$F_0 = 56,27 + 0,013 = 56,283 \text{ Н}.$$

На основі отриманих даних було обрано кроковий двигун, що відповідає вказаним вище характеристикам. Мова йде про модель NEMA23 57HS8230B4 (див. рис. 3.1).

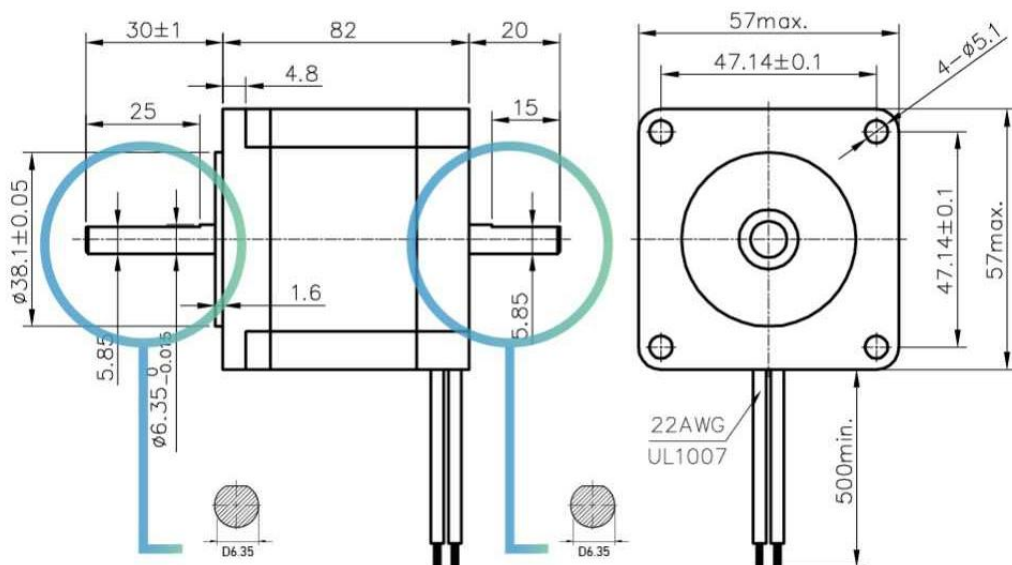


Рисунок 3.1 – Габаритні і приєднувальні розміри крокового двигуна NEMA23 57HS8230B4

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Параметри двигуна:

- кут кроку -  $1,8^\circ$ , що є достатнім згідно наших розрахунків;
- опір обмотки - 1,2 Ом;
- утримуючий момент - 2,2 Nm;
- обертовий момент – 60 N/мм, що підходить під вище проведені розрахунки;
- напруга живлення – 3,6-36 В;
- струм – 3А;
- підключення – 4 провода / 2 фази.

Крокові двигуни демонструють значний крутний момент на малих обертах. Із зростанням швидкості обертання, момент відчутно зменшується. Проте, динамічні можливості двигуна можуть бути значно покращені, якщо застосовувати драйвери з контролем струму, що використовують широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ).

Висновки до третього розділу

1. Здійснено обчислення режимів різання для верстатного обладнання, яке перебуває в процесі проектування, з метою виявлення параметрів для конструкції.
2. Визначені геометричні властивості складових частин конструкції та виконані розрахунки для контролю.
3. Розроблено систему управління станком, керуючись вимогами технічного завдання.

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

В результаті роботи над бакалаврською роботою було здійснено аналіз наявних технологічних та технічних підходів з тематики магістерської роботи. Виявлено новий спосіб демонтажу BGA мікросхем для збільшення ефективності ремонту комп'ютерної, офісної техніки та інших пристроїв. Створено конструкцію фрезерного верстата для демонтажу цих мікросхем. Здійснено розрахунки кулько-гвинтової передачі, радіальних підшипників та крокових двигунів для забезпечення необхідних параметрів, вказаних у технічному завданні.

Спроектувавши та обравши всі необхідні складові верстата, було розроблено електричну схему управління цим верстатом і підібрано компоненти, що забезпечують легкість в обслуговуванні та управлінні процесом демонтажу мікропроцесорів.

