

Міністерство освіти і науки України  
Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА)

**О. С. Ковалевська, С. В. Ковалевський**

**УДОСКОНАЛЕННЯ УПРАВЛІННЯ  
ТЕХНОЛОГІЧНИМ ОБЛАДНАННЯМ  
ІЗ МЕХАНІЗМАМИ ПАРАЛЕЛЬНОЇ  
СТРУКТУРИ**

**Монографія**

Затверджено  
на засіданні вченої ради  
Протокол № 2 від  
28.10.2021

Краматорськ  
ДДМА  
2021

УДК 621.9.06-229:658.52.011

К 56

**Рецензенти:**

*Анділахай О. О.*, д-р техн. наук, професор, Приазовський державний технічний університет;

*Кіяновський М. В.*, д-р техн. наук, професор, Криворізький національний університет;

*Суботін С. О.*, д-р техн. наук, професор, Запорізький національний технічний університет.

**Ковалевська, О. С.**

К 56 Удосконалення управління технологічним обладнанням із механізмами паралельної структури : монографія / О. С. Ковалевська, С. В. Ковалевський. – Краматорськ : ДДМА, 2021. – 308 с.

ISBN 978-617-7889-17-4

У монографії на підставі аналізу літературних джерел щодо проектування, діагностики та управління автоматизованим верстатним обладнанням сформульовані принципи систематизації для забезпечення синергії виробничо-технологічних систем із використанням механізмів паралельної структури. Наведені та обґрунтовані шляхи розробки систем інтелектуального управління верстатним обладнанням із механізмами паралельних структур, а також підвищення ефективності реконфігурації механоскладального виробництва. Може бути використана фахівцями й студентами машинобудівних та технологічних спеціальностей.

УДК 621.9.06-229:658.52.011

© О. С. Ковалевська, С. В. Ковалевський, 2021.

ISBN 978-617-7889-17-4

© ДДМА, 2021.

## ЗМІСТ

Позначення.....	5
ВСТУП .....	6
Розділ 1. Проблема проєктування, діагностики та управління верстатним обладнанням нового покоління.....	8
1.1. Проблеми сучасного виробництва .....	8
1.2. Основні підходи структурного й параметричного синтезу верстатного обладнання з МПС.....	17
1.3. Особливості конструювання верстатів із МПС.....	23
1.4. Застосування методів контролю, діагностики та управління в автоматизованих верстатах .....	31
1.5. Проблеми багатомономенклатурного виробництва та принципи реконфігурування.....	39
Розділ 2. Розробка принципів систематизації і обробки інформації в структурі верстата з МПС .....	43
2.1. Принципи систематизації для вирішення завдань структурного синтезу .....	43
2.2. Кодування інформації за допомогою системи класифікації.....	47
2.3. Використання методу зв'язкових графів і матриць інцидентності для структурного аналізу мобільних верстатів-роботів із МПС .....	54
2.4. Підстави побудови граф-структури для проведення акустичної діагностики МПС.....	69
Розділ 3. Проєктування оптимальної мехатронної системи для механоскладального виробництва на базі октопода.....	81
3.1. Обґрунтування вихідних даних для розробки конструкцій октопода.....	81
3.2. Теоретичний аналіз похибки позиціонування виконавчого органа октопода.....	90
3.3. Методики розрахунку робочої зони октопода й оптимізація траєкторії руху вихідної ланки МПС.....	100
3.4. Створення рухомого плеча і його динамічний аналіз .....	108
3.5. Дослідження зміщення центру мас виконавчої ланки МПС .....	135
Розділ 4. Діагностика й управління в МПС.....	142
4.1. Передумови інформаційного забезпечення мехатронних систем .....	142
4.2. Каскадна ідентифікаційна модель керованого об'єкта .....	149
4.3. Програмно-апаратні засоби акустичної діагностики.....	160
4.4. Побудова еталонної моделі МПС.....	164
4.5. Акустична діагностика розмірів і якості поверхонь деталей верстата .....	160

Розділ 5. Виготовлення й випробування експериментальних зразків верстатів-роботів із МПС і засобами діагностики .....	187
5.1. Об'єкти експериментальних досліджень .....	187
5.2. Оптимізація структури МПС на основі експертних оцінок.....	210
5.3. Дослідження похибки гвинтової передачі експериментального верстата-робота .....	213
5.4. Випробування виготовлення експериментальних зразків .....	216
5.5. Засоби автоматизації діагностики технологічних систем і процесів.....	218
Розділ 6. Розробка рекомендації з технологічного підвищення ефективності реконфігурації на базі МПС .....	226
6.1. Концепція реконфігурованого виробництва на базі мобільних інтелектуальних технологічних машин.....	226
6.2. Формування реконфігурованої структури ділянок механоскладальних цехів на основі мобільних верстатів-роботів .....	233
6.3. Приклади щодо реконструкції механоскладального цеху машинобудівного підприємства.....	241
6.4. Підвищення різальних властивостей непереточуваних пластин для реконфігурованих виробництв .....	258
6.5. Акустична діагностика багатоболтових з'єднань для складання МПС на модульному принципі.....	270
ВИСНОВКИ .....	277
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	280

## ПОЗНАЧЕННЯ

МПС – механізми з кінематикою на основі паралельних структур

МСМВ – мехатронні системи механоскладального виробництва

РВС – реконфігуруючі виробничі системи

$\bar{X}$  – множина, що характеризує координати  $\{x_i, y_i, z_i\}$  виконавчого механізму об'єкта

$\bar{Y}$  – множина, що характеризує акустичний спектр власних коливань системи об'єкта

$A_i(f_i)$  – амплітуда  $k$ -ї частоти амплітудно-частотної характеристики

$\Omega$  – об'єкт моделювання

$\bar{X}'$  – множина відновлених координат виконавчого механізму об'єкта

$\bar{Y}'$  – множина відновлених характеристик акустичного спектру власних коливань системи об'єкта

$x_i, y_i, z_i$  – просторові координати виконавчого механізму об'єкта  $\Omega$

$x_k, y_l, z_r$  – контрольовані характеристики об'єкта

$\delta$  – похибка відновлення  $\bar{X}$

$\delta'$  – похибка відновлення  $\bar{Y}$

$W(f)$  – сигнал збудження об'єкта «білим шумом»

$R[W(f)]$  – реакція об'єкта на збудливу дію  $W(f)$

$x'_i, y'_i, z'_i$  – відновлені просторові координати виконавчого механізму об'єкта

$A'(f_i)$  – відновлені амплітудно-частотні характеристики

$\bar{X}^{\dagger}, \bar{X}^{\dagger\dots 2}$  – множина ідентифікацій проміжних шарів глибокої нейроподібної мережі за  $\{x_i, y_i, z_i\}$

$\bar{Y}^{\dagger}, \bar{Y}^{\dagger\dots 2}$  – множина ідентифікацій проміжних шарів глибокої нейроподібної мережі за  $[A_i(f_i)]$

## ВСТУП

Розробка напрямків розвитку технологічного обладнання, у коло яких треба включити металорізальні верстати, обладнання для операцій складання, контролю, зберігання й транспортування на базі створення нових алгоритмів управління, веде до підвищення технологічної, конструкторської і організаційної гнучкості. **Стратегія завантаження виробничих потужностей сучасного підприємства, що базується на концепції гнучкого виробництва, здатного швидко переналагоджувати на випуск дрібносерійної продукції з продуктивністю, яка наближається до показників багатосерійного і масового.** Але формування номенклатури виробів для завантаження наявних у підприємства потужностей визначається не тільки потребами ринку, а й можливостями підприємства. Традиційні шляхи оновлення технологічного обладнання передбачають проходження ним життєвого циклу – від установки на фундамент до утилізації. У цьому випадку показники гнучкості обладнання залишаються незмінними й частково можуть бути змінені тільки при черговій модернізації.

Оскільки традиційні верстати зазвичай мають послідовну структуру, можливості поліпшення характеристик точності й жорсткості верстатів послідовної структури обмежені, тому що кожна кінематична пара приймає і передає навантаження в усіх напрямках. Таким чином, окрема ланка кінематичного ланцюга сприймає і переміщує маси всіх кінематичних пар уздовж керованих осей координат верстата. Наявність великих рухливих мас, розмірних ланцюгів, зазорів у кінематичних парах погіршує динаміку, особливо у верстатів, що мають значні габаритні розміри. Але створення полегшених верстатних конструкцій на базі рухомих механізмів може призвести до зниження жорсткості й виникнення вібрацій, а значить, до зниження точності виготовлення виробів, що вимагає вбудовування додаткових датчиків, ускладнення системи управління.

Перспективним напрямком у підвищенні гнучкості виробництва є створення механоскладального обладнання на основі механізмів паралельних структур (МПС). Їх відрізняє жорсткість конструкції при достатній точності переміщень робочих органів із малою металоємністю, здатність до мобільності, високий рівень комп'ютеризації. Така особливість нового

обладнання, засобів і методів формоутворення деталей машин, зокрема розташування ланок МПС на нерухомій основі, зменшує величину переміщення мас, що сприяє зниженню енергетичних показників, а передача формотворчих рухів платформи, яка несе виконавчі органи верстата за допомогою жорстких стержнів, збільшує точність позиціонування інструменту. Також, МПС і створені на їхній основі верстати-роботи однієї і тієї ж структури здатні забезпечити вирішення широкого кола завдань. Тобто кардинальне вдосконалення виробничих технологій веде до створення мехатронних систем **на базі механічних, електронних, програмних синергетично-інтегрованих в єдине ціле**. Для таких систем характерними є такі ознаки, як:

- висока швидкість руху робочих органів;
- точність рухів, яка необхідна навіть для реалізації високоточних операцій;
- компактність конструкції;
- інтелектуальна поведінка машини, що функціонує в змінних і невідзначених середовищах;
- реалізація переміщень робочих органів за складними контурами;
- здатність системи до реконфігурації в залежності від виконуваного конкретного завдання або операції;
- висока надійність і безпека функціонування.

Проблема підвищення гнучкості механоскладального виробництва при одночасному підвищенні продуктивності і якості виготовлення продукції не тільки залишається актуальною, але й відрізняється тенденціями в постійному зростанні інвестицій у виробничі фонди, період оновлення яких неухильно скорочується через необхідність забезпечення конкурентоспроможності продукції, що випускається.

Тому така розробка є актуальною, відкриває перспективи подальшого створення системоутворюючих принципів побудови виробничих систем для розвитку механообробки на базі мобільних верстатів-роботів з інтелектуальними мехатронними системами.

# РОЗДІЛ 1

## ПРОБЛЕМА ПРОЄКТУВАННЯ, ДІАГНОСТИКИ ТА УПРАВЛІННЯ ВЕРСТАТНИМ ОБЛАДНАННЯМ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

### 1.1 Проблеми сучасного виробництва

В автоматизованому виробництві комплекс існуючих технологічних завдань постійно змінюється, а також виникають нові [138], що забезпечують:

- корекцію похибок установлення заготовок; забезпечення необхідної точності позиціонування виконавчих вузлів з інструментом;
- адаптивне управління режимами функціонування процесу;
- виявлення моменту спрацьовування відповідного інструменту й необхідності його заміни;
- оцінку точності виконання процесу обробки;
- діагностика робочого стану елементів технологічної системи.

Технологічне обладнання, яке базується на основі традиційних структур приводів і компоновок, не завжди задовольняє вимогам сучасної технології обробки, складання й контролю машин у результаті певних конструкторсько-технологічних та організаційно функціональних недоліків верстатів із механізмами послідовної дії, налаштування такого обладнання з великою кількістю вузлів потребує значних витрат часу [200, 207, 208, 273].

Важливим напрямком підвищення продуктивності обробки є значне скорочення основного й допоміжного часу за рахунок інтенсифікації режимів формоутворення, контролю, складання, що пов'язано зі значним підвищенням величини прискорень і частою зміною напрямку руху, але й реалізується з аналогічною кількістю гальмувань і прискорень, що вимагає значного підвищення динамічних характеристик технологічного обладнання. Такі режими значно підвищують навантаження на рухомі елементи, тому їхні маси необхідно зменшувати до мінімально можливої



величини. Але прагнення підвищити динамічні характеристики за рахунок виготовлення рухомих елементів із надлегких матеріалів цю проблему не вирішило [265].

Таким чином, існуючі автоматизовані системи обладнання й технології в механоскладальних цехах не задовольняють повною мірою сучасне виробництво. Необхідно таке автоматизоване обладнання, яке задовольняло б темпам розвитку виробництва, як мінімум, із параметрами продуктивності обладнання масового виробництва й гнучкості серійного виробництва, аж до індивідуального.

Формування номенклатури продукції для завантаження існуючої потужності підприємства визначається не тільки ринковими потребами, а і його можливостями. Традиційні способи оновлення технологічного обладнання включають у себе слідкування їхньому життєвому циклу – від заснування до утилізації. У цьому випадку параметри обладнання залишаються незмінними й можуть бути частково змінені лише за допомогою модернізації.

Гнучкі виробничі системи створюються на основі розробки й широкого впровадження нових високоефективних технологій (технологія синтезу 3-мірних об'єктів, нанотехнологія, біотехнологія, лазерна й оптична обробка), для реалізації яких необхідно побудувати високоефективне технологічне обладнання. Інтеграція у виробництво нових технологій обумовлює виготовлення продукції, спрямованої на зниження матеріалу й енергоємності виробів, поліпшення екології, а також соціально-економічної ситуації в суспільстві [134].

Створення гнучкого технологічного обладнання з широкими технологічними можливостями є втіленням загальної автоматизації багатомоделного серійного виробництва, яке є складним і багаторівневим процесом.

Підвищення гнучкості механоскладального виробництва при одночасному підвищенні продуктивності та якості виготовлення продукції є дуже актуальним, і існує тенденція до постійного зростання інвестицій у виробничі фонди, а період його оновлення неухильно скорочується. Перспективна

стратегія завантаження виробничих потужностей сучасного підприємства ґрунтується на концепції постійного підвищення гнучкості виробництва, здатного швидко пристосовуватися до дрібного виробництва з продуктивністю при наближенні до показників багатосерійного й масового за рахунок багатоопераційних верстатів із ЧПУ. Формування складу та обсягу основного та допоміжного обладнання в цьому напрямку актуалізується не традиціями та можливостями його відновлення, а номенклатурою замовлень, яка на теперішній момент актуальна й найбільш затребувана.

Можливості верстатного обладнання на базі МПС ґрунтуються на модульності стрижневих конструкцій, на мультиплікативності та масштабуванні їхньої конфігурації і підвищених динамічних властивостях, на мехатронних вузлах і адаптивних алгоритмах управління [73, 190]. Такі особливості МПС створюють умови для еволюції механоскладального виробництва в напрямку подальшого підвищення його гнучкості шляхом переконфігурації робочих областей із допомогою верстатів-роботів із нормалізованих елементів широкого типорозмірного ряду.

Особливістю такого розвитку виробничих потужностей підприємства є:

- формування номенклатури виробів підвищеного попиту (критерій відбору є перевагою його виробництва);
- розробка технологічних процесів із використанням безлічі варіантів конфігурації мобільних верстатів-роботів;
- конструювання оптимальних варіантів конфігурацій мобільних верстатів-роботів;
- конструювання допоміжного обладнання механоскладальних ділянок із використанням МПС;
- розробка завдань на проєктування ділянок для установки обладнання, що переконфігурується;
- розробка поточних завдань із монтажу мобільних роботів із нормалізованих елементів та програм керування мобільними верстатами-роботами;

- створення обробних, контрольно-вимірювальних інструментів і складальних пристроїв мобільних верстатів-роботів;
- зберігання й підготовка складових частин мобільних верстатів-роботів для подальшого монтажу та експлуатації на механоскладальних ділянках.

Однак механічна частина й система приводів виконавчих механізмів мобільного верстата-робота не матиме необхідних показників точності й продуктивності без системи інтелектуального керування рухами виконавчої ланки. Дослідження у сфері точності позиціонування, кінематики та динаміки верстатів на базі МПС підтверджують складний характер управління ланками механізму навіть для виконання прямолінійних переміщень різального інструменту.

Багатоваріантність компоновок мобільних верстатів для різних варіантів завантаження реконфігурованих ділянок механічної обробки й складність управління виконавчими рухами робочого інструмента вимагає постійного контролю його положень у робочому просторі відповідно до заданих програм і їхньої корекції за допомогою еталонних моделей.

Як визначено в літературному огляді, можливості верстатного обладнання на базі МПС ґрунтуються на модульності стрижневих конструкцій, на мультиплікативності та масштабуванні їхньої конфігурації і підвищених динамічних властивостях, на мехатронних вузлах і адаптивних алгоритмах управління [73, 190]. Такі особливості МПС створюють умови для еволюції механоскладального виробництва в напрямку подальшого підвищення його гнучкості шляхом реконфігурації робочих областей із допомогою верстатів-роботів із нормалізованих елементів широкого типорозмірного ряду.

Потреба в управлінні портфелем номенклатури виробів, який задовольняє потреби клієнтів, широко визнається у якості засобу для формування номенклатури, що постійно змінюється на глобальному конкурентному ринку з мінливими технологіями, більш короткими циклами життєвого циклу продукту й з підвищеною потребою в різноманітності [21, 5].

Розвиток виробничої системи викликає численні зміни у виробництві, які часто обумовлюють дорогі зміни у виробничій системі [31]. Тому прийняття довгострокової перспективи планування розвитку виробничої системи має велике значення для конкурентоспроможності та інновацій [5].

Існують численні проблеми у формуванні номенклатури виробничої системи, які пов'язані з управлінням інформацією, ресурсами, концепцією системи виробництва, постачанням обладнання, моніторингом навколишнього середовища, компетенціями, виробничою стратегією і процесом розвитку [14, 15]. Тому розробка виробничих систем, які дозволяють змінювати відповідно до мінливої актуальної номенклатури замовлень, є головним виробничим завданням [5]. Концепція реконфігурованої виробничої системи є способом швидко реагувати на ринкові можливості та зміни [58]. Така концепція забезпечує реконфігурування й адаптованість на системному й машинному рівнях [57], які готують операції для нових поколінь і оновлень продуктів, що призводить до більш ефективного й сталого підходу до розробки виробничої системи.

Наявність довгострокової перспективи розвитку виробництва вимагає використання наявної інформації про плани на майбутнє. Однак це є дилема, оскільки, з одного боку, існує загальне небажання випускати ранню інформацію, наприклад наступних сімейств виробів, а з іншого – тенденція використовувати неповну інформацію при проектуванні виробничої системи [5, 15]. Тенденція дотримуватися неповної інформації може бути пояснена проблемою управління інформацією – ефективність управління інформацією повинна ґрунтуватися на здатності уникати ситуацій, у яких процес розробки виробничої системи або піддається інформаційному переваженню, або отримує інформацію занадто пізно, або взагалі така інформація відсутня [5].

Складно мати довгостроковий погляд на розвиток виробництва, і часто виробничі системи розробляються відповідно до поточної номенклатури, що знижує використання потужностей і значно збільшує ризик

інвестування [5]. Тим часом на концепцію виробничої системи сильно впливають попередні розробки системи виробництва [5]. Чітка стратегія виробництва, яка підтримує довгострокову перспективу у сфері розвитку виробництва, є актуальною, оскільки розробникам виробництва потрібно мати мандат на інвестування в довгострокове рішення, таке як реконфігуровані виробничі рішення.

Співпраця з постачальниками обладнання в розвитку технологій виробництва створює взаємозалежності і включає невизначеності й асиметрію інформації [13]. Тісна співпраця між постачальниками устаткування й користувачами, тобто приймачами виробничого обладнання, позитивно пов'язана з продуктивністю при придбанні та впровадженні технології виробництва [1,98], а тісна співпраця з постачальниками є попередньою умовою для зміцнення довіри, взаєморозуміння виробників металообробного устаткування й споживачів [47,14].

На жаль, на практиці розробка виробничої системи, як правило, ґрунтується на минулому досвіді й судженні, заснованому на досвіді, який вимагає численних ітерацій і етапів корекції, а процес розробки виробничої системи не розглядається як засіб розробки кінцевої виробничої системи [5].

Реконфігуроване виробництво призначене для безперервної зміни ємності й функціональності відповідно до змін продукту, процесу й попиту і є прямим результатом стратегічного планування [57]. Однак щодо визначення майбутніх виробництв, що реконфігуруються, необхідно збирати, структурувати й використовувати вкрай невизначену інформацію і дані про майбутнє, що є серйозною проблемою, яка викликає загальне небажання робити цю інформацію доступною для конкурентів.

До числа проблем належить забезпечення технологічної гнучкості устаткування в умовах багатоміністерних виробництв із широким діапазоном параметрів продукції, а одним із шляхів вирішення цієї проблеми є концепція основного обладнання, що реконфігурується [58, 293, 203, 18, 104]. Особливі перспективи поновлення верстатного парку механоскладальних

цехів відкривають мобільні верстати-роботи на основі механізмів із МПС [190].

У роботі [263] наведені обґрунтування необхідності оптимізації управління складними механізмами технологічних машин, а також представлені моделі процесів ефективного, за критеріями витрат енергії, управління обладнанням із МПС із використанням їхньої динамічної та статичної моделей. Показано, що в незаданому діапазоні швидкостей робочого органа при реалізації такого управління можна не враховувати маси та інерційні параметри елементів такого обладнання. Однак основні переваги обладнання з МПС найбільш яскраво проявляються в умовах великих швидкостей переміщення виконавчих механізмів при заданій точності траєкторії переміщення інструмента та його позиціонування.

Великі перспективи в побудові реконфігурованих виробництв відкриваються у зв'язку із застосуванням металообробних верстатів на основі МПС [73,190]. Їхні конструкції відрізняються жорсткістю, низькою металоємністю в порівнянні з традиційними верстатами аналогічного робочого простору; здатністю до великих навантажень через фермові елементи; точністю переміщень виконавчих механізмів і їхнього позиціонування; можливістю масштабування конструкцій у розмірному ряду; простотою елементів верстата і їхнього остаточного складання.

Однак механічна частина й система приводів виконавчих механізмів мобільного верстата не матиме необхідних показників точності й продуктивності без системи інтелектуального керування траєкторією. Численні дослідження в області точності позиціонування, кінематики та динаміки верстатів на базі механізмів із МПС підтверджує тезу про складний характер управління ланками механізму навіть для виконання прямолінійних переміщень різального інструменту [271,270,269].

Багатоваріантність компоновок мобільних верстатів для різних варіантів завантаження реконфігурованих ділянок механічної обробки й складність управління виконавчими рухами робочого інструмента вимагають

постійного контролю його положень у робочому просторі та їхньої корекції відповідно до еталонної моделі. У роботах [289, 144, 199] показано особливості динаміки гексапода як представника МПС. Зокрема, авторами цих робіт підтверджується складний характер коливань механічної системи.

Таким чином, найбільшу вигоду (в абсолютному вираженні) можуть отримувати великі підприємства, паралельно оптимізуючи структуру допоміжного виробництв, зокрема як у роботах [53, 62].

Відповідальним етапом проектування РВС є синтез оптимальної структури й компонування. Під структурою слід розуміти виробничо-технологічну організацію реконфігурованої системи з технологічного обладнання, тобто металорізальних верстатів, транспортних засобів, засобів керування та ін., що забезпечує працездатність РВС у цілому. Це елементи, об'єднані між собою рядом функцій, які забезпечують виконання виробничого завдання [280].

Паралельно із синтезом структури розробляється компонування РВС. Воно визначає реальне розміщення устаткування в цеху. Синтез структури й розробка компонування нерозривні між собою, тому цей етап проектування часто називають структурно-компонувальним. Структурно-компонувальна побудова визначається організаційно-технологічними вимогами [251, 278].

Для синтезу варіантів структури й компонування широко використовуються моделі, які розподіляються на аналітичні й натурні. Із класу аналітичних моделей мають велике поширення імітаційні моделі, викладені в роботах [278, 283].

Імітаційні моделі є математичними об'єктами, які схематизують елементи РВС, яка проектується. За їхньою допомогою вирішуються основні завдання організаційно-технологічного проектування. Імітаційні моделі близькі за побудовою до раніше вивчених циклограм процесу обробки деталі. Їхньою відмінністю є можливість імітації технологічного процесу в динаміці. Алгоритм моделювання структури й розрахунку технологічних параметрів РВС приведений у [283].

Імітаційне модулювання дає змогу описати поведінку складної виробничо-економічної системи впродовж заданого періоду часу при умовах [120]:

- якщо ще немає закінченої постановки задачі дослідження та модель є засобом вивчення явища;

- коли реальний об'єкт недоступний для спостереження і імітація – єдиний спосіб дослідження й перевірки стратегії поведінки;

Воно дає можливість:

- прискорити протікання процесів у моделі в порівнянні з реальними умовами і за короткий час «програти» безліч варіантів;

- перевірити різні варіанти порядку запуску партій деталей, величини партій, кількості партій, виробничу структуру ділянок, пріоритетність обробки, проведення операцій технічного контролю.

Вирішення завдання пошуку додаткових ресурсів із метою підвищення стійкості різальних інструментів для металообробки залишається актуальним, незважаючи на значні успіхи в цьому напрямку [95, 110, 28 та ін.]. Також з'являються нові металеві матеріали, обробка яких вимагає оптимізації на змінених граничних умовах. Інтенсивно розвиваються інтегровані технології модифікації властивостей різальних пластин – за рахунок послідовного здійснення різних за своєю фізичною сутністю методів впливу на їхню робочу поверхню [64, 68, 10]. Вони теж потребують розширення спектру дієвих енергетичних джерел різної природи [10, 55, 106, 26, 113].



## 1.2 Основні підходи структурного й параметричного синтезу верстатного обладнання з МПС

Основний закон існування й розвитку систем – закон цілісності [90, 260]. Він зумовлює повне підпорядкування компонентного складу, структури, функції системи цілям, зокрема для технологічної системи – цілям виробництва. Із цього закону випливають спеціальні закони, закономірності та принципи: забезпечення цільового або оптимального за параметрами цільової функції технологічного проєктування; цільового управління; доцільного функціонування без відмов системи, а також розвитку технологічної системи. Виконання цього закону, закономірностей і принципів, що витікають із нього, дозволяє усунути диспропорції в технологічній системі, забезпечує відповідність компонентного складу системи всієї сукупності (ієрархії) цілей і досягнення найбільш бажаних станів виробництва.

Під структурним синтезом розуміється визначення найкращої структури МПС, що відповідає заданим умовам. Структура механізму у свою чергу визначається взаємним розташуванням, типом (у деяких випадках – кількістю) рухомих плечей МПС, шарнірів, приводів.

Основні підходи, які використовуються для вирішення завдань структурного синтезу:

1. Синтез на основі формул рухливості [259] із використанням формул рухливості, де визначається число ланок, число, клас і порядок розташування паралельних кінематичних пар паралельного робота. Підхід відрізняється відносною простотою, але не бере до уваги геометрію розміщення кінематичних пар, а так само при такому підході відсутня важливість раціонального вибору розміщення кінематичних пар із урахуванням траєкторії виконавчої ланки.

2. Синтез на основі кінематичних груп [36]. Цей підхід ураховує вплив тієї чи іншої структури на геометричні властивості механізму. Він

дозволяє в певній частці автоматизувати синтез. До обмежень використання цього підходу можна віднести необхідність збереження в процесі синтезу відповідних груп рухів.

3. Синтез на основі геометрії кінематичних ланцюгів [12]. Цей підхід дозволяє вибирати структуру, виходячи з бажаної форми обсягу робочого простору. Він носить оціночний характер, для спрощення математичного апарату.

4. Синтез на основі кінематичної геометрії. При виборі структури робота враховуються геометричні умови (кількість ступенів свободи, взаємне розташування) і параметри ланок. Такі завдання вирішуються з використанням теорії гвинта [152,163]. Але одержувані залежності є досить складними і важко формалізуються.

5. Реконфігурація. Суть методу полягає в зміні кінематичних структур існуючих ланцюгів або з'єднанні декількох структур ланцюгів, як правило, не більше двох. У [54, 108, 111] ці операції не мають будь-якого теоретичного опису й виконуються виходячи з логічних міркувань. Реконфігурацію доцільно використовувати як заключний етап інших методів для внесення змін у конструкцію ланцюгів механізму.

6. Кінематична розв'язка рухів. Як було зазначено вище, взаємопов'язаність рухів приводів безпосередньо відбивається на точності позиціонування платформи, а повна розв'язка рухів часто призводить до зменшення жорсткості виконавчого механізму, тому останнім часом розглядаються питання часткової розв'язки [25, 254].

У зв'язку з викладеним, підвищення продуктивності машинобудівного виробництва при недостатніх можливостях верстатного обладнання здійснюється, наприклад, через багаторазове перебазування деталей, коли ставляться завдання забезпечення підвищеної точності позиціонування об'єкта обробки й технологічних, у тому числі й формотворчих рухів виконавчого органа верстата, що забезпечує інструментальну функцію [20, 130, 207].

Структурний синтез передбачає наступним етапом проведення параметричного синтезу системи. Під параметричним синтезом розуміється вибір оптимальних параметрів робота, що відповідають заданим умовам. Параметричний синтез паралельних роботів являє собою широку сферу досліджень і має ряд особливостей, які необхідно враховувати. Наприклад, деякі критерії, які використовуються при параметричному синтезі, є конфліктними. Прикладом таких критеріїв можуть слугувати точність і обсяг робочої області робота: **роботи володіють великою точністю матиме невелику робочий простір** і навпаки. Тому при параметричному синтезі завжди доводиться вибирати компромісне рішення. Зокрема, до підходів параметричного синтезу відносяться: апроксимаційний метод, апроксимаційно-інтернаціональний метод, функціональні методи, метод на основі нейроподібних мереж, корекція на люфт, компенсація теплових деформацій [35, 85, 89, 162, 174, 248, 250, 252, 294]. А в роботі [214] доведена перспективність застосування методу зв'язкових графів для оптимізації структури МПС, оскільки він має інваріантність до фізичної природи об'єктів дослідження, що розширює можливості інженерного аналізу й моделювання динаміки МПС. Але цей метод потребує критичного аналізу й створення більш перспективного підходу.

**Одним із варіантів таких підходів є статичні розрахунки конструкцій, стійкості деформованого стану систем, динаміки, теплопередачі й механіки застосовують метод кінцевих елементів.** Цей метод заснований на апроксимації безперервної функції, визначеної на всій області дискретної моделі за допомогою кусково-неперервних функцій, визначених на підгалузях (кінцевих елементах) [221]. Кінцеві елементи, які використовуються для дискретизації розглянутої області, зазвичай групуються за топологічними ознаками: сегменти, трикутники, чотирикутники, тетраедри, паралелепіпеди, призми й т. д. Найбільш простими є одномірні, двомірні (трикутники й чотирикутники) і тримірні (тетраедри й паралелепіпеди) елементи. З двомірних елементів найпростішим є трикутник, оскільки між двома

вузлами шукана функція змінюється лінійно уздовж кожної з його сторін. Шукану функцію для кожного елемента апроксимують поліномом [218].

Основний принцип, сформульований Л. Ейлером для плоского графа, свідчить про те, що якщо всі вершини графа парні, то можна, не відриваючи олівця від паперу, накреслити граф, при цьому можна починати з будь-якої вершини графа й завершити його в тій же вершині [275]. Також, принцип тензорного обчислення [217] будується на основі векторного обчислення та теорії матриць, що є математичним відображенням складних графів. А мета синтезу механізму – визначення розмірів механізму й положень його вхідної ланки, що найкращим чином відповідають указаним умовам і забезпечують поєднання якісних показників структури системи [277].

При дослідженні важільних механізмів застосовують три підходи: динамічний (коли задані діючі сили або накладені деякі обмеження на динамічні параметри), геометричний (коли задані окремі положення ланок або траєкторії окремих точок) і кінематичний (коли задані деякі швидкості, прискорення або їхнє співвідношення), що відповідають шуканій структурі системи, що створюється [276].

Метод зв'язкових графів успішно застосовується в задачах математичного моделювання динаміки різних технічних систем, включаючи багатоланкові кінематичні пари, маніпулятори, промислові роботи [79, 80, 81, 209, 210, 211, 212, 214, 215, 216]. Цей підхід передбачає наступну послідовність дій:

1) методом зв'язкових графів отримати загальне рівняння динаміки механічної системи, що складається з довільного числа твердих тіл, що утворюють між собою поступальні й обертальні кінематичні пари;

2) на основі заданої геометричної моделі конкретного механізму визначити кількість функціональних перетворювачів і їхні коефіцієнти;

3) на основі загального рівняння з урахуванням інформації про інерційно-масові параметри ланок заданого механізму і діючі на нього сили,

а також з урахуванням інформації про функціональні перетворювачі, отримати рівняння динаміки заданого механізму.

Актуальним напрямком є проектування верстатів із МПС, засноване на використанні шарнірних механізмів. Безліч різних конструкцій можна класифікувати за такими компоновальними ознаками: за видом штанг; за кількістю штанг; за характером розташування шарнірів на платформі і підставці та ін. [291]. Конструкція типу «ферма» – це стрижнева система в будівельній механіці, що залишається геометрично незмінною при оснащенні стрижнів шарнірами. В елементах ферми, **при відсутності розцентрування стрижнів і позавузловому навантаженню**, виникають тільки зусилля розтягування-стиснення [127].

Автоматизоване моделювання та дослідження динаміки мехатронних систем, побудованих на модельному полі зв'язного графу системи, уже практично реалізоване [214, 212, 211, 213]. У цих роботах показано, що елементами динамічної системи є: інерційний накопичувач енергії, ємнісний накопичувач енергії, дисипативний елемент, функціональний перетворювач, гиратор. На входах і виходах системи розташовані джерела зусиль, що визначають дію з боку більш широкої системи, у складі якої знаходиться досліджувана система. У цих роботах підкреслено наступне [214, 216, 215, 209, 212, 210, 211, 213]:

1. Динамічний стан інерційного накопичувача енергії в загальному випадку описується рівнянням

$$e = \frac{d}{dt}(mf), \quad (1.1)$$

де  $f = dq/dt$ ,  $q = q(t)$  – координата;  $m = m(t)$  – інерція накопичувача,  $t$  – час. Зокрема, якщо  $m = const$ , то рівняння набуває вигляду  $e = m(df/dt)$ . Інерційним накопичувачем у механічній системі є масивне тіло: якщо  $q$  – поступальне переміщення, то  $m$  – маса тіла,  $e$  – сила; якщо  $q$  – обертальний рух тіла навколо деякої осі, то  $m$  – момент інерції,  $e$  – момент сили відносно

цієї осі. В електричній системі у якості інерційного накопичувача виступає котушка індуктивності:  $q$  – заряд, що протікає через поперечний переріз провідника,  $m$  – індуктивність,  $e$  – напруга на клеммах котушки.

2. Ємнісний накопичувач енергії в загальному випадку описується рівнянням

$$e = \int (kf) dt, \quad (1.2)$$

де  $k(q) = de/dq$  – жорсткість накопичувача [214, 191]. У більшості інженерних задач жорсткість накопичувачів постійна, і рівняння використовується у вигляді  $e = k \int f dt$ . Ємнісним накопичувачем в механічній системі є пружне тіло: якщо  $q$  – лінійна деформація, то  $k$  – коефіцієнт жорсткості; якщо  $q$  – кутова деформація, то  $k$  – крутильна жорсткість. В електричній системі ємнісним накопичувачем енергії є конденсатор:  $q$  – заряд на обкладинках конденсатора;  $k = 1/C$ ,  $C$  – ємність конденсатора. Одне й те ж фізичне тіло має властивості як інерційного, так і ємнісного накопичувача.

3. Елемент, що перетворює механічну або електричну енергію в теплову енергію, є дисипативним елементом і описується рівнянням

$$e = R\varphi(f), \quad (1.3)$$

де  $R$  – коефіцієнт, який у загальному випадку є функцією часу. Найбільш часто в рівнянні приймають  $R = const$  і  $\varphi(f) = f$  (лінійний опір із постійним коефіцієнтом). У механічних системах за допомогою дисипативного елемента враховують втрати енергії, обумовлені наявністю сухого й в'язкого тертя; в електричних системах – втрати енергії на омичних опорах (резисторах).

4. Функціональний перетворювач перетворювану енергію, що подається на його вхід з одними параметрами, в енергію того ж виду, але з іншими параметрами. Він описується рівняннями:

$$e_{\text{ввх}} = m^{-1} e_{\text{вх}}, f_{\text{ввх}} = m f_{\text{вх}}, \quad (1.4)$$

де  $e_{ex}$ ,  $e_{вих}$  – зусилля,  $f_{ex}$ ,  $f_{вих}$  – потоки на вході й виході перетворювача;  $m$  – коефіцієнт перетворювача. У загальному випадку  $m$  – функція часу  $t$ , яка може бути задана неявно. При моделюванні динаміки механічних систем рівняння використовуються для математичного опису ідеальних механізмів, у тому числі і з рідкими (газоподібними) робочими тілами; в електричних системах – для опису ідеальних перетворювачів електричних сигналів. Теплові втрати в реальних механізмах і електричних ланцюгах ураховуються шляхом додавання в розрахункову модель відповідних дисипативних елементів із наведеними значеннями опору.

Перелічені складові притаманні параметричному опису структури технічної системи, якою є верстат на основі МПС. Таким чином, структурні особливості технічної системи повинні бути гармонічно пов'язані з її структурою, визначеною на підставі структурного аналізу – синтезу.

### 1.3 Особливості конструювання верстатів із МПС

Мобільні сучасні верстати-роботи можуть обробляти деталі різних номенклатурних розмірів, що дозволяє вивести машинобудування на новий рівень. При виборі високошвидкісної обробки треба враховувати швидке зношування інструмента, що виникає при високій швидкості оброблювання. Необхідно використовувати сучасні сплави, покриття, які використовуються при високошвидкісній обробці.

Ключовим елементом стрижневої конструкції будь-якого МПС, і, відповідно, верстата-робота, є плече. Оскільки саме воно забезпечує збереження всіх переваг верстата-робота, то розробка приводного плеча, тобто привода рухомих плечей МПС, що є обґрунтованою, оскільки саме рухомі плечі МПС становить основу конструкції верстата-робота.

Приводи рухомих плечей октопода забезпечують:

- високу точність відпрацювання заданого закону руху;

- високу жорсткість;
- високу дискретність переміщення;
- підвищену продуктивність за рахунок безперервності обробки;
- невисоку вартість;
- можливість виконувати монотонну, циклічну роботу;
- швидкодію, якість та точність обробки;
- відсутність потреби в перервах;
- практичну відсутність потреби у перепочинку.

Найбільш відомими лінійними передачами є:

- пневмо-, гідроприводні;
- електроприводні;
- передача гвинт-гайка;
- ролик-гвинтова передача (РГП) [240];
- кульково-гвинтова передача (КГП) [241];
- хвильова гвинтова передача (ХГП) [242];
- пружна система переміщення (ПСП) [243].

Головною складовою частиною механізму лінійного приводу є тип рухомої енергії. Вибір виду приводу обумовлюється функціональним призначенням, яке він повинен виконати, а також умовами його експлуатації.

Енергоносієм пневматичного приводу є стиснене повітря, яке є робочим енергоносієм, і його перетворення в механічну енергію для руху вихідної ланки пневмодвигуна [255, 282, 274, 281].

В об'ємних гідроприводах мембранного, сільфонного, демпферного типів використовується потенційна енергія тиску робочої рідини [132, 247, 274, 281].

Електропривод для МПС – це, у спрощеному вигляді, електродвигун + передавальний механізм + система управління [281, 222]. Перетворювач електричної енергії використовується для управління потоком електроенергії, що надходить від мережі до двигуна. Керуючи електричною енергією,



перетворювач дозволяє керувати швидкістю двигуна. Сучасні перетворювачі виготовляються на базі потужних напівпровідникових елементів. Найбільш поширеними різновидами перетворювачів енергії є перетворювачі частоти та випрямлячі. Система автоматичного керування входить до складу перетворювача і являє собою мікропроцесорну систему, запрограмовану спеціальними законами стабілізації швидкості двигуна.

Передавальні механізми є двох типів:

- із безпосереднім дотиком закріплених на валах деталей;
- із включенням проміжного гнучкого зв'язку, наприклад ременя.

В обох випадках ведена деталь захоплюється ведучою або внаслідок тертя в місці їхнього зіткнення, або наявності на парних деталях взаємно чіпких виступів і западин. Швидкості обертання веденого й ведучого валів зазвичай різні [222, 129].

У зв'язку з поставленим завданням, доцільно звернути увагу на лінійні приводи. Лінійні приводи – це пристрої для переміщення в просторі з корисним навантаженням. До них відносяться різні типи актуаторів і систем лінійного переміщення. Важливим компонентом лінійних приводів є механічні передачі, такі як КГП:

- лінійні актуатори ;
- електроциліндри;
- телескопічні колони;
- промислові домкрати;
- актуатори обертів.

Системи лінійного переміщення:

- лінійні модулі;
- координатні столи;
- багатокоординатні системи;
- промислові роботи;
- настільні верстати з ЧПУ.

Гвинтові передачі:

- кульково-гвинтові передачі;
- телескопічні кульково-гвинтові передачі;
- ролико-гвинтові передачі;
- передача гвинт-гайка ковзання;
- передача шестерня-рейка.

Типовий гексапод виконаний на базі механізмів поступального переміщення, які являють собою, наприклад, кульково-гвинтові передачі [130, 20, 207, 208]. Для зміни їхньої довжини слугують регульовані електроприводи. Контроль їхнього переміщення здійснюється датчиками положення. Одним кінцем рухомі плечі шарнірно з'єднані з основою, а іншим (також шарнірно) – із рухомою платформою, на якій установлений виконавчий механізм, наприклад мотор-шпindel.

Складові, що впливають на показники точності МПС:

1. Похибка системи управління. Основним фактором, який впливає на цю похибку, є точність використовуваних датчиків зворотного зв'язку.

2. Геометричні похибки від допусків на розташування центрів шарнірів, впливу допусків на довжини опор, не ідеальності руху сферичних шарнірів, впливу зазорів у шарнірах на траєкторію руху МПС [18, 19, 20, 76, 84, 101, 102, 107]. Узагальнений підхід, заснований на застосуванні чисельних оцінок, одержуваних у результаті розв'язання прямої задачі кінематики, і, відповідно, складний в обчислювальному відношенні, дозволяє зробити висновок, що немає можливості визначити загальні закономірності впливу геометричних помилок. У кожному конкретному випадку потрібно проводити окреме дослідження, оскільки вплив геометричних помилок залежить від архітектури, габаритів, робочого простору й конфігурації МПС.

3. Теплові процеси в МПС можуть впливати на точність верстатив-роботів, методи компенсації розроблені досить повно [37, 75]. Але необхідна постійна діагностика стану МПС для отримання точності переміщень виконавчих органів МПС.

4. Динамічні похибки у високошвидкісних машинах, що притаманні верстатам-роботам, впливають на точність більше статичних за рахунок пружних деформацій, власних коливань, помилок відпрацювання приводів під дією гравітаційних сил [75, 85].