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. CNC-2535AL2 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [http://www.xn--e1aafjtnbd4ab4b8b.xn--p1ai/goods/28323904-gravirovalny\\_frezerny\\_stanok\\_s\\_chpu\\_cnc\\_2535al](http://www.xn--e1aafjtnbd4ab4b8b.xn--p1ai/goods/28323904-gravirovalny_frezerny_stanok_s_chpu_cnc_2535al).
2. Кузнецов Ю.Н. Станки ЧПУ: Навчальний посібник. К.: Вища школа: 1992.-278 с.
3. Кузнецов Ю.Н., Срибний Л.Н. Підвищення ефективності токарських автоматів. К.: Техніка, 1969.-168 с.
4. Конструювання та розрахунок верстатів: розрахунок подач та направляючих/ В.І. Глибокий, А.М. Якимович, , А.С. Глибокий – М.БНТУ, 2013.-98с.
5. Кузнецов, Ю.М. Теорія технічних систем /Ю.М. Кузнецов, І.В. Луців, С.А. Дубиняк. – К. – Тернопіль, 1997. – 310с.
6. Основи обробки та програмування на верстатах з числовим програмним керуванням. / Н.В. Онофрейчук– Світ, 2017. – 368 с.
7. Вайнтрауб М.А. Технологія верстатних робіт: навч.пос. для проф.-техн. навч. закладів / М. А. Вайнтрауб, В. Й. Засельський, Д. В. Пополов, за наук. ред. М. А. Вайнтрауба. – К. : 2015. – 199с.
8. Miller Rex, Miller Mark Richard. Automated Machines and Toolmaking. - 5th Edition. – Wiley, 2004. – 497 p.
9. Arpo Karlo. Secrets of 5-Axis Machining.- New York, Industrial Press, Inc., 2008. - 177 p.
10. Kumar K., Ranjan C., Davim J.P. CNC Programming for Machining.- New York: Springer, 2020. – 136 p.
11. Smid P. CNC Programming Handbook. A Comprehensive Guide to Practical CNC Programming. - 3rd edition. – Industrial Press Inc., 2007. – 600 p.
12. Малінін Є.Є. КТ 2. Розробка конструкції фрезерного верстату з програмним управлінням. ПТ 2. Розробка механіки фрезерного верстата:

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

дипломна робота, пояснювальна записка/ Малінін Є.Є.; кер. роботи доц. КІТАМ РазумовФризюк Є.А.; ХНУРЕ, Кафедра Комп'ютерно-інтегровані технології, автоматизації та мехатроніка. – Харків, 2019. – 77 с.

13. Lee E.A. The past, present and future of cyber-physical systems: a focus on models / E.A Lee // Sensors. – 2015. – V.15. – N.3. – P. 4837–4869. (DOI: 10.3390/s150304837)

14. Meissner H. Analysis of control architectures in the context of Industry 4.0 / H. Meissner, R. Ilsen., J.C. Aurich // Procedia CIRP. – 2017. – V. 62. – P. 165–169. (DOI:10.1016/j.procir.2016.06.113)

15. Balasubramaniyan S. Design and verification of cyberphysical systems using TrueTime, evolutionary optimization and UPPAAL / S. Balasubramaniyan , S. Srinivasan, F. Buonopane, B. Subathra // Microprocessors and Microsystems. – 2016. – V. 42. – P. 37–48. (DOI: 10.1016/j.micpro.2015.12.006)

16. Fang Zh. Performance and reliability improvement of cyber-physical systems subject to degraded communication networks through robust optimization / Zh. Fang, H. Mo, Y. Wang, M. Xie // Computers and Industrial Engineering. – 2017. – V. 144. – P. 166–174. (DOI: 10.1016/j.cie.2017.09.047)

17. Hwang G. Developing performance measurement system for Internet of Things and smart factory environment / G. Hwang, J. Lee, J. Park, T.-W. Chang // International Journal of Production Research. – 2017. – V. 55. – N 9. – P. 2590–2602. (DOI: 10.1080/00207543.2016.1245883)

18. Lee K.H. System of systems approach to formal modeling of CPS for simulation-based analysis / K.H. Lee, J.H. Hong, T.G. Kim // ETRI Journal. – 2015. – V. 37. – N 1. – P. 175–185. (DOI: 10.4218/etrij.15.0114.0863)

19. Ning H. Cybermatics: cyber-physical-social-thinking hyperspace based science and technology / H. Ning, H. Liu, J. Ma, L.T. Yang // Future Generation Computer Systems. – 2016. – V. 56. – P. 504–522. (DOI: 10.1016/j.future.2015.07.012)

20. Qu T. System dynamics analysis for an Internet-of-Things-enabled

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

production logistics system / T. Qu, M. Thurer, J. Wang, Z. Wang// International Journal of Production Research. – 2017. – V. 55. – N 9. – P. 2622–2649. (DOI:10.1080/00207543.2016.1173738)

21. Vogel-Heuser B. Fault handling in PLC-based Industry 4.0 automated production systems as a basis for restart and self-configuration and its evaluation / B. Vogel-Heuser, S. Rosch, J. Fischer, Th. Simon // Journal of Software Engineering and Applications. – 2016. – V. 9. – N 1. – P. 1–43. (DOI: 10.4236/jsea.2016.91001)

25. Паливода Ю. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки: навчально-методичний посібник / Ю. Паливода, А. Дячун, Р. Лещук. – Тернопіль, Тернопільський національний технічний університет ім.І.Пулюя, 2019. – 240с.

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57