Серед існуючих методів обробки найбільш ефективним для верстатів із МПС є високошвидкісне фрезерування, тому що дозволяє одержувати найменший переріз зрізу металу при використанні високих швидкостей знімання. Суть цієї технології полягає у використанні високих швидкостей різального інструменту, що веде до істотного зниження опору матеріалу при його обробці. Швидкісне фрезерування переважно реалізується за допомогою п'ятиосьового верстата [188, 256]. Особливістю такої обробки є те, що **робота різання перетворюється на корисну частину і втрати, які перетворюються в тепловий потік, який направлений у стружку.**

Порівняно з традиційною обробкою високошвидкісне фрезерування забезпечує [188]:

- зниження сил різання на 30 % і більше, що зменшує деформацію оброблюваної деталі й дозволяє обробляти тонкостінні деталі до точності й до форми яких ставляться високі вимоги;
- зменшення температури оброблюваної деталі;
- отримання шорсткості оброблюваної поверхні, за якістю аналогічної абразивній обробці;
- збереження точності обробки протягом тривалого часу в результаті зниження напружень у верстаті та інструменті за рахунок зменшення сил різання;
- збільшення подачі в 5...10 разів;
- зростання продуктивності знімання металу в 3...5 разів;
- зменшення вібрацій інструменту й деталі;
- зниження вартості інструменту;
- зниження часу обробки на 40...70 % і вартості на 20...50 %.

Порівняння параметрів традиційного й високошвидкісного фрезерування пальцевою фрезою зі сферичною формою різальних кромek показує незаперечну перевагу останнього [256, 188, 295].

Попереднє визначення потужності електродвигуна головного руху [222, 235] (до визначення структури приводу), а також вибір крокового двигуна здійснюється за загальноприйнятою методикою.

Одним із суттєвих підходів до процесу проєктування технічних об'єктів є використання САЕ-пакетів для моделювання фізико-технічних об'єктів та систем, таких як: LMS Imagine.Lab AMESim [65, 66, 67], Automation Studio [7], Modelica[6], MapleSim [70], SimulationX, MATLAB Simulink і SolidWorks, у яких розрахунки проєктованих моделей проводяться за допомогою числових методів рішення диференціальних рівнянь.

Серед САЕ-пакетів, представлених на ринку, можна відзначити пакет AMESim.Щодо інших популярних програм, таких як MATLAB і SolidWorks, то вони потребують більше часу для отримання готового рішення.

LMS Imagine. Lab AMESim – комплексна платформа 1D багатодисциплінарного системного моделювання мехатронних систем. Платформа дозволяє оцінити функціональні вимоги на початковій стадії проєктування виробу або системи та закінчуючи стадією доводки. Можливість об'єднання в рамках однієї моделі елементів систем різної фізичної природи, або, іншими словами, багатодисциплінарний підхід, суттєво об'єднує і пришвидшує процес моделювання. Необхідно лише задати зв'язки між досліджуваними елементами системи. Комплект великої кількості спеціалізованих бібліотек компонентів дозволяє скоротити витрати часу й зусиль при розробці нового виробу. Ще до початку проведення випробувань прототипу визначаються найбільш оптимальні параметри.

Провідні постачальники й розробники в автомобільній і аерокосмічній галузях промисловості, а також підприємства загального машинобудування вибрали програмну платформу LMS Imagine.Lab AMESim як основу для функціонального моделювання. Список користувачів програмної

платформи включає такі компанії, як: General Motors, Toyota, Renault, PSA Peugeot Citroen, Bosch, Siemens, Delphi, Airbus, Embraer, Dassault, Snecma, Caterpillar, Komatsu, CNH та ін. Є великий набір рішень, сконцентрований на можливостях моделювання для оцінки поведінки певних функціональних підсистем та для проведення функціонального аналізу двигунів внутрішнього згоряння, трансмісій, систем термобалансу, динаміки автомобіля, гідро-газодинамічних систем, навантажень на шасі літака, систем управління польотом і електричних систем.

Інтерактивне графічне середовище AMESim дозволяє будувати складні мультифізичні системні моделі. Отримана схема легко читається і являє собою логічну інтерпретацію досліджуваної системи. Основу AMESim становить колекція компонентів із різних фізичних областей. Процес моделювання в AMESim гранично простий і заснований на використанні стандартних блоків – фізичних моделей типових елементів (таких як, наприклад, гідроциліндр, електродвигун або термостат). AMESim повністю звільняє користувача від необхідності створення аналітичних моделей, написання скриптів або програмування й забезпечує безпосереднім інструментом для аналізу та оптимізації проектного рішення.

Архітектура AMESim дозволяє реалізувати технічне рішення за чотири кроки: у режимі ескізу відбувається побудова ескізу моделі з готових блоків, наявних у бібліотеці; режим підмоделі дозволяє обирати підмоделі для компонентів системи; у режимі параметрів задаються відомі параметри підмоделей; режим симуляції виконує обробку даних і отримання результатів.

Завдяки наявності в AMESim різноманітних бібліотек для динамічного моделювання, цей програмний пакет був використаний для побудови ескізу приводу верстата-робота, із подальшим складанням ескізу верстата-робота повністю.

Процес моделювання системи складається зі створення ескізу системи, призначення підмоделей компонентів, завдання параметрів і запуску симуляції. Кожен крок виконується в певному робочому режимі:

1. Режим ескізу (Sketch mode) – перший крок побудови моделі, у якому на робочому полі збирається модель системи з елементів бібліотек. Режим ескізу дозволяє створити нову систему, змінити або завершити існуючу, видалити компоненти.

2. Режим підмоделі (Submodel mode) передбачає процес призначення підмоделей обраних компонентів (рівень математичного описання процесів, що відбуваються в компонентах). Можна скористатися функцією Premier submodel – автоматичне призначення головних (елементарних) підмоделей.

3. Режим параметрів (Parameter mode) дозволяє задавати й змінювати параметри, копіювати параметри підмоделей, установлювати глобальні параметри (Global parameters), відображати основні параметри обраної області ескізу, вибирати серійний запуск (Batch run). Коли параметри задані, AMESim компілює систему. При цьому створюється виконуваний файл. Цей файл робить симуляцію можливою.

4. Режим симуляції (Simulation mode) дозволяє запустити стандартну або серійну симуляцію, створювати, зберігати й завантажувати графіки, почати лінеаризацію системи, провести її аналіз.

Треба відмітити, що якщо потрібно, можна створити моделі компонентів, які будуть повністю сумісні з існуючими моделями та готові для повторного використання у складі бібліотек, що настроюються. Наявні бібліотеки стосуються систем управління (Signal, Control&Observers), електромеханічних систем (електричні двигуни й приводи, електротехніка, електромеханіка), двигунів (компоненти IFP: IFP Drive, IFP Engine, IFP Exhaust, IFP C3D), течії рідини й газів (гідравліка, гідравлічні компоненти, гідравлічний опір, наповнення, пневматика, пневмокомпоненти, газодинаміка), механіки (одновимірна механіка, двовимірна механіка, трансмісія,

динаміка автомобіля), термодинаміки й теплопередачі (теплові моделі, термогідравліка, термогідравлічні компоненти, термопневматика, двофазне протягом, системи кондиціонування, системи охолодження, теплообмінники).

#### **1.4 Застосування методів контролю, діагностики та управління в автоматизованих верстатах**

Актуальність робіт із розробки наукових основ щодо ефективного використання верстатів на базі МПС підтверджується численними зверненнями до джерел дослідників у цьому напрямку створення нової високо-ефективної техніки (до 65 тис. джерел). При цьому якість інформації отримує додаткову вагу в тому разі, якщо ця інформація містить критичний аналіз.

Структурована інформація відповідно до загальних вимог її подання та з урахуванням конкретних зразків у області створення мобільних інтелектуальних технологічних машин стає джерелом подальшого розвитку мехатронних систем, оскільки вони є синергетичним поєднанням механічної підсистеми та підсистем силової і інформаційної електроніки. Отже, при проектуванні мехатронної системи слід використовувати принципи системотехніки, при одночасній модельній ідентифікації фізичних явищ у кожній із підсистем. Моделювання мехатронної системи вимагає удосконалення математичного апарату та інструментальних засобів, що здатні забезпечити вирішення завдань на різних ієрархічних рівнях – від програм автоматизованого проектування, інжинірингу та універсальних математичних процесорів до створення необхідного керуючого пристрою, який забезпечує складний координований рух МПС [17,42,67,82,131, 145,198,232].

Спираючись на те, що підвищення точності й продуктивності технологічних процесів механічної обробки залежить від якості управління

виконавчими механізмами обладнання, визначаємо, що разом із підвищенням технічних вимог до них зростають вимоги до систем контролю обладнання та процесів, зокрема – до інформативності діагностичних каналів. У роботах [33, 263 та ін.] представлений аналіз методів і засобів діагностики технологічного обладнання та процесів механічної обробки. Однак, незважаючи на значний прогрес у створенні нових засобів, методів і способів діагностики об'єктів, актуальність пошукових робіт у цьому напрямку не знижується [103]. Вимагають подальшого удосконалення методи діагностики поточної характеристики стану об'єктів у різних умовах, здатні визначати конфігурацію механізму, геометричні параметри механізму при працюючому мотор-шпинделі, динаміку переміщення вузлів механізму експериментального стенду зі змінною швидкістю й навантаженням на привід, дії збурювальних впливів на технологічні машини на базі МПС.

Верстати з МПС являють собою динамічну складну систему, що має складну систему власних коливань, яка складається в ансамбль АЧХ МПС. Кожний стан у просторі або кожен спрямований рух виконавчої ланки МПС супроводжується змінами АЧХ і її похідних. Тому серед методів діагностики об'єктів і процесів, що активно розвиваються, слід виділити методи їхньої акустичної діагностики й створення на цій базі систем управління [24, 28, 172].

Процес функціонування людино-машинних систем супроводжується сукупністю дій і операцій елементів системи, яка об'єднана в цілеспрямовану послідовність завдяки керуючій і забезпечувальній діяльності елементів, що утворює з розрізненої номенклатури окремих функцій їх зв'язну логіко-часову послідовність, стійку до збурень, і веде до досягнення поставленої мети функціонування [168].

У моделюванні виробничих, технологічних, економічних і організаційних систем, необхідність якого визначається постановкою оптимізаційних задач, важко припустити ситуацію, при якій усі значущі фактори будуть



ураховані дослідником [9, 32, 175, 268, 97]. Завжди знайдеться група чинників, впливом яких дослідники знехтували з певним ступенем ризику.

Це має місце практично в будь-якій постановці завдань [49, 48, 99]:

1. Завдання дослідження й діагностики об'єктів
2. Завдання дослідження й прогнозування часових рядів
3. Завдання дослідження й оптимізації параметрів виробничих і, зокрема, технологічних процесів
4. Завдання дослідження й оптимізації управління виробничими і, зокрема, технологічними процесами
5. Завдання управління технічними, організаційними та економічними системами
6. Завдання дослідження й прогнозування надійності виробничих систем
7. Завдання дослідження й оптимізації організаційних структур
8. Завдання дослідження й оптимізації економічної діяльності підприємств і організацій
9. Завдання дослідження й оптимізації наукової діяльності організацій
10. Завдання дослідження освітніх процесів та їхньої оптимізації
11. Завдання створення інтегрованих систем проєктування

Для вирішення цих завдань можна застосовувати як традиційні методи моделювання, так і методи, засновані на застосуванні систем Data Mining [96, 176], до якого відноситься нейромережне моделювання, що складається з великої кількості простих обчислювальних елементів із сігмоїдальними функціями, що пов'язані за принципом конекціонізму [59, 195, 197, 219, 195]. Це забезпечує наступні переваги:

- нейроподібні мережі дозволяють отримати нелінійну залежність вихідного сигналу від вхідного;

- нейроподібні мережі мають здатність адаптувати свої синоптичні ваги до змін навколишнього середовища. Більш того, для роботи в нестационарному середовищі (де статистика змінюється із часом) можуть

бути створені нейроподібні мережі, що змінюють синоптичні ваги в реальному часі;

- нейроподібні мережі, реалізовані на основі електронних компонентів, потенційно стійкі до відмов, тому що контекстна інформація розподілена по всіх зв'язках нейроподібної мережі, і вихід із ладу одного або декількох вузлів не призводить до відмови системи в цілому;

- нейроподібні мережі дозволяють вирішувати складні обчислювальні задачі за допомогою однакових простих обчислювальних сигмоїдальних елементів – нейронів. Ця спільність дозволяє застосовувати одні й ті ж самі алгоритми навчання для вирішення різних прикладних задач.

Навчена нейроподібна мережа набуває здатності будувати асоціативні зв'язки між вхідними й вихідними факторами технічної системи і являє собою ідентифікаційну модель [42,192,195,117].

У ряді своїх робіт А. Г. Івахненко і Г. А. Івахненко відзначають актуальність створення ідентифікаційних моделей на основі нейроподібних елементів [175, 176].

Застосування нейроподібних елементів для створення ідентифікаційних моделей за допомогою апроксимації багатомірними функціями на основі мінімізації похибки, як указують наші дослідження, призводить до зростання порядку функціонального опису похибки. Це є суттєво стримуючим фактором широкого застосування моделювання багатомірних об'єктів нейроподібними моделями. Однак, як доказано нашими дослідженнями [192, 195], цей недолік ліквідується при використанні комплексного виду нейроподібного елемента, що відображає його хвилюву природу.

Одним із основних напрямків в управлінні верстатами з МПС є питання точності позиціонування, забезпечення оптимального переміщення інструмента в умовах великих швидкостей виконавчих механізмів по заданій траєкторії [59, 130, 199, 152, 161, 163, 200, 207, 208, 254, 269, 270, 271 і т. ін.].

У роботах [263, 264] стверджується, що для точного позиціонування робочих органів виконавчих механізмів при оптимальних швидкостях і прискореннях їхніх рухів по заданій траєкторії необхідно враховувати ефективність процесів за критеріями витрат енергії. Показано, що в заданому діапазоні швидкостей робочого органа при реалізації такого управління можна не враховувати маси й інерційні параметри елементів такого обладнання. Однак основні переваги обладнання з МПС найбільш яскраво проявляються в умовах великих швидкостей переміщення виконавчих механізмів при заданій точності траєкторії переміщення інструменту і його позиціонування. Тому є необхідність створення ідентифікаційних моделей для швидко рухомих механізмів.

У роботі [195] підкреслено, що геометричні параметри деталей можна ідентифікувати на основі використання спектрів акустичних сигналів, отриманих у результаті порушення цих деталей ступінчастими ударними впливами. У роботах [177, 178, 194, 244, 245, 246] розглянуто можливість комплектування групи пластин різальних інструментів для оснащення ними великогабаритних фрез, а також ідентифікації абразивних кругів.

Авторами [117] стверджується, що управління виконавчими рухами технологічних машин із МПС являє собою складну задачу, вирішення якої може бути отримане на основі рішення задач кінематики та динаміки виконавчих механізмів. У результаті можуть бути створені умови для точного позиціонування робочих органів виконавчих механізмів при оптимальних швидкостях і прискореннях їхніх рухів по заданій траєкторії. Для цих цілей системи управління повинні бути оснащені інформативними системами ідентифікації об'єктів.

Удосконаленню процесу автоматизованого контролю присвячено досить велику кількість наукових публікацій, серед яких особливе місце займають роботи [114, 173], а серед численних принципів і способів контролю особливе місце займають неруйнівні й безконтактні методи контролю. Важливість контрольних операцій у структурі технологічних процесів

важко переоцінити, проте їхня трудомісткість часто є стримуючим фактором, що примушує шукати альтернативні методи контролю якості деталей [188]. Автоматизація виробничих процесів передбачає проведення контрольних переходів на верстатах із ЧПУ, однак і цей етап супроводжується витратами часу, що так само впливає на продуктивність обробки.

У роботах [28, 172] звернуто увагу на діагностику верстатного обладнання й зроблено висновок, що основним завданням діагностики є розпізнавання стану об'єкта в умовах обмеженої інформації [59]. Алгоритм розпізнавання частково ґрунтується на діагностичних моделях, які встановлюють взаємозв'язок між станами об'єктів і їхніми відображеннями в просторі діагностичних ознак [165]. Але авторами показана перспективність використання алгоритмів акустичного контролю, що ґрунтуються на амплітудо-частотних характеристиках власних коливань об'єктів [192, 195, 117, 165]. У цих роботах було висловлено й частково підтверджено припущення про те, що у якості інформативного джерела діагностичного сигналу слід використовувати його амплітудно-частотну характеристику власних коливань об'єкта в акустичному діапазоні.

Дослідниками в області акустичного контролю прийнято виділяти методи: активні – що використовують випромінювання й прийом акустичних сигналів, і пасивні – що основані тільки на прийомі акустичних сигналів. Ці методи використовуються у високому діапазоні частот для неруйнівного контролю із застосуванням ультразвукових методів, ревербераційного й акустико-топографічного та інших [219, 237, 285]. Але можливості їх розкриті далеко не повністю, що є суттєвою методологією застосування апарату. У роботах [7, 10] було зроблено припущення, що як інформативне джерело діагностичного сигналу слід використовувати його амплітудно-частотну характеристику власних коливань об'єкта в акустичному діапазоні, було виражено та частково підтверджено. Акустичні методи контролю засновані на взаємодії з контрольованим виробом пружних коливань і хвиль широкого діапазону частот [237, 285]. Для неруйнівного контролю

багатошарових конструкцій ці методи використовуються найбільш широко. Основними з них є низькочастотні методи, ультразвуковий метод проходження і, у меншій мірі, ревербераційний і акустико-топографічний, хоча можливості їхні розкриті далеко не повністю. Очевидно, основна проблема полягає в методології застосування математичного апарату для обробки даних акустичних сигналів.

Для здійснення контролю стану конструкцій, у тому числі – у важкодоступних і недоступних місцях, та ідентифікації стану металевих конструкцій безперервно реєструються й накопичуються сигнали акустичної емісії і струми витоку, що дозволяє діагностувати наближення їхніх значень до критичних рівнів [153].

Для розпізнавання стану процесу механічної обробки застосовується матричний метод, який дозволяє визначити працездатність об'єктів при змінненні одного з параметрів у часі або якщо необхідне паралельне знімання інформації по декількох параметрах у строго фіксований момент часу [253, 154]. У верстатах із числовим програмним керуванням із метою підвищення точності механічної обробки застосовують прогнозні моделі, зокрема це надає можливість виконувати нейромережеве прогнозування. Це надає можливість, наприклад, автоматичної зміни траєкторії подачі різального інструменту в процесі обробки і її корекції в процесі зміни [139].

Авторами роботи [257] було зроблено фундаментальне припущення, що чим складніший функціональний характер впливу, тим більше індивідуальних властивостей об'єкта проявляється у функції відгуку, якою, зокрема, може бути спектральна характеристика відгуку об'єкта на такий складний вплив:

$$X_p(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} c_p(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1.5)$$

Спектральна щільність сигналу визначається за формулою [261]

$$S(\omega) = \lim_{T_p \rightarrow \infty} \frac{1}{2 \cdot T_p} M \left[ \left\| X_p(j\omega) \right\|^2 \right] \quad (1.6)$$

Оцінка спектральної щільності проводиться за відомою реалізацією  $x_p(t)$  сигналу шляхом формування з неї дискретної послідовності  $x(n)$ ,  $n = 0, 1, \dots, N-1$  і обробки цієї послідовності відповідно до заданого квантування. Перетворення Фур'є дійсною послідовністю кінцевої довжини  $x(n)$ ,  $n = 0, 1, \dots, N-1$ , так само

$$X(e^{j\omega T}) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\omega T n}, \quad (1.7)$$

у якості оцінки спектральної щільності використовують функцію

$$P_x(\omega) = \frac{1}{N} |X(e^{j\omega T})|^2. \quad (1.8)$$

У загальному випадку ці оцінки не є **заможними**, і існує можливість їхньої флуктуації біля істинного значення спектра. Для отримання **заможної** оцінки спектра використовуються фільтри і методи усереднення [261].

Використовуючи фільтри частот із частотною характеристикою  $S(k)$ , можна отримати модифікований спектр об'єкта  $\Omega$  як функцію його властивостей  $Y$

$$A_k \{f_k[S(k)]\} \rightarrow \Omega(Y). \quad (1.9)$$

Як показано в роботах [195, 117, 261], спектр власних **порушених** коливань об'єкта є найбільш інформативним щодо різних властивостей і параметрів об'єкта. Однак, як висновок із цього аналізу, можна стверджувати, що інформативні можливості діагностичного спектру акустичного сигналу значно розширюються шляхом збудження спектрів вимушених коливань найбільш складним впливом – «білим шумом», що наводиться випромінювачем у робочому діапазоні. Білий шум є яскравим представником складного впливу та найбільш складним впливом, який дозволяє виявляти особливості контрольованого об'єкта в найбільшому ступеню.

## 1.5 Проблеми багатомноменклатурного виробництва та принципи реконфігурування

Потреба в управлінні номенклатурним портфелем виробів, який задовольняє потреби клієнтів, широко визнається у якості засобу для формування номенклатури, що постійно змінюється на глобальному конкурентному ринку з мінливими технологіями, більш короткими циклами життєвого циклу продукту і з підвищеною потребою в різноманітності [21, 5]. Розвиток виробничої системи викликає численні зміни у виробництві, які часто наказують дорогі зміни у виробничій системі [31]. Тому прийняття довгострокової перспективи планування розвитку виробничої системи має велике значення для конкурентоспроможності та інновацій [5].

Існують численні проблеми у формуванні номенклатури виробничої системи, які пов'язані з управлінням інформацією, ресурсами, концепцією системи виробництва, постачанням обладнання, моніторингом навколишнього середовища, компетенціями, виробничою стратегією і процесом розвитку [15, 14]. Тому розробка виробничих систем, які дозволяють змінювати відповідно до мінливою актуальною номенклатурою замовлень, є головним виробничим завданням [5]. Концепція реконфігурованої виробничої системи є способом швидко реагувати на ринкові можливості та зміни [58]. Така концепція забезпечує реконфігурованих і адаптованість на системному й машинному рівнях [57], які готують операції для нових поколінь і оновлень продуктів, що призводить до більш ефективного й сталого підходу до розробки виробничої системи.

Наявність довгострокової перспективи розвитку виробництва вимагає використання наявної інформації про плани на майбутнє. Однак це є дилема, оскільки, з одного боку, існує загальне небажання випускати ранню інформацію, наприклад прийдешніх сімейств виробів, а з іншого – є тенденція використовувати неповну інформацію при проектуванні виробничої системи [15, 5]. Тенденція дотримуватися неповної інформації може

бути пояснена проблемою управління інформацією – ефективність управління інформацією повинна ґрунтуватися на здатності уникати ситуацій, у яких процес розробки виробничої системи або піддається інформаційному перевантаженню, або отримує інформацію занадто пізно, або взагалі така інформація відсутня [5].

Складно мати довгостроковий погляд на розвиток виробництва, і часто виробничі системи розробляються відповідно до поточної номенклатури, що знижує використання потужностей і значно збільшує ризик інвестування [5]. Тим часом на концепцію виробничої системи дуже впливають попередні розробки системи виробництва [5]. Чітка стратегія виробництва, яка підтримує довгострокову перспективу в області розвитку виробництва, є актуальною, оскільки розробникам виробництва потрібно мати мандат на інвестування в довгострокове рішення, таке як реконфігуровані виробничі рішення.

Співпраця із постачальниками обладнання в розвитку технологій виробництва створює взаємозалежності й включає невизначеності й асиметрію інформації [13]. Тісна співпраця між постачальниками устаткування і користувачами, тобто приймачем виробничого обладнання, позитивно пов'язана з продуктивністю при придбанні та впровадженні технології виробництва [1, 98], а тісна співпраця з постачальниками є попередньою умовою для зміцнення довіри, взаєморозуміння виробників металообробного устаткування й споживачів [47, 14].

На жаль, на практиці розробка виробничої системи, як правило, ґрунтується на минулому досвіді й судженні, заснованому на досвіді, який вимагає численних ітерацій і етапів корекції [5], а процес розробки виробничої системи не розглядається як засіб розробки кінцевої виробничої системи [5].

Тому систему механоскладального виробництва можна розглядати як засіб стратегічного й комплексного перетворення виробничих систем, а робота з реконфігурованим виробничим процесом може, таким чином,



допомогти вирішенню виробничих протиріч, що поєднує високу пропускну здатність виділених виробничих ліній і гнучкість гнучких виробничих систем. Реконфігуроване виробництво призначене для безперервної зміни ємності й функціональності відповідно до змін продукту, процесу й попиту і є прямим результатом стратегічного планування [57]. Однак щодо визначення майбутніх виробництв, що реконфігуруються, необхідно збирати, структурувати й використовувати вкрай невизначену інформацію і дані про майбутнє, що є серйозною проблемою, яка викликає загальне небажання робити цю інформацію доступною для конкурентів.

Перспективна концепція виробництва дозволяє забезпечувати випуск різнорідних варіантів у сімействі продуктів, а також у різних сімействах продуктів у рамках однієї і тієї ж виробничої системи (але реконфігурованої), яка також готова до майбутніх поколінь продуктів.

Моніторинг зовнішнього середовища компанії з точки зору майбутніх відповідних інновацій процесу є безперервним завданням, вирішення якого може бути активізовано за допомогою реконфігурованої системи, де нові інновації легко можуть бути додані під час реконфігурації. Здатність і компетентність у повторному використанні концепцій виробництва обумовлені **реконфігурованими характеристиками, що при забезпеченні модульності і здатності структурно перебудовуватися**. Таким чином, реконфігуровані концепції гарантують здатність у майбутньому освоювати випуск нової продукції з меншими витратами та інвестиціями.

Реконфігуруючі виробничі системи (РВС) – це новий виробничий підхід, що не тільки комбінує високу пропускну здатність спеціалізованих ліній із гнучкістю ГВС, але також здатен реагувати на зміни швидко й ефективно. Це досягнуто через **дизайн системи і її машин, що пристосовує структури, які допускають системну масштабованість** у відповідь на запити ринку та системну адаптованість до нових продуктів. Структура може бути відкоригована на системному й машинному рівнях (зміна машинних

апаратних засобів і програмного забезпечення керування; наприклад, додаючи шпинделі або змінний магазин інструментів) [203, 293].

Таким чином, верстатні системи, що реконфігуруються, відрізняються від існуючих своєю здатністю до змін. Головною перевагою є можливість мати саме задану гнучкість під продукцію, що виготовляється. Для виробників також дуже вигідним є і той факт, що при своїй здатності до гнучкості РВС значно дешевші, ніж існуючі гнучкі системи. Це пов'язане з використанням більш дешевого обладнання.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА ПРИНЦИПІВ СИСТЕМАТИЗАЦІЇ І ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ В СТРУКТУРІ ВЕРСТАТА З МПС

#### 2.1 Принципи систематизації для вирішення завдань структурного синтезу

Технологічні можливості верстатного обладнання не завжди відповідають сучасним уявленням про організацію машинобудівного виробництва й прогресивним технологіям, що потребують концентрації операцій з одночасним підвищенням його продуктивності. Таки умови здійснюються, наприклад, через багаторазове перебезування деталей, коли ставляться завдання забезпечення підвищеної точності позиціонування об'єкта обробки й технологічних, у тому числі й формотворчих рухів виконавчого органа верстата, що забезпечує інструментальну функцію [20, 130, 207].

В основу систематизації факторів з урахуванням принципів мобільності й відповідного рівня автоматизації покладені умови системно-структурного перетворення об'єктів технології. При цьому врахований основний закон існування й розвитку виробничих систем – закон доцільної єдності цілісності [90, 260]. Він зумовлює повне підпорядкування компонентного складу, структури, функції технологічної системи меті виробництва. Із цього закону випливають спеціальні закони, закономірності та принципи: забезпечення цільового або оптимального за параметрами цільової функції технологічного проектування; цільового управління; доцільного функціонування без відмов системи, а також розвитку технологічної системи. Виконання цього закону, закономірностей і принципів, що витікають із нього, дозволяє усунути диспропорції в технологічній системі,



У загальному випадку структурно-параметрична оптимізація передбачає виявлення структурних складових конструкцій і їхніх параметрів на безлічі варіантів. Варіанти конструкцій і їхні параметри повинні розглядатися в сукупності з критерієм оптимальності.

Оскільки матриця інцидентності відображає систему булевих функцій, то таку матрицю можна представити у вигляді графа, де стовпці матриці – це вершини графа, а рядки – його ребра. У цьому випадку граф відображає систему відносин параметричних і структурних властивостей об'єкта.

Матриця інцидентності використана для виявлення найкращого поєднання параметрів і структури технологічних машин. Такий підхід дозволив би здійснювати прогнозування розвитку їхніх конструкцій і забезпечити структурний синтез МПС.

Під структурним синтезом розуміється визначення найкращої структури МПС, що відповідає заданим умовам. Структура механізму, у свою чергу, визначається взаємним розташуванням, типом (у деяких випадках – кількістю) рухомих плечей МПС, шарнірів, приводів.

Основні підходи, які використовуються для вирішення завдань структурного синтезу:

1. Синтез на основі формул рухливості [259]. З використанням формул рухливості визначається кількість ланок, кількість, клас і порядок розташування кінематичних пар паралельного робота. Підхід відрізняється відносною простотою, але не бере до уваги геометрію розміщення кінематичних пар, а також при такому підході відсутня важливість раціонального вибору розміщення кінематичних пар з урахуванням траєкторії виконавчої ланки.

2. Синтез на основі кінематичних груп [36]. Цей підхід ураховує вплив тієї чи іншої структури на геометричні властивості механізму. Він дозволяє в певній мірі автоматизувати синтез. До обмежень використання

цього підходу можна віднести необхідність збереження в процесі синтезу відповідних груп рухів.

3. Синтез на основі геометрії кінематичних ланцюгів [12]. Цей підхід дозволяє вибирати структуру виходячи з бажаної форми обсягу робочого простору. Він носить оціночний характер – для спрощення математичного апарату.

4. Синтез на основі кінематичної геометрії. При виборі структури робота враховуються геометричні умови (кількість ступенів свободи, взаємне розташування) і параметри ланок. Такі завдання вирішуються з використанням теорії гвинта [152,163]. Але одержувані залежності є досить складними й важко формалізуються.

5. Реконфігурація. Суть методу полягає в зміні кінематичних структур існуючих ланцюгів або з'єднанні декількох структур ланцюгів, як правило, не більше двох. У [54, 108, 111] ці операції не мають будь-якого теоретичного опису й виконуються виходячи з логічних міркувань. Реконфігурацію доцільно використовувати як заключний етап інших методів для внесення змін у конструкцію ланцюгів механізму.

6. Кінематична розв'язка рухів. Як було зазначено вище, взаємопов'язаність рухів приводів безпосередньо відбивається на точності позиціонування платформи, а повна розв'язка рухів часто призводить до зменшення жорсткості виконавчого механізму, тому останнім часом розглядаються питання часткової розв'язки [254, 25].

Одним із типів такої розв'язки є групова розв'язка. Групова розв'язка – це така розв'язка, при якій один або кілька провідних рухів впливають відразу на кілька ведених рухів, абсолютно не впливаючи на інші.

Повна групова кінематична розв'язка приводів – це відсутність взаємовпливів між групою приводів провідних ланок, які забезпечують поступальні переміщення робочого органа паралельного робота, і групою приводів, які забезпечують його обертання. Неповна групова кінематична

розв'язка приводів – це відсутність впливу одної із цих груп на іншу при наявності зворотного впливу.

Під параметричним синтезом розуміється вибір оптимальних параметрів робота, що відповідають заданим умовам. Параметричний синтез паралельних роботів являє собою широку область досліджень і має ряд особливостей, які необхідно враховувати. Наприклад, деякі критерії, які використовуються при параметричному синтезі, є конфліктними. Прикладом таких критеріїв можуть слугувати точність і обсяг робочої області робота: **роботи мають велику точність матиме невелику робочий простір і навпаки**. Тому при параметричному синтезі завжди доводиться вибирати компромісне рішення.

Основні підходи параметричного синтезу: апроксимаційний метод, апроксимаційно-**інтернаціональний** метод, функціональні методи, метод на основі нейроподібних мереж, корекція на люфт, компенсація теплових деформацій [35, 85, 89, 162, 174, 248, 250, 252, 294].

## **2.2 Кодування інформації за допомогою системи класифікації**

За основу кодування інформації про виробничі системи запропоновано використовувати фасетну систему класифікації. Це така система класифікації, при якій безліч варіантів, що класифікується, утворює незалежні угруповання з різних аспектів класифікації. Вона не має жорсткої класифікаційної структури й наперед побудованих кінцевих угруповань. При такій системі безліч об'єктів з деяким набором ознак (фасетів), значення яких відповідають їхньому конкретному вираженню, ділиться багаторазово й незалежно. Фасети найчастіше представлені у вигляді простого переліку. Основна перевага фасетної системи класифікації – гнучкість структури. Фасетна система класифікації дозволяє не тільки утворювати нові класифікаційні угруповання з наявних фасетів, а й включати нові й виключати

старі фасети. Тому в цій системі відсутня жорстка структура класифікаційного коду й заздалегідь побудованих кінцевих угруповань. В її основі лежить аналіз, якому піддаються характерні ознаки об'єктів класифікації і виявляються основні категорії властивостей предмета. Загальний код об'єкта формується з декількох локальних кодів, кожен з яких відноситься до одного з фасетів. Таким чином, являє собою, як правило, найпростіший класифікатор із порядковою або серійно-порядковою системою кодування й містить у собі характерні ознаки об'єктів класифікації. У коді присутні лише великі червоні літери. **Воно являє** собою результат певної послідовності арифметичних дій над усіма цифрами коду й слугує формою контролю інформації, що міститься в ньому.

Основна перевага фасетного методу – гнучкість структури побудованої класифікації, оскільки зміни в одному з фасетів не впливають на інші.

Недоліками фасетної системи класифікації є неповне використання ємності, обумовлене відсутністю на практиці багатьох із можливих з'єднань фасетів; **не традиційні і незвичність** у застосуванні.

Фасетний метод класифікації щодо верстатів-роботів дає можливість описати можливі рішення для аналізу й вибору їхньої структури.

Беручи фасети у вигляді  $P_{X_1X_2}$  і  $P_{X_3X_4}$ :

1. Для позначення номера платформи використовується перша позиція –  $X_1 = 1$ , а нижні шарніри **опор Р (від англ. Hingle)** позначаються порядковим номером точки на другій позиції –  $X_2$ . Тоді частини коду 11, 12, 13, відповідно, описують першу  $P_{11}$ , другу  $P_{12}$  і третю  $P_{13}$  опори платформи 1, а частина коду 21, 22 и 23, відповідно, описують першу  $P_{21}$ , другу  $P_{22}$  і третю  $P_{23}$  опори платформи 2, з'єднані з нею верхніми шарнірами.

2. Для позначення стержнів, що з'єднують верхню й нижню платформи й утворюють ребро жорсткості, приймається символ  $R$  (від англ. *Rod*). Тоді  $R_{X_1X_2X_3X_4}$  означає стрижень, що з'єднує шарнір  $X_2$  платформи  $X_1$  з шарніром  $X_4$  платформи  $X_3$ .




На основі запропонованої класифікації можна описати структури найбільш поширених конфігурацій МПС у вигляді матриць:  $A(P_{X1X2})$  – шарнірні опорної платформи,  $B(P_{X3X4})$  – шарнірні опори інструментальної платформи,  $C(R_{X1X2X3X4})$  – стрижні (тяги, плечі), що утворюють ребра жорсткості.

Кожен з варіантів може бути Constanta (c) або Variable (v). Тоді безліч варіантів пропонується відображати у вигляді базових компонувальних рішень:



- A (c) B (c) C (c);
- A (v) B (c) C (c);
- A (c) B (v) C (c);
- A (v) B (v) C (c);
- A (c) B (c) C (v); (2.2)
- A (v) B (c) C (v) ;
- A (c) B (v) C (v);
- A (v); B (v) C (v).

Приклади запропонованої системи кодування конструкцій МПС представлені в таблиці 2.1.




Таблиця 2.1 – Приклади кодування структур МПС

		A		P <sub>X1X2</sub>			B		P <sub>X3X4</sub>		
				11	12	13			21	22	23
P <sub>X1X2</sub>	11		v			P <sub>X3X4</sub>	21	v			
	12			v			22		v		
	13				v		23			v	
C											
				P <sub>X3X4</sub>							
				21	22	23					
P <sub>X1X2</sub>	11		c								
	12			c							
	13				c						
		<p>Трипод [186] A<sub>3</sub>(v)B<sub>3</sub>(v)C<sub>3</sub>(c)</p>									

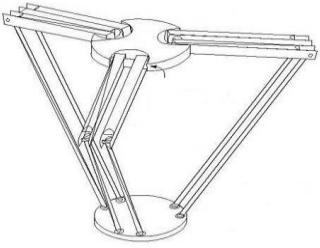



Продовження таблиці 2.1

	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2">A</th> <th colspan="3">P<sub>X1X2</sub></th> </tr> <tr> <th>11</th> <th>12</th> <th>13</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th rowspan="3">P<sub>X1X2</sub></th> <th>11</th> <td></td> <td>с</td> <td>с</td> </tr> <tr> <th>12</th> <td>с</td> <td></td> <td>с</td> </tr> <tr> <th>13</th> <td>с</td> <td>с</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	A		P <sub>X1X2</sub>			11	12	13	P <sub>X1X2</sub>	11		с	с	12	с		с	13	с	с		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2">B</th> <th colspan="3">P<sub>X3X4</sub></th> </tr> <tr> <th>21</th> <th>22</th> <th>23</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th rowspan="3">P<sub>X3X4</sub></th> <th>21</th> <td></td> <td>v</td> <td>v</td> </tr> <tr> <th>22</th> <td>v</td> <td></td> <td>v</td> </tr> <tr> <th>23</th> <td>v</td> <td>v</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	B		P <sub>X3X4</sub>			21	22	23	P <sub>X3X4</sub>	21		v	v	22	v		v	23	v	v	
A				P <sub>X1X2</sub>																																								
		11	12	13																																								
P <sub>X1X2</sub>	11		с	с																																								
	12	с		с																																								
	13	с	с																																									
B		P <sub>X3X4</sub>																																										
		21	22	23																																								
P <sub>X3X4</sub>	21		v	v																																								
	22	v		v																																								
	23	v	v																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2">C</th> <th colspan="3">P<sub>X3X4</sub></th> </tr> <tr> <th>21</th> <th>22</th> <th>23</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th rowspan="3">P<sub>X1X2</sub></th> <th>11</th> <td>с</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <th>12</th> <td></td> <td>с</td> <td></td> </tr> <tr> <th>13</th> <td></td> <td></td> <td>с</td> </tr> </tbody> </table>	C		P <sub>X3X4</sub>			21	22	23	P <sub>X1X2</sub>	11	с			12		с		13			с	 <p>Промислові роботи Tricept [133,224] – A<sub>3</sub>(с)B<sub>3</sub>(v)C<sub>3</sub>(с)</p>																						
C			P <sub>X3X4</sub>																																									
		21	22	23																																								
P <sub>X1X2</sub>	11	с																																										
	12		с																																									
	13			с																																								
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2">A</th> <th colspan="3">P<sub>X1X2</sub></th> </tr> <tr> <th>11</th> <th>12</th> <th>13</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th rowspan="3">P<sub>X1X2</sub></th> <th>11</th> <td></td> <td>с</td> <td>с</td> </tr> <tr> <th>12</th> <td>с</td> <td></td> <td>с</td> </tr> <tr> <th>13</th> <td>с</td> <td>с</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	A		P <sub>X1X2</sub>			11	12	13	P <sub>X1X2</sub>	11		с	с	12	с		с	13	с	с		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2">B</th> <th colspan="3">P<sub>X3X4</sub></th> </tr> <tr> <th>21</th> <th>22</th> <th>23</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th rowspan="3">P<sub>X3X4</sub></th> <th>21</th> <td></td> <td>с</td> <td>с</td> </tr> <tr> <th>22</th> <td>с</td> <td></td> <td>с</td> </tr> <tr> <th>23</th> <td>с</td> <td>с</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	B		P <sub>X3X4</sub>			21	22	23	P <sub>X3X4</sub>	21		с	с	22	с		с	23	с	с	
A				P <sub>X1X2</sub>																																								
		11	12	13																																								
P <sub>X1X2</sub>	11		с	с																																								
	12	с		с																																								
	13	с	с																																									
B		P <sub>X3X4</sub>																																										
		21	22	23																																								
P <sub>X3X4</sub>	21		с	с																																								
	22	с		с																																								
	23	с	с																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2">C</th> <th colspan="3">P<sub>X3X4</sub></th> </tr> <tr> <th>21</th> <th>22</th> <th>23</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th rowspan="3">P<sub>X1X2</sub></th> <th>11</th> <td>v</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <th>12</th> <td></td> <td>v</td> <td></td> </tr> <tr> <th>13</th> <td></td> <td></td> <td>v</td> </tr> </tbody> </table>	C		P <sub>X3X4</sub>			21	22	23	P <sub>X1X2</sub>	11	v			12		v		13			v	 <p>Трипод [185] – A<sub>3</sub>(с)B<sub>3</sub>(с)C<sub>3</sub>(v)</p>																						
C			P <sub>X3X4</sub>																																									
		21	22	23																																								
P <sub>X1X2</sub>	11	v																																										
	12		v																																									
	13			v																																								

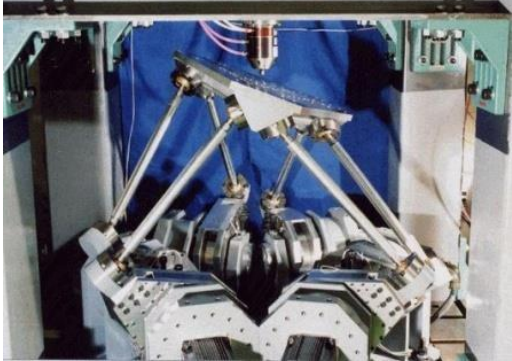
Продовження таблиці 2.1

	<p style="text-align: center;">A</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2"></th> <th colspan="4">P<sub>X1X2</sub></th> </tr> <tr> <th>11</th> <th>12</th> <th>13</th> <th>14</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th rowspan="4">P<sub>X1X2</sub></th> <th>11</th> <td>v</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <th>12</th> <td></td> <td>v</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <th>13</th> <td></td> <td></td> <td>v</td> <td></td> </tr> <tr> <th>14</th> <td></td> <td></td> <td></td> <td>v</td> </tr> </tbody> </table>			P <sub>X1X2</sub>				11	12	13	14	P <sub>X1X2</sub>	11	v				12		v			13			v		14				v	<p style="text-align: center;">B</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2"></th> <th colspan="4">P<sub>X3X4</sub></th> </tr> <tr> <th>21</th> <th>22</th> <th>23</th> <th>24</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th rowspan="4">P<sub>X3X4</sub></th> <th>21</th> <td>c</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <th>22</th> <td></td> <td>c</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <th>23</th> <td></td> <td></td> <td>c</td> <td></td> </tr> <tr> <th>24</th> <td></td> <td></td> <td></td> <td>c</td> </tr> </tbody> </table>			P <sub>X3X4</sub>				21	22	23	24	P <sub>X3X4</sub>	21	c				22		c			23			c		24				c
				P <sub>X1X2</sub>																																																												
		11	12	13	14																																																											
P <sub>X1X2</sub>	11	v																																																														
	12		v																																																													
	13			v																																																												
	14				v																																																											
		P <sub>X3X4</sub>																																																														
		21	22	23	24																																																											
P <sub>X3X4</sub>	21	c																																																														
	22		c																																																													
	23			c																																																												
	24				c																																																											
<p style="text-align: center;">C</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2"></th> <th colspan="4">P<sub>X3X4</sub></th> </tr> <tr> <th>21</th> <th>22</th> <th>23</th> <th>24</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th rowspan="4">P<sub>X1X2</sub></th> <th>11</th> <td>c</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <th>12</th> <td></td> <td>c</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <th>13</th> <td></td> <td></td> <td>c</td> <td></td> </tr> <tr> <th>14</th> <td></td> <td></td> <td></td> <td>c</td> </tr> </tbody> </table>			P <sub>X3X4</sub>				21	22	23	24	P <sub>X1X2</sub>	11	c				12		c			13			c		14				c	 <p>[182] – A<sub>4</sub>(v)B<sub>4</sub>(c)C<sub>4</sub>(c)</p>																																
			P <sub>X3X4</sub>																																																													
		21	22	23	24																																																											
P <sub>X1X2</sub>	11	c																																																														
	12		c																																																													
	13			c																																																												
	14				c																																																											
	<p style="text-align: center;">A</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2"></th> <th colspan="3">P<sub>X1X2</sub></th> </tr> <tr> <th>11</th> <th>12</th> <th>13</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th rowspan="3">P<sub>X1X2</sub></th> <th>11</th> <td></td> <td>v</td> <td>v</td> </tr> <tr> <th>12</th> <td>v</td> <td></td> <td>v</td> </tr> <tr> <th>13</th> <td>v</td> <td>v</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			P <sub>X1X2</sub>			11	12	13	P <sub>X1X2</sub>	11		v	v	12	v		v	13	v	v		<p style="text-align: center;">B</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2"></th> <th colspan="3">P<sub>X3X4</sub></th> </tr> <tr> <th>21</th> <th>22</th> <th>23</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th rowspan="3">P<sub>X3X4</sub></th> <th>21</th> <td></td> <td>c</td> <td>c</td> </tr> <tr> <th>22</th> <td>c</td> <td></td> <td>c</td> </tr> <tr> <th>23</th> <td>c</td> <td>c</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			P <sub>X3X4</sub>			21	22	23	P <sub>X3X4</sub>	21		c	c	22	c		c	23	c	c																					
				P <sub>X1X2</sub>																																																												
		11	12	13																																																												
P <sub>X1X2</sub>	11		v	v																																																												
	12	v		v																																																												
	13	v	v																																																													
		P <sub>X3X4</sub>																																																														
		21	22	23																																																												
P <sub>X3X4</sub>	21		c	c																																																												
	22	c		c																																																												
	23	c	c																																																													
<p style="text-align: center;">C</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2"></th> <th colspan="3">P<sub>X3X4</sub></th> </tr> <tr> <th>21</th> <th>22</th> <th>23</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th rowspan="3">P<sub>X1X2</sub></th> <th>11</th> <td>c</td> <td></td> <td>c</td> </tr> <tr> <th>12</th> <td></td> <td>c</td> <td>c</td> </tr> <tr> <th>13</th> <td>c</td> <td>c</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			P <sub>X3X4</sub>			21	22	23	P <sub>X1X2</sub>	11	c		c	12		c	c	13	c	c		 <p>Ротопод [183] – A<sub>3</sub>(v)B<sub>3</sub>(c)C<sub>3</sub>(c)</p>																																										
			P <sub>X3X4</sub>																																																													
		21	22	23																																																												
P <sub>X1X2</sub>	11	c		c																																																												
	12		c	c																																																												
	13	c	c																																																													
	 <p>δ-механізм [11,19,133,224] – A<sub>6</sub>(v)B<sub>6</sub>(c)C<sub>6</sub>(c)</p>																																																															

Продовження таблиці 2.1

	<p style="text-align: center;">A</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2"></th> <th colspan="3">P<sub>X1X2</sub></th> </tr> <tr> <th>11</th> <th>12</th> <th>13</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th rowspan="3">P<sub>X1X2</sub></th> <th>11</th> <td></td> <td>c</td> <td>c</td> </tr> <tr> <th>12</th> <td>c</td> <td></td> <td>c</td> </tr> <tr> <th>13</th> <td>c</td> <td>c</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			P <sub>X1X2</sub>			11	12	13	P <sub>X1X2</sub>	11		c	c	12	c		c	13	c	c		<p style="text-align: center;">B</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2"></th> <th colspan="3">P<sub>X3X4</sub></th> </tr> <tr> <th>21</th> <th>22</th> <th>23</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th rowspan="3">P<sub>X3X4</sub></th> <th>21</th> <td></td> <td>c</td> <td>c</td> </tr> <tr> <th>22</th> <td>c</td> <td></td> <td>c</td> </tr> <tr> <th>23</th> <td>c</td> <td>c</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			P <sub>X3X4</sub>			21	22	23	P <sub>X3X4</sub>	21		c	c	22	c		c	23	c	c	
				P <sub>X1X2</sub>																																								
		11	12	13																																								
P <sub>X1X2</sub>	11		c	c																																								
	12	c		c																																								
	13	c	c																																									
		P <sub>X3X4</sub>																																										
		21	22	23																																								
P <sub>X3X4</sub>	21		c	c																																								
	22	c		c																																								
	23	c	c																																									
<p style="text-align: center;">C</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2"></th> <th colspan="3">P<sub>X3X4</sub></th> </tr> <tr> <th>21</th> <th>22</th> <th>23</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th rowspan="3">P<sub>X1X2</sub></th> <th>11</th> <td>v</td> <td></td> <td>v</td> </tr> <tr> <th>12</th> <td></td> <td>v</td> <td>v</td> </tr> <tr> <th>13</th> <td>v</td> <td>v</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			P <sub>X3X4</sub>			21	22	23	P <sub>X1X2</sub>	11	v		v	12		v	v	13	v	v		<div style="text-align: center;">  <p>δ-механізм [11,19,133,224] – A<sub>6</sub>(c)B<sub>6</sub>(c)C<sub>6</sub>(v)</p> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div> <p style="text-align: center;">Гексапод [181,184] – A<sub>6</sub>(c)B<sub>6</sub>(c)C<sub>6</sub>(v)</p>																						
			P <sub>X3X4</sub>																																									
		21	22	23																																								
P <sub>X1X2</sub>	11	v		v																																								
	12		v	v																																								
	13	v	v																																									
	<p style="text-align: center;">A</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2"></th> <th colspan="3">P<sub>X1X2</sub></th> </tr> <tr> <th>11</th> <th>12</th> <th>13</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th rowspan="3">P<sub>X1X2</sub></th> <th>11</th> <td></td> <td>c</td> <td>c</td> </tr> <tr> <th>12</th> <td>c</td> <td></td> <td>c</td> </tr> <tr> <th>13</th> <td>c</td> <td>c</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			P <sub>X1X2</sub>			11	12	13	P <sub>X1X2</sub>	11		c	c	12	c		c	13	c	c		<p style="text-align: center;">B</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2"></th> <th colspan="3">P<sub>X3X4</sub></th> </tr> <tr> <th>21</th> <th>22</th> <th>23</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th rowspan="3">P<sub>X3X4</sub></th> <th>21</th> <td></td> <td>v</td> <td>v</td> </tr> <tr> <th>22</th> <td>v</td> <td></td> <td>v</td> </tr> <tr> <th>23</th> <td>v</td> <td>v</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			P <sub>X3X4</sub>			21	22	23	P <sub>X3X4</sub>	21		v	v	22	v		v	23	v	v	
				P <sub>X1X2</sub>																																								
		11	12	13																																								
P <sub>X1X2</sub>	11		c	c																																								
	12	c		c																																								
	13	c	c																																									
		P <sub>X3X4</sub>																																										
		21	22	23																																								
P <sub>X3X4</sub>	21		v	v																																								
	22	v		v																																								
	23	v	v																																									
<p style="text-align: center;">C</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2"></th> <th colspan="3">P<sub>X3X4</sub></th> </tr> <tr> <th>21</th> <th>22</th> <th>23</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th rowspan="3">P<sub>X1X2</sub></th> <th>11</th> <td>v</td> <td></td> <td>v</td> </tr> <tr> <th>12</th> <td></td> <td>v</td> <td>v</td> </tr> <tr> <th>13</th> <td>v</td> <td>v</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			P <sub>X3X4</sub>			21	22	23	P <sub>X1X2</sub>	11	v		v	12		v	v	13	v	v		<div style="text-align: center;">  <p>Промисловий робот [11,19,100, 133,224] – A<sub>3</sub>(c)B<sub>3</sub>(v)C<sub>3</sub>(v)</p> </div>																						
			P <sub>X3X4</sub>																																									
		21	22	23																																								
P <sub>X1X2</sub>	11	v		v																																								
	12		v	v																																								
	13	v	v																																									

Продовження таблиці 2.1

	<table border="1"> <tr> <td colspan="2" rowspan="2">A</td> <td colspan="3">P<sub>X1X2</sub></td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>12</td> <td>13</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">P<sub>X1X2</sub></td> <td>11</td> <td></td> <td>v</td> <td>v</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>v</td> <td></td> <td>v</td> </tr> <tr> <td>13</td> <td>v</td> <td>v</td> <td></td> </tr> </table>	A		P <sub>X1X2</sub>			11	12	13	P <sub>X1X2</sub>	11		v	v	12	v		v	13	v	v		<table border="1"> <tr> <td colspan="2" rowspan="2">B</td> <td colspan="3">P<sub>X3X4</sub></td> </tr> <tr> <td>21</td> <td>22</td> <td>23</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">P<sub>X3X4</sub></td> <td>21</td> <td></td> <td>c</td> <td>c</td> </tr> <tr> <td>22</td> <td>c</td> <td></td> <td>c</td> </tr> <tr> <td>23</td> <td>c</td> <td>c</td> <td></td> </tr> </table>	B		P <sub>X3X4</sub>			21	22	23	P <sub>X3X4</sub>	21		c	c	22	c		c	23	c	c	
A				P <sub>X1X2</sub>																																								
		11	12	13																																								
P <sub>X1X2</sub>	11		v	v																																								
	12	v		v																																								
	13	v	v																																									
B		P <sub>X3X4</sub>																																										
		21	22	23																																								
P <sub>X3X4</sub>	21		c	c																																								
	22	c		c																																								
	23	c	c																																									
<table border="1"> <tr> <td colspan="2" rowspan="2">C</td> <td colspan="3">P<sub>X3X4</sub></td> </tr> <tr> <td>21</td> <td>22</td> <td>23</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">P<sub>X1X2</sub></td> <td>11</td> <td>v</td> <td></td> <td>v</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td></td> <td>v</td> <td>v</td> </tr> <tr> <td>13</td> <td>v</td> <td>v</td> <td></td> </tr> </table>	C		P <sub>X3X4</sub>			21	22	23	P <sub>X1X2</sub>	11	v		v	12		v	v	13	v	v		 <p>Ротопод [133,224] – A<sub>6</sub>(v)B<sub>6</sub>(c)C<sub>6</sub>(v)</p>																						
C			P <sub>X3X4</sub>																																									
		21	22	23																																								
P <sub>X1X2</sub>	11	v		v																																								
	12		v	v																																								
	13	v	v																																									
	<table border="1"> <tr> <td colspan="2" rowspan="2">A</td> <td colspan="3">P<sub>X1X2</sub></td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>12</td> <td>13</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">P<sub>X1X2</sub></td> <td>11</td> <td></td> <td>v</td> <td>v</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>v</td> <td></td> <td>v</td> </tr> <tr> <td>13</td> <td>v</td> <td>v</td> <td></td> </tr> </table>	A		P <sub>X1X2</sub>			11	12	13	P <sub>X1X2</sub>	11		v	v	12	v		v	13	v	v		<table border="1"> <tr> <td colspan="2" rowspan="2">B</td> <td colspan="3">P<sub>X3X4</sub></td> </tr> <tr> <td>21</td> <td>22</td> <td>23</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">P<sub>X3X4</sub></td> <td>21</td> <td></td> <td>v</td> <td>v</td> </tr> <tr> <td>22</td> <td>v</td> <td></td> <td>v</td> </tr> <tr> <td>23</td> <td>v</td> <td>v</td> <td></td> </tr> </table>	B		P <sub>X3X4</sub>			21	22	23	P <sub>X3X4</sub>	21		v	v	22	v		v	23	v	v	
A				P <sub>X1X2</sub>																																								
		11	12	13																																								
P <sub>X1X2</sub>	11		v	v																																								
	12	v		v																																								
	13	v	v																																									
B		P <sub>X3X4</sub>																																										
		21	22	23																																								
P <sub>X3X4</sub>	21		v	v																																								
	22	v		v																																								
	23	v	v																																									
<table border="1"> <tr> <td colspan="2" rowspan="2">C</td> <td colspan="3">P<sub>X3X4</sub></td> </tr> <tr> <td>21</td> <td>22</td> <td>23</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">P<sub>X1X2</sub></td> <td>11</td> <td>c</td> <td></td> <td>c</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td></td> <td>c</td> <td>c</td> </tr> <tr> <td>13</td> <td>c</td> <td>c</td> <td></td> </tr> </table>	C		P <sub>X3X4</sub>			21	22	23	P <sub>X1X2</sub>	11	c		c	12		c	c	13	c	c		<p>[11,19, 133,224,] – A<sub>6</sub>(v)B<sub>6</sub>(v)C<sub>6</sub>(c)</p>																						
C			P <sub>X3X4</sub>																																									
		21	22	23																																								
P <sub>X1X2</sub>	11	c		c																																								
	12		c	c																																								
	13	c	c																																									

Застосування системи кодування, що запропонована в роботі, дозволяє встановити зв'язок між структурою і очікуваною ефективністю проектного верстата-робота на основі МПС і забезпечити їхню систематизацію.

## 2.3 Використання методу зв'язкових графів і матриць інцидентності для структурного аналізу мобільних верстатів-роботів із МПС

З метою пошуку найкращого в оптимізаційній постановці вирішення задачі вибору поєднання структури, компонування й параметрів металообробного обладнання для багатомономенклатурного виробництва з урахуванням багато зв'язаних процесів, які супроводжують виготовлення машинобудівних виробів від заготовок окремих деталей до випробування виготовлених вузлів і машин, пропонується здійснювати пошук маршруту обходу вершин графа, побудованого за матрицею інцидентності. Цей маршрут є своєрідним кодом, що дозволяє визначити актуальні для ситуації, що описується матрицею інцидентності компоновку, структуру й параметри технологічних машин і умови їхнього застосування. У роботі [214] доведена перспективність застосування методу зв'язкових графів, оскільки він має інваріантність до фізичної природи об'єктів дослідження, що розширює можливості інженерного аналізу й моделювання динаміки МПС. Як приклад розглянуто матрицю інцидентності виду  $n \times m = 6 \times 12$ , побудовану для технологічного обладнання механоскладальних цехів машинобудівних підприємств, яка враховує параметричні й структурні складові основного й допоміжного обладнання ділянкою механообробки і ділянок складання машин:

$$\begin{matrix} 1, & 0, & 1, & 0, & 0, & 0, & 1, & 0, & 1, & 0, & 0, & 0 \\ -1, & 1, & 0, & 1, & 0, & 0, & 0, & 1, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & -1, & -1, & 0, & 1, & 1, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & -1, & 0, & 0, & -1, & 0, & 0, & 1, & 0, & 1 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & -1, & 0, & 0, & -1, & 0, & -1, & 1, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & -1, & 0, & 0, & -1, & 0, & -1, & -1 \end{matrix} \quad (2.3)$$

Обхід графа має наступний алгоритм:

- 1) забезпечити суму значень матриці по стовпцях на відповідність нулю;
- 2) забезпечити суму активних вершин графа в стовпці матриці на відповідність двом;

3) двічі пройти кожну вершину графа й відзначити її в масиві позначок як пройдену (реалізується циклом по стовпцю);

4) переглянути список інцидентності щойно пройдені вершини й до кожної не пройдені вершини зі списку застосувати рекурсивно пункти 1, 2 і 3 даного алгоритму (реалізується циклом по рядку, вкладеним у перший цикл по стовпцю, і ще одним циклом по стовпчику, вкладеним у цикл по рядку);

5) перейти до пункту 1.

Повний лістинг всієї програми, у якій міститься вже приведений масив, представлений наступним чином:

```
#include <iostream>

using namespace std;

const int n = 6;
const int m = 12;

int iArr[n][m] = { 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0,
                 -1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0,
                 0, -1, -1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
                 0, 0, 0, -1, 0, 0, -1, 0, 0, 1, 0, 1,
                 0, 0, 0, 0, -1, 0, 0, -1, 0, -1, 1, 0,
                 0, 0, 0, 0, 0, -1, 0, 0, -1, 0, -1, -1 };
bool used[n];

int j = 1;
int r = 1;
int i = 1;
int k = 1;

void dfs(int t) {

    used[t] = true;

    int p;

    for (i = k; i < n; i++)
    {
        j = r;
        if ((iArr[i][j] != 0) && (!used[i]))
        {
            used[i] = true;
            p = i;

            cout << i << « «;

            for (j = 0; j < m; j++)
            {
                i == p;
                if (iArr[i][j] != 0)
```

```

        {
            r = j;

            for (k = 0; k < n; k++)
            {
                j == r;

                if ((iArr[k][j] != 0) && (!used[k]))
                {
                    dfs(i);
                }
            }
        }
    }
}

int main()
{
    for (int i = 0; i < n; i++)
    {
        used[i] = false;
        for (int j = 0; j < m; j++)
            cout << " " << iArr[i][j];
        cout << endl;
    }

    int from;
    cout << «From >> «;
    cin >> from;

    cout << «Order: « << endl;

    dfs(from);

    cout << endl;

    return 0;
}

```

У результаті обходу графа, наведеного в цьому прикладі, виводиться наступна послідовність вершин: 1, 2, 4, 5, 3, 6, 4, 1, 3, 6, 5, 2. Знайдене рішення відповідає умовам циклу Ейлера з алгоритмом Флері для обходу вершин таким чином, щоб двічі не проходити через одне й те ж ребро графа інцидентності. Саме таким чином забезпечується максимальна жорсткість конструкції МПС. Наведена вище матриця інцидентності дозволяє також сформулювати принцип відповідності структури виробничої системи її цілям наступним чином: структура й склад виробничої системи повинні забезпечувати процес досягнення мети найкращим чином.



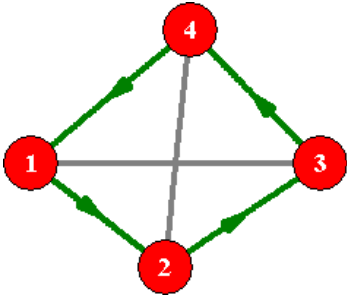
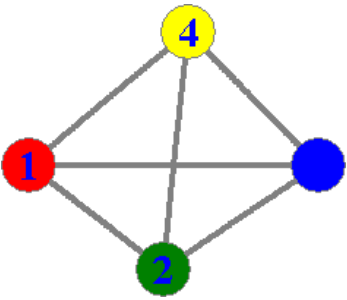
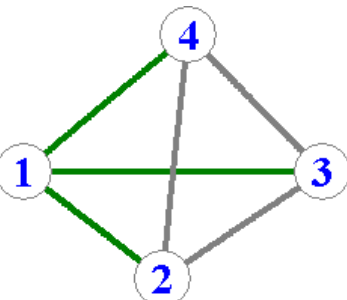
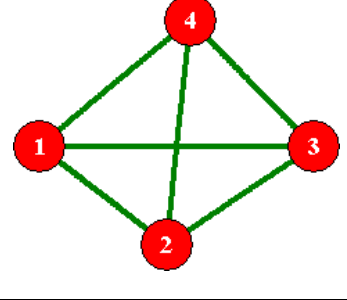
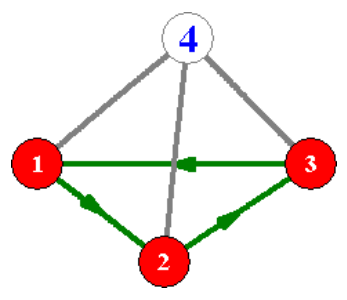
З використанням виявленої структурно-параметричної послідовності варіанта, відповідного матриці інцидентності, сформульована оновлена концепція реконфігурованого виробництва. Основою цієї концепції реконфігурованих виробництв є створення трансформованої системи графів, відповідних МПС, на базі кожної виконавчої ланки МСМВ у технологічному ланцюгу виготовлення виробу.

Кожне компоновальне рішення по матриці інцидентності може бути представлено графом зв'язків у МПС. Приклади структур, що застосовані для мобільних верстатів-роботів, наведені в таблиці 2.2.

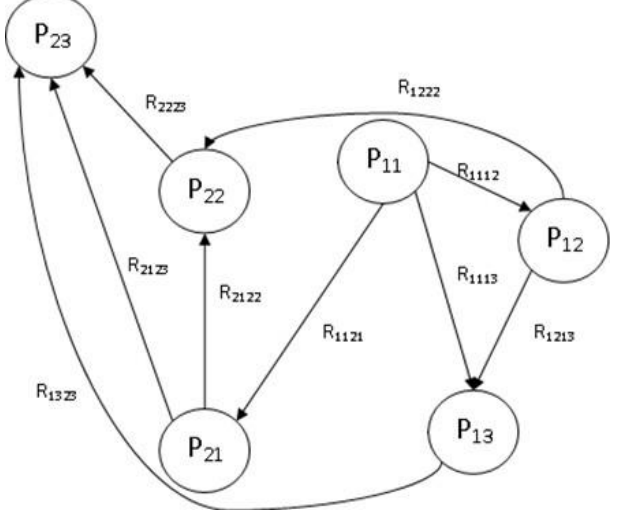
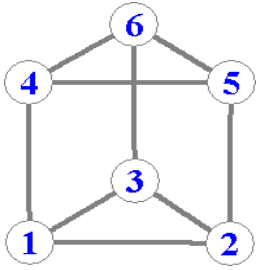
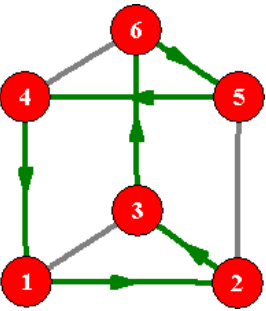
Таблиця 2.2 – Приклади структур, що застосовані для мобільних верстатів-роботів

Для конструкцій типу «простий трипод»																										
Граф структури	Рівняння, що встановлюють зв'язок між структурними елементами																									
	$R_{1121} + R_{1113} + R_{1112} = 0$ $-R_{1112} + R_{1221} + R_{1213} = 0$ $R_{1321} - R_{1113} - R_{1213} = 0$ $-R_{1121} - R_{1221} - R_{1321} = 0$																									
<p>Прийняті позначення:</p> <p>1) вершини графа: 1 – <math>P_{11}</math>; 2 – <math>P_{12}</math>; 3 – <math>P_{13}</math>; 4 – <math>P_{21}</math>;</p> <p>2) ребра графа: 1 – <math>R_{1112}</math>; 2 – <math>R_{1213}</math>; 3 – <math>R_{1113}</math>; 4 – <math>R_{1121}</math>; 5 – <math>R_{1221}</math>; 6 – <math>R_{1321}</math></p>	<p>Матриця інцидентності</p> <table border="1"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>-1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>-1</td><td>-1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr> </table>		1	0	1	1	0	0	-1	1	0	0	1	0	0	-1	-1	0	0	1	0	0	0	-1	-1	-1
1	0	1	1	0	0																					
-1	1	0	0	1	0																					
0	-1	-1	0	0	1																					
0	0	0	-1	-1	-1																					
	<p>Граф не має ейлерового циклу</p> <p>Граф є пов'язаним</p> <p>Радіус графа дорівнює 1</p> <p>Діаметр дорівнює 1</p> <p>Граф не є деревом</p> <p>Граф є планарним</p>	<p>Матриця суміжності</p> <table border="1"> <tr><td>0,1,1,1</td></tr> <tr><td>1,0,1,1</td></tr> <tr><td>1,1,0,1</td></tr> <tr><td>1,1,1,0</td></tr> </table>	0,1,1,1	1,0,1,1	1,1,0,1	1,1,1,0																				
0,1,1,1																										
1,0,1,1																										
1,1,0,1																										
1,1,1,0																										

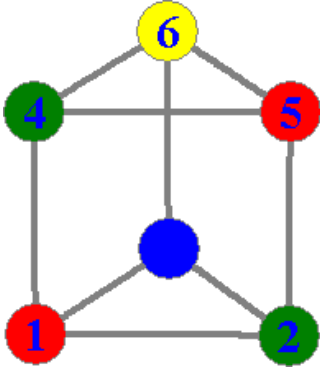
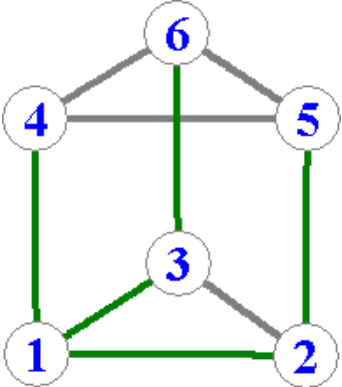
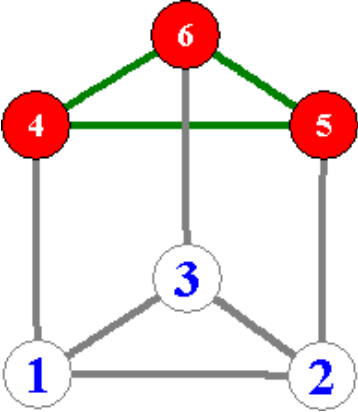
Продовження таблиці 2.2

	<p>Граф має гамільтонів цикл 1 - 2 - 3 - 4 - 1</p>
	<p>Хроматичне число графа 4</p>
	<p>Граф має мінімальний кістяк 3</p>
	<p>Максимальний клік графа дорівнює 4 Вершини, що входять до максимального кліку: 4, 3, 2, 1</p>
	<p>Граф містить цикли. Один із них представлений нижче: 1 - 2 - 3 - 1</p>

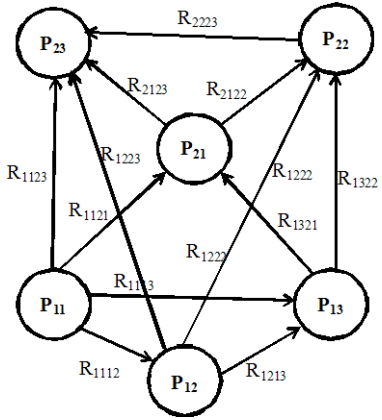
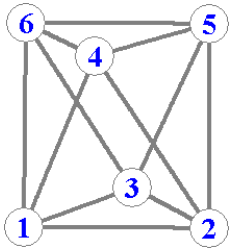
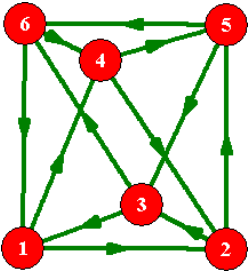
Продовження таблиці 2.2

Для конструкцій типу «трипод»																																																																	
<p>Граф структури</p>	<p>Рівняння, що встановлюють зв'язок між структурними елементами</p>																																																																
	$R_{1112} + R_{1113} - R_{1121} = 0$ $R_{1112} - R_{1213} - R_{1222} = 0$ $R_{1113} + R_{1213} - R_{1321} = 0$ $R_{1121} - R_{2122} - R_{2123} = 0$ $R_{1222} + R_{2122} - R_{2223} = 0$ $R_{2122} + R_{2223} + R_{1323} = 0$																																																																
<p>Прийняті позначення:</p> <p>1) вершини графа: 1 – <math>R_{11}</math>; 2 – <math>R_{12}</math>; 3 – <math>R_{13}</math>; 4 – <math>R_{21}</math>; 5 – <math>R_{11}</math>; 6 – <math>R_{11}</math>:</p> <p>2) ребра графа: 1 – <math>R_{1112}</math>; 2 – <math>R_{1213}</math>; 3 – <math>R_{1113}</math>; 4 – <math>R_{2122}</math>; 5 – <math>R_{2123}</math>; 6 – <math>R_{2223}</math>; 7 – <math>R_{1222}</math>; 8 – <math>R_{1121}</math>; 9 – <math>R_{1323}</math></p>	<p>Матриця інцидентності</p> <table border="1" data-bbox="863 1043 1378 1312"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>-1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>-</td><td>-1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>-1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>-1</td><td>1</td><td>0</td><td>-1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>-1</td><td>-1</td><td>0</td><td>0</td><td>-1</td></tr> </table>		1	0	1	0	0	0	0	1	0	-1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	-	-1	0	0	0	0	0	1	1									0	0	0	1	0	1	0	-1	0	0	0	0	-1	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	-1
1	0	1	0	0	0	0	1	0																																																									
-1	1	0	0	0	0	1	0	0																																																									
0	-	-1	0	0	0	0	0	1																																																									
1																																																																	
0	0	0	1	0	1	0	-1	0																																																									
0	0	0	-1	1	0	-1	0	0																																																									
0	0	0	0	-1	-1	0	0	-1																																																									
	<p>Граф не має ейлерового циклу                  Граф є пов'язаним                  Радіус графа дорівнює 2                  Діаметр дорівнює 2                  Граф не є деревом</p>	<p>Матриця суміжності</p> <table border="1" data-bbox="1171 1420 1337 1675"> <tr><td>0,1,1,1,0,0</td></tr> <tr><td>1,0,1,0,1,0</td></tr> <tr><td>1,1,0,0,0,1</td></tr> <tr><td>1,0,0,0,1,1</td></tr> <tr><td>0,1,0,1,0,1</td></tr> <tr><td>0,0,1,1,1,0</td></tr> </table>	0,1,1,1,0,0	1,0,1,0,1,0	1,1,0,0,0,1	1,0,0,0,1,1	0,1,0,1,0,1	0,0,1,1,1,0																																																									
0,1,1,1,0,0																																																																	
1,0,1,0,1,0																																																																	
1,1,0,0,0,1																																																																	
1,0,0,0,1,1																																																																	
0,1,0,1,0,1																																																																	
0,0,1,1,1,0																																																																	
		<p>Граф має гамільтонів цикл                  Шлях 1 - 2 - 3 - 6 - 5 - 4 - 1</p>																																																															

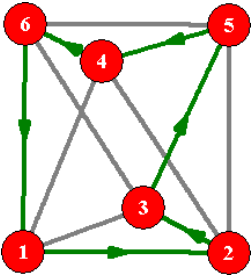
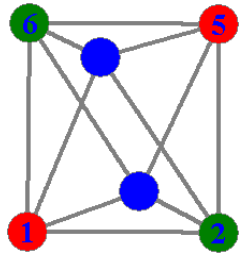
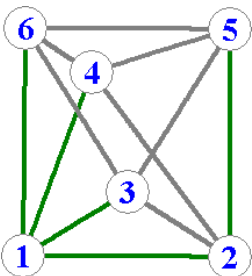
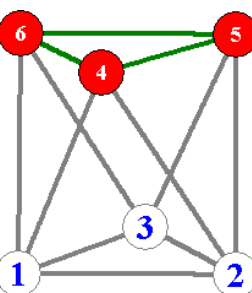
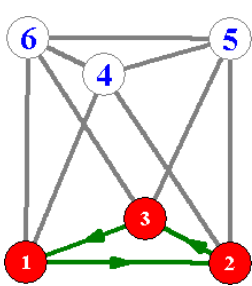
Продовження таблиці 2.2

	<p>Хроматичне число графа 4</p>
	<p>Граф має мінімальний кістяк 5</p>
	<p>Максимальний клік графа дорівнює 3 Вершини, що входять до максимального кліку: 6, 5, 4</p>

Продовження таблиці 2.2

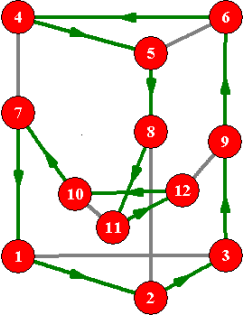
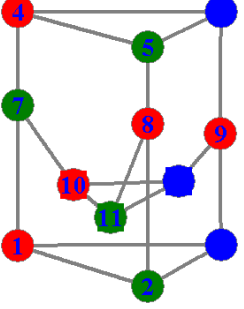
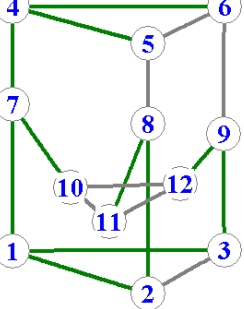
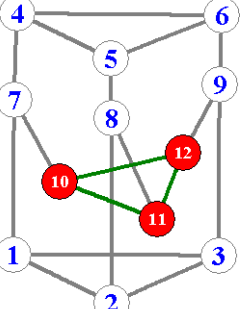
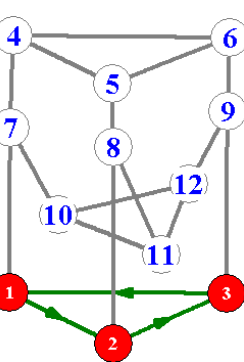
Для конструкцій типу «гексапод»																																																								
Граф структури	Рівняння, що встановлюють зв'язок між структурними елементами																																																							
	$R_{1112} + R_{1113} + R_{1121} + R_{1123} = 0$ $-R_{1112} + R_{1223} + R_{1222} + R_{1213} = 0$ $-R_{1213} - R_{1113} + R_{1321} + R_{1322} = 0$ $R_{2123} + R_{2122} - R_{1321} + R_{1121} = 0$ $R_{2223} - R_{2122} - R_{1222} - R_{1333} = 0$ $-R_{1123} - R_{1223} - R_{2123} - R_{2223} = 0$																																																							
<p>Прийняті позначення:</p> <p>1) вершини графа: 1 – <math>R_{11}</math>; 2 – <math>R_{12}</math>; 3 – <math>R_{13}</math>; 4 – <math>R_{21}</math>; 5 – <math>R_{11}</math>; 6 – <math>R_{11}</math>;</p> <p>2) ребра графа: 1 – <math>R_{1112}</math>; 2 – <math>R_{1213}</math>; 3 – <math>R_{1113}</math>; 4 – <math>R_{2122}</math>; 5 – <math>R_{2123}</math>; 6 – <math>R_{2223}</math>; 7 – <math>R_{1123}</math>; 8 – <math>R_{1121}</math>; 9 – <math>R_{1223}</math>; 10 – <math>R_{1222}</math>; 11 – <math>R_{1321}</math>; 12 – <math>R_{1322}</math>.</p>	<p>Матриця інцидентності</p> <table border="1"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>-1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>-1</td><td>-1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>-1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>-1</td><td>1</td><td>0</td><td>-1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>-1</td><td>-1</td><td>0</td><td>0</td><td>-1</td></tr> </table>		1	0	1	0	0	0	0	1	0	-1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	-1	0	0	0	0	-1	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	-1
1	0	1	0	0	0	0	1	0																																																
-1	1	0	0	0	0	1	0	0																																																
0	-1	-1	0	0	0	0	0	1																																																
0	0	0	1	0	1	0	-1	0																																																
0	0	0	-1	1	0	-1	0	0																																																
0	0	0	0	-1	-1	0	0	-1																																																
	<p>Граф є пов'язаним Радіус графа дорівнює 2 Діаметр дорівнює 2 Граф не є деревом Граф планарним</p>	<p>Матриця суміжності</p> <p>0,1,1,1,0,1 1,0,1,1,1,0 1,1,0,0,1,1 1,1,0,0,1,1 0,1,1,1,0,1 1,0,1,1,1,0</p>																																																						
	<p>Граф має ейлерів цикл 6 - 1 - 2 - 3 - 1 - 4 - 2 - 5 - 3 - 6 - 4 - 5 - 6</p>																																																							

Продовження таблиці 2.2

	<p>Граф має гамільтонів цикл 1 - 2 - 3 - 5 - 4 - 6 - 1</p>
	<p>Хроматичне число графа 3</p>
	<p>Граф має мінімальний кістяк 5</p>
	<p>Максимальний клік графа дорівнює 3 Вершини, що входять до максимального кліку: 6, 5, 4</p>
	<p>Граф містить цикли. Один із них представлений нижче: 1 - 2 - 3 - 1</p>

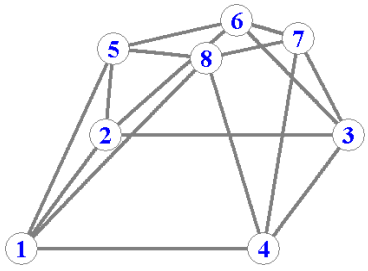
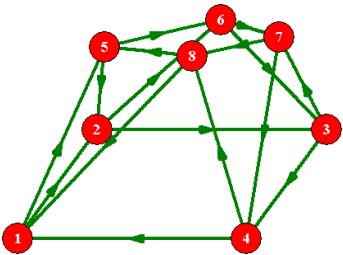
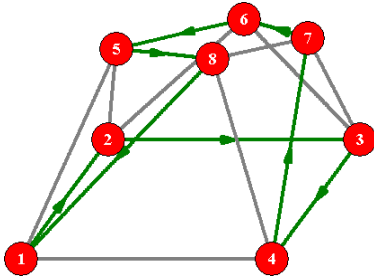
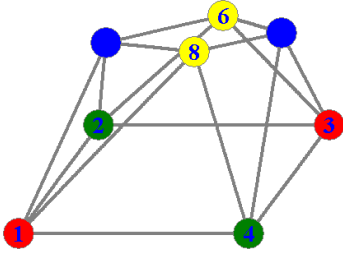
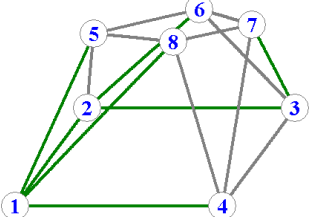
Для конструцій типу «дельта»		
Граф структури	Рівняння, що встановлюють зв'язок між структурними елементами	
	$R_{1112} + R_{1113} + R_{1131} = 0;$ $R_{1213} + R_{1232} - R_{1112} = 0;$ $R_{1333} - R_{1113} - R_{1213} = 0;$ $R_{2123} + R_{2122} + R_{3121} = 0;$ $R_{2223} - R_{2122} + R_{3222} = 0;$ $-R_{2123} - R_{2223} + R_{3323} = 0;$ $-R_{3121} + R_{3141} - R_{1131} = 0;$ $-R_{3222} + R_{3242} - R_{1232} = 0;$ $-R_{3323} + R_{3343} - R_{1333} = 0;$ $R_{4142} + R_{4143} - R_{3141} = 0;$ $R_{4243} - R_{4142} - R_{3242} = 0;$ $-R_{4143} - R_{4243} - R_{3343} = 0;$ $R_{1131} + R_{3121} + R_{3141} = R_{1232} + R_{3222} + R_{3242} = R_{1333} +$ $Const. R_{1131} = R_{3121} = R_{3141} = R_{1131} = R_{3121} = R_{3141}$	
<p>Прийняті позначення:</p> <p>1) вершини графа: 1 – P<sub>11</sub> ;                  2 – P<sub>12</sub> ; 3 – P<sub>13</sub> ; 4 – P<sub>21</sub> ; 5 – P<sub>22</sub> ;                  6 – P<sub>23</sub> ; 7 – P<sub>31</sub> ; 8 – P<sub>32</sub> ; 9 – P<sub>33</sub> ;                  10 – P<sub>41</sub> ; 11 – P<sub>42</sub> ; 12 – P<sub>43</sub></p>	<p>Матриця інцидентості</p> <pre>                 1  1  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0                 -1 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0                 0  -1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0                 0  0 0 0 -1 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0                 0  0 0 0 0 0 -1 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0                 0  0 0 0 0 0 0 -1 0 -1 0 1 0 0 0 0 0 0                 0  0 -1 0 0 0 0 0 -1 0 0 0 1 0 0 0 0 0                 0  0 0 -1 0 0 0 0 0 0 -1 0 0 1 0 0 0 0                 0  0 0 0 0 -1 0 0 0 0 0 -1 0 0 1 0 0 0                 0  0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 0 1 1 0                 0  0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 0 -1 0 1                 0  0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 0 -1 -1             </pre>	
	<p>Граф планарний</p>	<p>Матриця суміжності</p> <pre>                 0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,0,0                 1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0                 1,1,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0                 0,0,0,0,1,1,1,0,0,0,0,0                 0,0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0                 0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0                 1,0,0,1,0,0,0,0,0,1,0,0                 0,1,0,0,1,0,0,0,0,0,1,0                 0,0,1,0,0,1,0,0,0,0,0,1                 0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,1,1                 0,0,0,0,0,0,0,1,0,1,0,1                 0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0             </pre>

Продовження таблиці 2.2

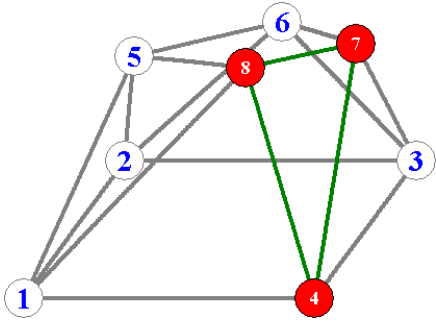
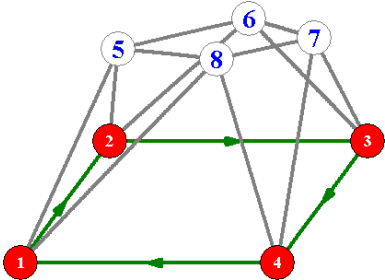
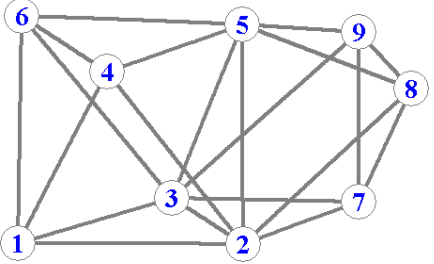
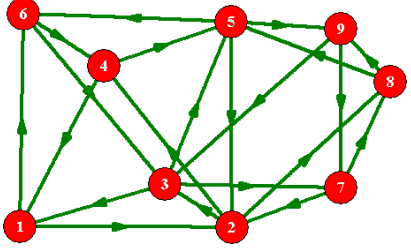
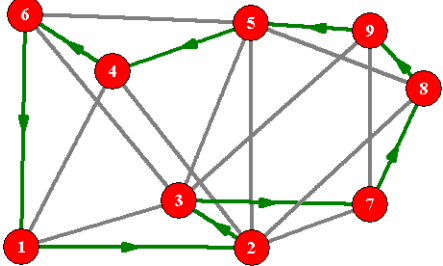
	<p>Граф має гамільтонів цикл  <math>1 - 2 - 3 - 9 - 6 - 4 - 5 - 8 - 11 - 12 - 10 - 7 - 1</math></p>
	<p>Хроматичне число графа 3</p>
	<p>Граф має мінімальний кістяк 11</p>
	<p>Максимальний клік графа дорівнює 3          Вершини, що входять до максимального кліку: 12, 11, 10</p>
	<p>Граф містить цикли. Один із них представлений нижче: <math>1 - 2 - 3 - 1</math></p>



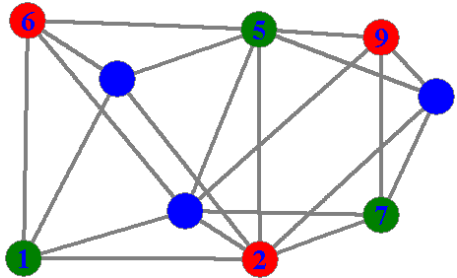
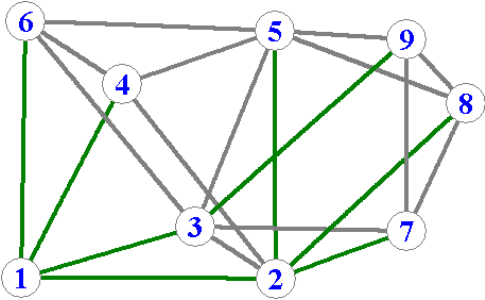
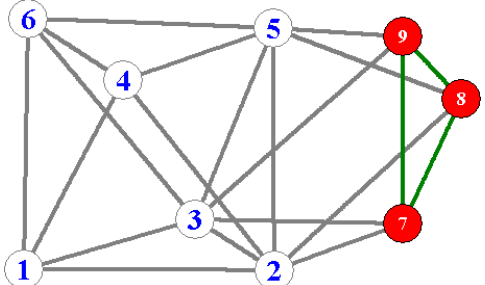
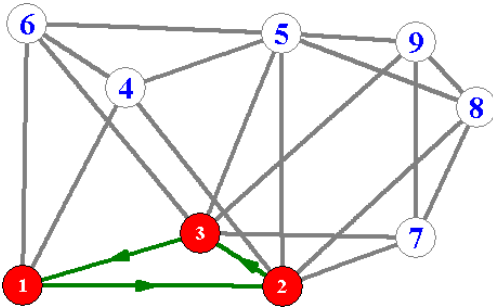
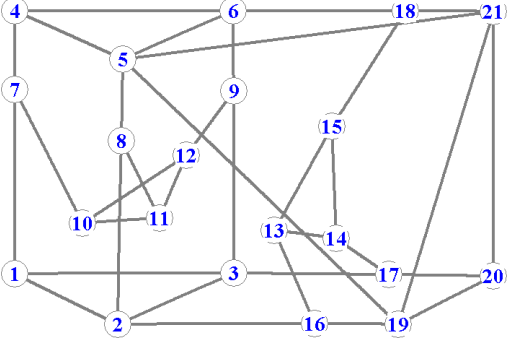
Продовження таблиці 2.2

Для конструкцій типу «октапод»		
	<p>Граф є пов'язаним                      Радіус графа дорівнює 2                      Діаметр дорівнює 2                      Граф не є деревом                      Граф планарний</p>	<p>Матриця суміжності</p> <pre> 0,1,0,1,1,0,0,1 1,0,1,0,1,1,0,0 0,1,0,1,0,1,1,0 1,0,1,0,0,0,1,1 1,1,0,0,0,1,0,1 0,1,1,0,1,0,1,0 0,0,1,1,0,1,0,1 1,0,0,1,1,0,1,0                     </pre>
	<p>Граф має ейлерів цикл 8 - 1 - 2 - 3 - 4 - 1 - 5 - 2 - 6 - 3 - 7 - 4 - 8 - 5 - 6 - 7 - 8</p>	
	<p>Граф має гамільтонів цикл 1 - 2 - 3 - 4 - 7 - 6 - 5 - 8 - 1</p>	
	<p>Хроматичне число графа 4</p>	
	<p>Граф має мінімальний кістяк 7</p>	

Продовження таблиці 2.2

	<p>Максимальний клік графа дорівнює 3 Вершини, що входять до максимального кліку: 8, 7, 4</p>	
	<p>Граф містить цикли. Один із них представлений нижче: 1 - 2 - 3 - 4 - 1</p>	
<p>Для конструкцій типу «подвійний гексапод»</p>		
	<p>Граф є пов'язаним Радіус графа дорівнює 2 Діаметр дорівнює 2 Граф не є деревом Граф планарний</p>	<p><b>Матриця суміжності:</b></p>
	<p>Граф має ейлерів цикл 9 - 3 - 1 - 2 - 3 - 5 - 2 - 4 - 1 - 6 - 4 - 5 - 6 - 3 - 7 - 2 - 8 - 5 - 9 - 7 - 8 - 9</p>	
	<p>Граф має гамільтонів цикл 1 - 2 - 3 - 7 - 8 - 9 - 5 - 4 - 6 - 1</p>	

Продовження таблиці 2.2

	<p>Хроматичне число графа 3</p>
	<p>Граф має мінімальний кістяк 8</p>
	<p>Максимальний клік графа дорівнює 3 Вершини, що входять до максимального кліку: 9, 8, 7</p>
	<p>Граф містить цикли. Один із них представлений нижче: 1 - 2 - 3 - 1</p>
<p>Для конструкцій типу «подвійна дельта»</p>	
	<p>Граф не має ейлерового циклу Граф є пов'язаним Радіус графа дорівнює 3 Діаметр дорівнює 5 Граф не є деревом Граф планарний</p>

Продовження таблиці 2.2

	<p>Граф має гамільтонів цикл          12 - 3 - 9 - 12 - 10 - 11 - 8 - 5 - 19 - 16          - 13 - 15 - 14 - 17 - 20 - 21 - 18 - 6 - 4 -          7 - 1</p>
	<p>Хроматичне число графа 3</p>
	<p>Максимальний клік графа          дорівнює 3          Вершини, що входять          до максимального кліку: 21, 20, 19</p>
	<p>Граф містить цикли. Один із них          представлений нижче:          1 - 2 - 3 - 1</p>

Представлений розгорнутий структурний аналіз компоновань мобільних верстатів-роботів дозволив зробити висновок про те, що перспективними компонованнями, з урахуванням вимог реконфігурації механоскладального виробництва і номенклатури оброблюваних деталей, є компоновання типів: «октапод», «дельта», «подвійна дельта».

## 2.4 Підстави побудови граф-структури для проведення акустичної діагностики МПС

У теперішній час у машинобудуванні спостерігається необхідність розвитку теоретичних і експериментальних методів дослідження статичних та динамічних властивостей механізмів при проектуванні верстатів із МПС. Це пов'язано, перш за все, із необхідністю формалізації переміщень робочих органів. Для оцінки точності формоутворення необхідно визначити траєкторію руху різального інструменту й зміщення його різальної кромки під дією сили різання. При цьому зазвичай ураховують тільки переміщення різальної кромки уздовж твірної лінії оброблюваної поверхні.

Розглянутий клас верстатів має характерні особливості: це проста конструкція, рухлива п'ятикоординатна платформа, наявність паралельно працюючих телескопічних штанг, кожна з яких має кульковий механізм, ходовий гвинт-гайка і кроковий серводвигун. Однак при високих показниках швидкості переміщення й прискорення наявні системи зворотного зв'язку не завжди можуть забезпечити точне положення різального інструменту. Телескопічні штанги й рамна конструкція працюють тільки на розтягування й стиснення, не відчуючи вигину, оскільки сила різання від шпинделя, розташованого на верхній платформі, передається вздовж штанг.

Штанги пов'язують рухомі й нерухомі частини верстата в єдине ціле, при цьому зусилля розподіляються по всій структурі рівномірно. Конструкція самих штанг є рухомою або нерухомою. Таким чином, щоб визначити положення точки на одній зі штанг, необхідно знати довжини інших штанг. Це дозволить відповісти на запитання, наскільки зміняться довжини інших штанг, якщо одна штанга зміниться на кілька міліметрів. Оскільки конструкція повинна бути збалансована, зміни довжин стрижнів повинні бути пропорційні змінам довжини одного стрижня.

Для статичного розрахунку конструкцій, стійкості деформованого стану систем, динаміки, теплопередачі й механіки застосовують метод кінцевих елементів. Цей метод заснований на апроксимації безперервної функції, визначеної на всій області дискретної моделі за допомогою кусково-неперервних функцій, визначених на підгалузях (кінцевих елементах) [221].

Кінцеві елементи, які використовуються для дискретизації розглянутої області, зазвичай групуються за топологічними ознаками: сегменти, трикутники, чотирикутники, тетраедри, паралелепіпеди, призми й т. д.

Найбільш простими є одномірні, двомірні (трикутники й чотирикутники) і тримірні (тетраедри й паралелепіпеди) елементи. З двомірних елементів найпростішим є трикутник, оскільки між двома вузлами шукана функція змінюється лінійно уздовж кожної з його сторін. Шукану функцію для кожного елемента апроксимують поліномом, наприклад статечним [218].

Робочу зону верстата з МПС можна представити у вигляді набору стрижнів і поверхонь (рис. 2.1).

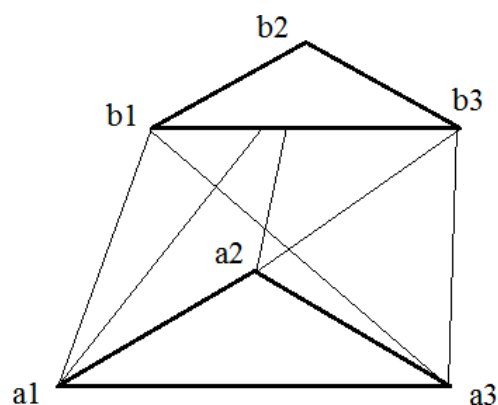


Рисунок 2.1 – Триангуляція області робочої зони верстата

Оскільки зусилля в розглянутому прикладі спрямовані уздовж стрижнів, то логічним є розбиття робочої зони саме на трикутники. Підстава  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  є нерухомої платформі (явну або уявну), на якій встановлюється деталь (або, у випадку з великогабаритною деталлю, навпаки – платформа

встановлюється на деталь). Трикутник  $b_1, b_2, b_3$  – рухома платформа, на якій встановлюється інструмент (або слугує проміжною ланкою). Обидві платформи з'єднані між собою рухомими стрижнями (кожен з яких регулюється приводом). Стрижні  $a_1b_2, a_2b_3, a_3b_1$  також є рухомими. Довжини **підстав**  $a_1, a_2, a_3$  і  $b_1, b_2, b_3$  є постійними величинами й не змінюються в часі.

Таким чином, представивши робочу зону верстата у вигляді набору кінцевих елементів – трикутників (із постійними ребрами або змінними), можна апроксимувати необхідні значення довжин сторін. Сутність апроксимації суцільного середовища за методом кінцевих елементів полягає в наступному:

1. Уже згадана область розбивається на певну кількість кінцевих елементів.

2. Передбачається, що кінцеві елементи з'єднуються між собою в кінцевій кількості точок вузлів, розташованих по контуру кожного з елементів.

3. Для кожного кінцевого елемента задається апроксимуючий поліном.

Кожний стрижень конструкції має свою орієнтацію. Причому кожен трикутник (крім **підстав**  $a_1, a_2, a_3$  і  $b_1, b_2, b_3$ ) містить два рухомих ребра й одне нерухоме.

За способом отримання основних, **тобто, які дозволяють**, рівнянь розрізняють чотири види методу **скінченних** елементів: прямий, варіаційний, зважених нев'язок і енергетичного балансу. З наведених видів методів **кінцевих** елементів в механіці особливо актуальні варіаційний метод і метод зважених нев'язок Гальоркіна. При цьому останній метод розв'язання диференціальних рівнянь базується на математичному формулюванні, пов'язаному з інтегральним поданням зваженої нев'язки. Ми ж розглянемо варіаційний метод, який заснований на принципах стаціонарності деякої змінної, що залежить від однієї або декількох функцій (функціонал). Якщо у функціонал підставити **апроксимуюче вираження** шуканих функцій і застосувати до нього екстремальні принципи (наприклад, принцип Лагранжа), отримаємо систему алгебраїчних рівнянь, рішенням якої будуть значення вузлових невідомих.

Варіаційний принцип Лагранжа: потенційна енергія набуває стаціонарних значень на тих можливих переміщеннях, які задовольняють заданим граничним умовам і умовам рівноваги сил.

Для подальших досліджень необхідно звернутися до теорії графів [275]. Основний принцип, сформульований Л. Ейлером для плоского графа, говорить, що якщо всі вершини графа парні, то можна, не відриваючи олівця від паперу, намалювати граф, при цьому можна починати з будь-якої вершини графа й завершити його в тій же вершині. Це твердження дає підстави припускати, що склавши систему рівнянь, що описують граф  $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ , зможемо описати залежності між довжинами ребер системи.

Розглянемо, з точки зору графа, схему, представлену на рис. 2.2. Оскільки за умовою завдання зусилля діють уздовж стрижнів і мають напрямок, відповідно, необхідно також його позначити.

В основу подальших перетворень покладено принцип тензорного обчислення [217], який будується на основі векторного обчислення та теорії матриць.

Для створення аналогової моделі робочої зони верстата скористаємося правилом Кірхгофа для замкнутого кола, яке дозволить описати процеси у важелях з урахуванням прийнятої збалансованості системи.

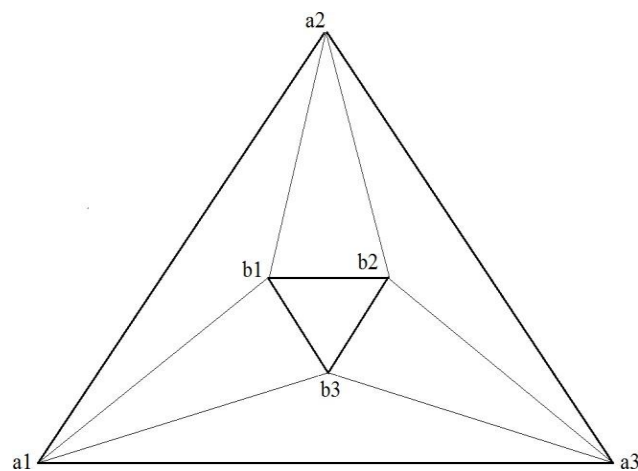


Рисунок 2.2 – Розбиття робочого простору на трикутники



При складанні рівняння напруг для контуру потрібно вибирати позитивний напрямок обходу контуру. На основі перерахованих вище правил складемо рівняння для кожного контуру.

Мета синтезу механізму – визначення розмірів механізму й положень його вхідної ланки найкращим чином відповідають указаним умовам і забезпечують найкраще (оптимальне) поєднання якісних показників [277].

При дослідженні важільних механізмів застосовують три підходи: динамічний (коли задані діючі сили або накладені деякі обмеження на динамічні параметри), геометричний (коли задані окремі положення ланок або траєкторії окремих точок) і кінематичний (коли задані деякі швидкості, прискорення або їхнє співвідношення) [276].

У теперішній час актуальним напрямком є проєктування верстатів із МПС, заснованих на використанні для важеля шарнірних механізмів. Безліч різних конструкцій можна класифікувати за такими компонувальними ознаками: за видом штанг; за кількістю штанг; за характером розташування шарнірів на платформі й **підставі** та ін. [291].

Одним з основних завдань при проєктуванні верстатів-гексаподів є забезпечення точності позиціонування й переміщень робочих органів. Складність представляють неоднорідність динамічних, пружних і швидкісних властивостей маніпулятора, а також завдання рухів в узагальнених координатах, пов'язаних зі ступенями рухливості маніпулятора. Також виникають труднощі аналітичного опису робочого простору кінематичної структури верстата, з урахуванням жорсткості штанг і шарнірів при зміні геометричних параметрів.

Виконавча підсистема, що забезпечує рух кінцевої ланки, має визначальне й ключове значення. Причому, ураховується не тільки кінематика, а й складні силові параметри системи, що значно ускладнює виявлення раціональної компонувальної схеми устаткування й оптимальних параметрів.

Для моделювання структури верстатів із МПС пропонується використувати новий підхід, який заснований на синтезі важільних механізмів, із застосуванням динамічного й геометричного аналізу.

Робота МПС відбувається за певними законами. Одними з найважливіших складових є початкова й кінцева точка траєкторії, зусилля, що виникають уздовж стрижнів, переміщення робочих органів верстата в просторі на задану відстань та ін. З метою ув'язки цих складових уведемо поняття поля й напруги. Напруга чисельно дорівнює роботі електростатичного поля при переміщенні одиничного позитивного заряду уздовж силових ліній цього поля. Також, напруга – це різниця значень потенціалу в початковій і кінцевій точках траєкторії.

На прикладі верстата-гексапода побудуємо модель робочої зони, представивши МПС у вигляді замкнутого електричного кола.

Перший закон Кірхгофа говорить: сума всіх струмів, що втікають у вузол, дорівнює сумі всіх струмів, що впливають із вузла (алгебраїчна сума всіх струмів у вузлі дорівнює нулю).

Грунтуючись на методі кінцевих елементів, розіб'ємо всю робочу область простору верстата-гексапода на кінцеві елементи-трикутники. Трикутники  $a_1a_2a_3$  і  $b_1b_2b_3$  є, відповідно, верхньою і нижньою платформою, які з'єднані між собою рухомими регульованими стрижнями.

Таким чином, для позначення переміщень уведемо позначення  $R$  (опір). У нерухомих стрижнях –  $R_a$  і  $R_b$ , у рухливих –  $R_{a1b1}$ ,  $R_{a2b1}$ ,  $R_{a2b2}$ ,  $R_{a3b2}$ ,  $R_{a3b3}$ ,  $R_{a1b3}$ . Зусилля, що виникають у стержні, позначимо  $I$  (сила струму), тоді, відповідно, отримаємо  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8$  (рис. 2.3).

Складемо рівняння рівноваги. На малюнку 1 показані напрямки струмів у матриці. Застосуємо закон Кірхгофа, який полягає в тому, що алгебраїчна сума струмів у кожному вузлі будь-якого ланцюга дорівнює нулю. При цьому спрямований до вузла струм прийнято вважати позитивним, а спрямований від вузла – негативним. Тоді напрямки в кожному трикутнику будуть розподілятися по сторонах, так як показано на рис. 2.4.

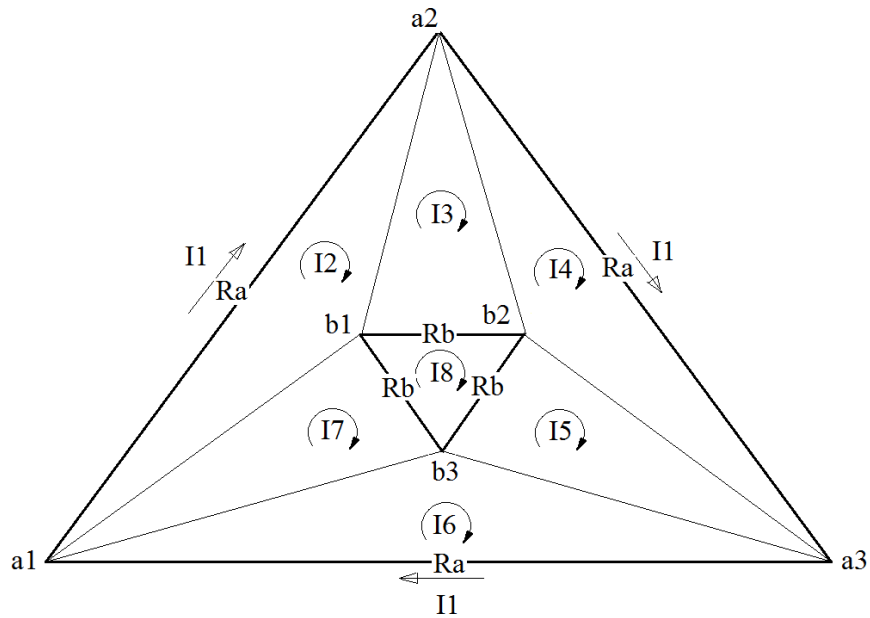


Рисунок 2.3 – Напрями струмів у матриці

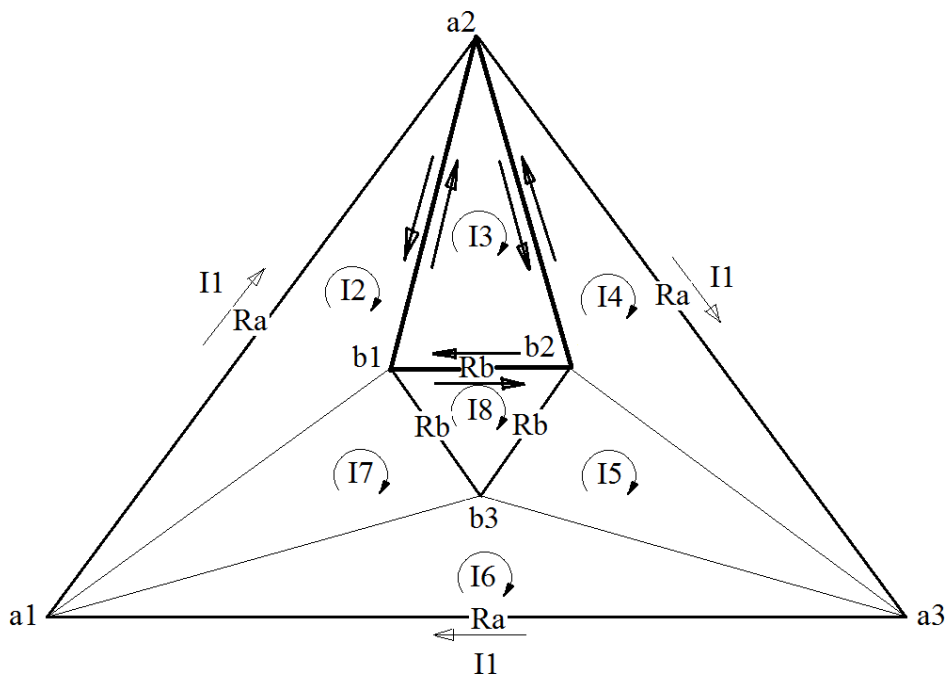


Рисунок 2.4 – Напрями струмів у трикутнику \$a\_2b\_2b\_1\$

Рівняння для контуру \$a\_1a\_2a\_3\$ матиме вигляд

$$I_1 R_{a_1a_2} + I_1 R_{a_2a_3} + I_1 R_{a_3a_1} = 0, \quad (2.4)$$

де \$I\_1\$ – струм у контурі, А;

\$R\_{a\_1a\_2}, R\_{a\_2a\_3}, R\_{a\_3a\_1}\$ – опір, Ом.

Оскільки  $R_{a1a2} = R_a$ ,  $R_{a2a3} = R_a$ ,  $R_{a3a1} = R_a$ , то рівняння набуде вигляду

$$I_1 R_a + I_1 R_a + I_1 R_a = 0 \quad \text{або} \quad 3I_1 R_a = 0. \quad (2.5)$$

Оскільки зусилля  $I_1 \neq 0$ , то  $R_a = 0$  (в умовах довжина стрижнів  $a1a2$ ,  $a2a3$ ,  $a3a1$  не змінюється в часі). Значення опорів  $R_{a1a2}$ ,  $R_{a2a3}$ ,  $R_{a3a1}$  дорівнюють 0.

Оскільки сума всіх струмів, які втікають у вузол, дорівнює сумі всіх струмів, що впливають із нього, запишемо рівняння для контуру  $a2b2b1$ :

$$(I_3 R_{b1a2} + I_2 R_{a2b1}) + (I_3 R_{a2b2} + I_4 R_{b2a2}) + (I_3 R_{b2b1} + I_8 R_{b1b2}) = 0, \quad (2.6)$$

де,  $I_2, I_3, I_4, I_8$  – струми в контурі, А;

$R_{b1a2}, R_{a2b1}, R_{a2b2}, R_{b2a2}, R_{b2b1}, R_{b1b2}$  – опори, Ом.

Пари  $R_{b1a2}$  та  $R_{a2b1}$ ,  $R_{a2b2}$  та  $R_{b2a2}$ ,  $R_{b2b1}$  та  $R_{b1b2}$  належать одному контуру, але мають різні напрямки. Таким чином, перетворимо формулу:

$$(I_3 R_{b1a2} - I_2 R_{b1a2}) + (I_3 R_{a2b2} - I_4 R_{a2b2}) + (I_3 R_{b2b1} - I_8 R_{b2b1}) = 0. \quad (2.7)$$

Формулу (4) можна представити в більш зручному вигляді:

$$(I_3 - I_2) R_{b1a2} + (I_3 - I_4) R_{a2b2} + (I_3 - I_8) R_{b2b1} = 0. \quad (2.8)$$

Аналогічно запишемо інші рівняння. Отримаємо систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} (I_3 - I_2) R_{b1a2} + (I_3 - I_4) R_{a2b2} + (I_3 - I_8) R_{b2b1} = 0 \\ (I_4 - I_3) R_{b2a2} + (I_4 - I_1) R_{a2a3} + (I_4 - I_5) R_{a3b2} = 0 \\ (I_5 - I_4) R_{b2a3} + (I_5 - I_6) R_{a3b3} + (I_5 - I_8) R_{b3b2} = 0 \\ (I_6 - I_5) R_{b3a3a} + (I_6 - I_1) R_{a3a1} + (I_6 - I_7) R_{a1b3} = 0 \\ (I_7 - I_6) R_{b3a1} + (I_7 - I_2) R_{a1b1} + (I_7 - I_8) R_{b1b3} = 0 \\ (I_2 - I_7) R_{b1a1} + (I_2 - I_1) R_{a1a2} + (I_2 - I_3) R_{a2b1} = 0 \\ (I_8 - I_3) R_{b1b2} + (I_8 - I_5) R_{b2b3} + (I_8 - I_7) R_{b3b1} = 0 \end{array} \right. \quad (2.9)$$

Якщо вирішити цю систему рівнянь, можна знайти значення опорів (довжин стрижнів) і струмів (зусиль).

Запропонований метод потенціалів, заснований на методі кінцевих елементів із застосуванням теорії графів, дозволяє створити аналогову модель робочої зони верстата й полягає в тому, що сума потенціалів, які протікають всередині контуру, дорівнює нулю. При цьому враховується напрямок за годинниковою стрілкою або проти.

Вирішуючи систему рівнянь, можна визначити залежності між зміною довжини штанги й точним становищем платформи, зокрема будь-якої точки платформи (а також складовою платформи).

Такий підхід також дозволяє вирішувати зворотну задачу: за необхідною координатою робочої частини інструменту розрахувати необхідні довжини стрижнів гексаподів.

Застосування цієї моделі при розрахунках МПС дозволить визначити компонування для забезпечення необхідної рухливості з метою адаптації зони.

Пропонується використовувати метод потенціалів для синтезу механізму верстата-робота.

Динамічні властивості технічної системи, що визначають характер процесів, які їй належать, можуть бути виявлені у вигляді графа. Використаний метод отримання рівнянь динаміки системи шляхом **застосування закону збереження до вузлових точках** її графа. Для цього застосовано метод зв'язкових графів, який успішно застосовується в задачах математичного моделювання динаміки різних технічних систем, включаючи багатоланкові кінематичні пари, маніпулятори, промислові роботи [79, 80, 81, 209, 210, 211, 212, 214, 215, 216]. Цей підхід передбачає наступну послідовність дій:

- 1) методом зв'язкових графів отримати загальне рівняння динаміки механічної системи, що складається з довільної кількості твердих тіл, що утворюють між собою поступальні й обертальні кінематичні пари;

- 2) на основі заданої геометричної моделі конкретного механізму визначити кількість функціональних перетворювачів і їхні коефіцієнти;

3) на основі загального рівняння з урахуванням інформації про інерційно-масові параметри ланок заданого механізму й діючі на нього сили, а також з урахуванням інформації про функціональні перетворювачі, отримати рівняння динаміки заданого механізму.

Автоматизоване моделювання та дослідження динаміки мехатронних систем, побудованих на модельному полі зв'язного графу системи, вже практично реалізовано [214, 212, 211, 213]. Тому посилання на перераховані роботи дозволяють використовувати представлені в табл.1.2 структури з аналізом їхньої пов'язаності й виявленням бажаних для управління ланок, для динамічного аналізу МПС.

Як показано в роботах [214, 212, 211, 213], елементами динамічної системи є: інерційний накопичувач енергії, ємнісний накопичувач енергії, дисипативний елемент, функціональний перетворювач, гиратор. На входах і виходах системи розташовані джерела зусиль (потоків), що визначають дію з боку більш широкої системи, у складі якої знаходиться досліджувана система. У цих роботах показано наступне.

Динамічний стан інерційного накопичувача енергії в загальному випадку описується рівнянням

$$e = \frac{d}{dt}(mf), \quad (2.10)$$

де  $f = dq/dt$ ,  $q = q(t)$  – координата,  $m = m(t)$  – інерція накопичувача,  $t$  – час. Зокрема, якщо  $m = const$ , то рівняння набуває вигляду  $e = m(df/dt)$ . Інерційним накопичувачем у механічній системі є масивне тіло: якщо  $q$  – поступальне переміщення, то  $m$  – маса тіла,  $e$  – сила; якщо  $q$  – обертальний рух тіла навколо деякої осі, то  $m$  – момент інерції,  $e$  – момент сили відносно цієї осі. В електричній системі у якості інерційного накопичувача виступає котушка індуктивності:  $q$  – заряд, що протікає через поперечний переріз провідника,  $m$  – індуктивність,  $e$  – напруга на клеммах котушки.

Ємнісний накопичувач енергії в загальному випадку описується рівнянням

$$e = \int (kf) dt, \quad (2.11)$$

де  $k(q) = de/dq$  – жорсткість накопичувача [214, 191]. У більшості інженерних задач жорсткість накопичувачів постійна, і рівняння використовується у вигляді  $e = k \int f dt$ . Ємнісним накопичувачем у механічній системі є пружне тіло: якщо  $q$  – лінійна деформація, то  $k$  – коефіцієнт жорсткості; якщо  $q$  – кутова деформація, то  $k$  – крутильна жорсткість. В електричній системі ємнісним накопичувачем енергії є конденсатор:  $q$  – заряд на обкладинках конденсатора;  $k = 1/C$ ,  $C$  – ємність конденсатора. Одне й те ж фізичне тіло має властивість як інерційного, так і ємнісного накопичувача.

Елемент, що перетворює механічну або електричну енергію в теплову енергію, є дисипативним елементом і описується рівнянням

$$e = R\varphi(f), \quad (2.12)$$

де  $R$  – коефіцієнт, який у загальному випадку є функцією часу. Найбільш часто в рівнянні приймають  $R = const$  і  $\varphi(f) = f$  (лінійний опір із постійним коефіцієнтом). У механічних системах за допомогою дисипативного елемента враховують втрати енергії, обумовлені наявністю сухого й в'язкого тертя; в електричних системах – втрати енергії на омичних опорах (резисторах).

Функціональний перетворювач перетворює енергію, що подається на його вхід з одними параметрами, в енергію того ж виду, але з іншими параметрами. Він описується рівняннями:

$$e_{\text{вих}} = m^{-1} e_{\text{вх}}, f_{\text{вих}} = m f_{\text{вх}}, \quad (2.13)$$

де  $e_{\text{вх}}$ ,  $e_{\text{вих}}$  – зусилля,  $f_{\text{вх}}$ ,  $f_{\text{вих}}$  – потоки на вході й виході перетворювача,  $m$  – коефіцієнт перетворювача. У загальному випадку  $m$  – функція часу  $t$ ,

яка може бути задана неявно. При моделюванні динаміки механічних систем рівняння використовуються для математичного опису ідеальних механізмів, у тому числі й з рідкими (газоподібними) робочими тілами; в електричних системах – для опису ідеальних перетворювачів електричних сигналів. Теплові втрати в реальних механізмах і електричних ланцюгах враховуються шляхом додавання в розрахункову модель відповідних дисипативних елементів із наведеними значеннями опору.

Викладений підхід запропонував і успішно використовує при визначенні динамічних навантажень у МПС Кузьмін Д.В. [214, 216, 215, 209, 212, 210, 211, 213]. Однак у зв'язку із цими роботами має підстави висунення гіпотези про можливість комплексної діагностики МПС (і на їхній основі – мобільних верстатів-роботів) за амплітудно-частотними характеристиками (АЧХ) власних коливань систем на основі МПС. Наявність у замкнутих контурах МПС ємнісної, індуктивної і резисторної складових свідчить про існування спектра власних коливань системи. З огляду на розмірні характеристики МПС, стрижневих, шарнірних елементів, пластин опор і інструментальних вузлів, АЧХ МПС входить у акустичний діапазон.



### РОЗДІЛ 3

## ПРОЄКТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ МЕХАНОСКЛАДАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА НА БАЗІ ОКТОПОДА

### 3.1 Обґрунтування вихідних даних для розробки конструкцій октопода

Аналіз існуючих конструкцій машин із МПС доводить, що їхні металеві конструкції мають жорсткість і відносно малу **металоємність** [257]. Серед існуючих методів обробки найбільш ефективним для станків із МПС є високошвидкісне фрезерування, тому що дозволяє отримувати найменший переріз зрізу металу при використанні високих швидкостей знімання. Суть даної технології полягає у використанні високих швидкостей різального інструменту, що веде до істотного зниження опору матеріалу при його обробці. Швидкісне фрезерування переважно реалізується за допомогою п'ятиосьового верстата [189, 257]. Особливістю такої обробки є те, що робота різання перетворюється на корисну частину і втрати, які перетворюються в тепловий потік, який направлений у стружку.

Було розроблено конструкцію дельта-машини на основі конструкцій типу «ферма». Конструкції типу «ферма» – це стрижнева система в будівельній механіці, що залишається геометрично незмінною при оснащенні стрижнів шарнірними. В елементах ферми, при відсутності розцентрування стрижнів і позавузлового навантаження, виникають тільки зусилля розтягування-стиснення [127].

Така конфігурація дозволяє забезпечити доступ до будь-якої сторони деталі, а також дає можливість установлювати плоскі елементи по нормалі до шпинделя, що дозволяє використовувати кінцеві або торцеві фрези для обробки отворів або площин.

Ця особливість дозволяє використовувати високошвидкісне фрезерування для обробки загартованих конструкційних сталей і не боятися при цьому їхньої термічного відпуску. Також з'являється можливість обробляти дюралюмінієві сплави без їхнього термічного знеміцнення. Технологія високошвидкісного фрезерування є однією з найбільш сучасних й ефективних альтернатив класичним методам фрезерування, що значно відрізняється якістю й швидкістю обробки.

Порівняно з традиційною обробкою високошвидкісне фрезерування забезпечує [189]:

- зниження сил різання на 30 % і більше, що зменшує деформацію оброблюваної деталі й дозволяє обробляти тонкостінні деталі до точності, до форми яких ставляться високі вимоги;

- зменшення температури оброблюваної деталі;

- отримання шорсткості оброблюваної поверхні, за якістю аналогічної абразивній обробці;

- збереження точності обробки протягом тривалого часу в результаті зниження напружень у верстаті й інструменті за рахунок зменшення сил різання;

- збільшення подачі в 5...10 разів;

- зростання продуктивності знімання металу в 3...5 разів;

- зменшення вібрацій інструменту й деталі;

- зниження вартості інструменту;

- зниження часу обробки на 40...70 % і вартості на 20...50 %.

Порівняння параметрів традиційного й високошвидкісного фрезерування пальцевою фрезою зі сферичною формою різальних кромek показує незаперечну перевагу останнього [257, 189, 296].

Сучасні технології дозволяють забезпечувати всі ці вимоги, а також удосконалювати такий вид обробки за допомогою сучасних програм, новітніх двигунів. Сучасні двигуни можуть при великих обертах мати малі габарити при невеликій потужності.

Таким чином, мобільні сучасні верстати-роботи можуть обробляти деталі різних номенклатурних розмірів, що дозволяє вивести машинобудування на новий рівень. При виборі високошвидкісної обробки треба враховувати швидке зношування інструменту, що виникає при високій швидкості обробки. Необхідно використовувати сучасні сплави, покриття, які використовуються при високошвидкісній обробці.

При використанні структури МПС «дельта» зменшуються габаритні розміри, металоємність верстата; конструкція дельта-механізму дозволяє оброблювати досить великий розмірний ряд деталей; при зменшенні металоємності й збільшенні робочої зони конструкції зменшується її вартість.

Мехатронні системи базуються на електромеханічних (електродвигуни, механічні пристрої), електронних (мікроелектронні плати, силові перетворювачі та вимірювальні ланцюги), комп'ютерних (мікроконтролери та комп'ютери, які здійснюють необхідні обчислення) складових конструкції.

Всі переміщення зв'язані між собою конструктивними особливостями МПС, оскільки в таких МПС задіяний принцип трикутника. В таких механізмах при лінійній зміні одного з плечей, інші підлаштовуються під нього. Найвагомішими їх достоїнствами перед традиційним обладнанням, є мала металоємність, транспортабельність, достатня жорсткість, рівномірний розподіл навантаження за рахунок стрижневої конструкції, і як наслідок високі динамічні показники.

Таким чином, ключовим елементом стрижневої конструкції будь-якого МПС, і відповідно верстата – робота є плече. Оскільки саме воно забезпечує збереження всіх переваг верстата, робота, то розробка приводного плеча, тобто привода рухомих плечей МПС, що є обґрунтованою, оскільки саме рухомі плечі МПС становить основу конструкції верстата-робота.

Відомі верстати-гексаподи (Пат. 54937 Україна, МПК В21D5/00. Верстат-гексапод / В. А. Крижанівський. – № 2002054273 ; заявл. 24.05.02; опубл. 17.03.03, Бюл. № 3/2003) та (Пат. 63437 Україна, МПК В23Q1/00.

Верстат-гексапод / І. І. Павленко, А. І. Волявський, Д. В. Вохиченко. – № 4201102758 ; заявл. 09.03.11; опубл. 10.10.11, Бюл. № 9/2011) мають загальні суттєві ознаки: це наявність рухомої платформи, на якій змонтована шпindelна головка, та кінематичних ланок змінної довжини. Недоліком цих конструкцій є недостатня точність позиціонування робочого органа, що визначається сумарним переміщення по трьох координатах шести ланок змінної довжини. Тому задача вдосконалення відомої конструкції верстата-гексапода для підвищення точності обробки вирішується тим, що верстат-гексапод вміщує 8 ланок змінної довжини, які встановлюються на поверхні деталі, що обробляється. Точки позиціонування стають нульовими, за рахунок ланок здійснюють керування точністю переміщень верстата по трьох координатах. Сутність винаходу пояснюється кресленнями рис. 3.1 а, б, на яких зображено компоновку МПС.

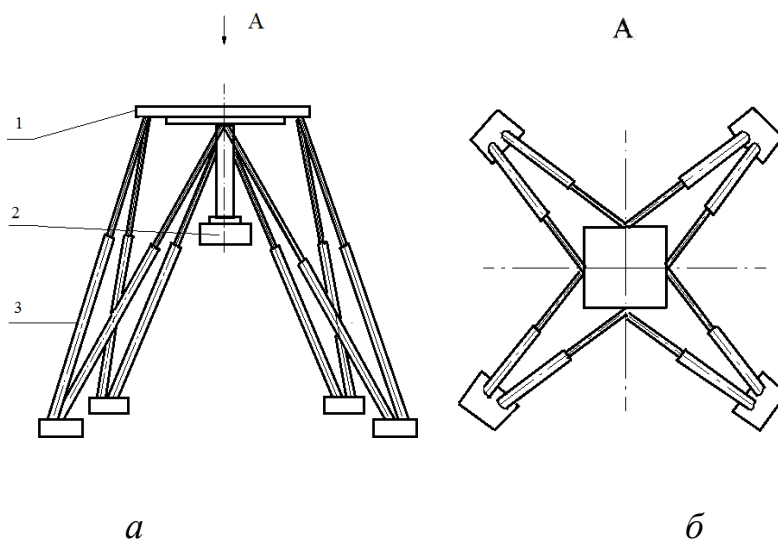


Рисунок 3.1 – Схематичне зображення МПС

МПС складається з рухомої платформи 1, на якій змонтована шпindelна головка 2, та восьми кінематичних ланок змінної довжини 3, що шарнірно з'єднують рухому платформу 1 та деталь, що обробляється.

Принцип дії верстата-гексапода наступний. При одночасній (паралельній) зміні довжин кінематичних ланок 3 за відомим законом інструмент

реалізує переміщення у просторі. Для кожної точки робочого простору точність позиціонування формується кожною ланкою змінної довжини певною дискретністю кроку, тобто точність позиціонування однієї точки визначає вісім ланок. Рухливі кінці ланок при позиціонуванні здійснюють переміщення по всіх трьох координатах одночасно.

Відмінність запропонованої компоновки МПС полягає в тому, що сукупність нових ознак надає йому нові, невідомі раніше властивості – немає «мертвих» зон при обробці деталі шляхом застосування восьми кінематичних ланок змінної довжини.

Застосування пропонованого способу дозволяє зменшити похибку налаштування інструменту. У цьому випадку виключається такий недолік, як інтерференція, за рахунок використання додаткових розмірних ланок.

Технічний результат: МПС запропонованої компоновки може широко використовуватися в машинобудуванні при формоутворенні великогабаритних деталей.

Спираючись на принципи побудови інтелектуальних систем управління і діагностики технологічних систем і процесів, запропонована система управління представленаю технологічною машиною (рис.3.2).

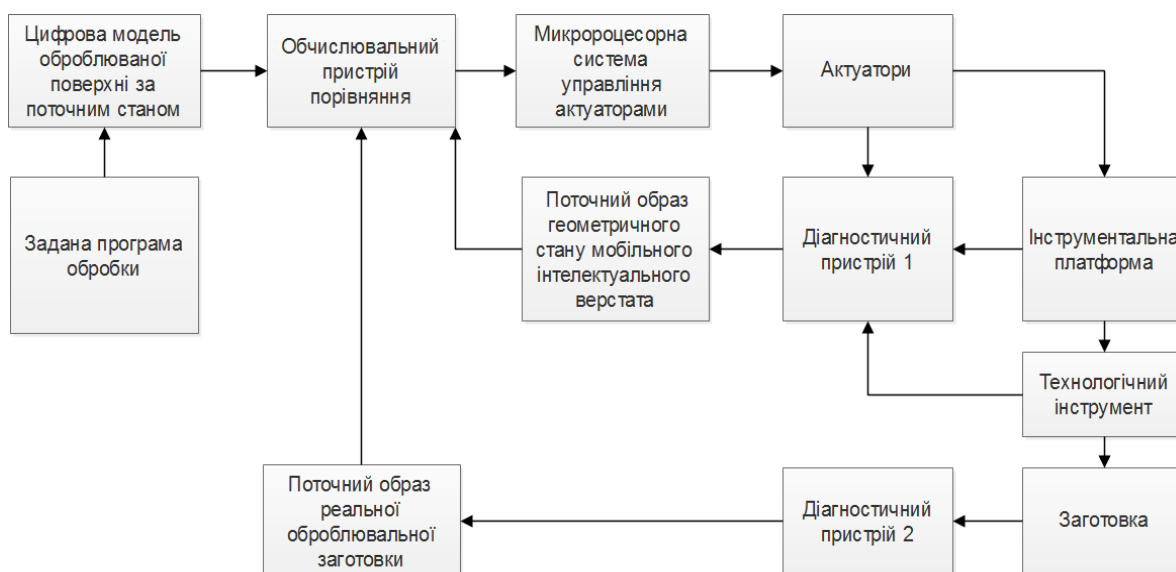
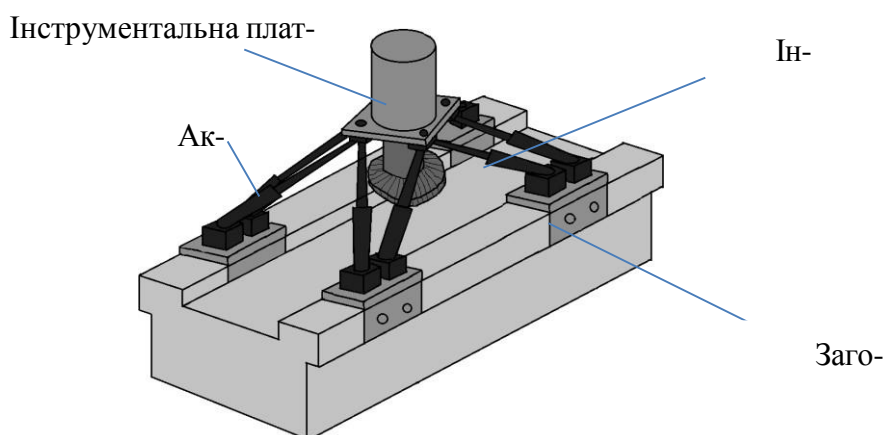


Рисунок 3.2 – Структурна схема управління мобільним верстатом із МПС

Робота схеми управління здійснюється наступним чином. Управління технологічним інструментом (у цьому випадку – фрезою) для обробки заготовки за заданою програмою здійснюється шляхом зміни довжини актуаторів, які представляють собою сторони змінної довжини замкнених контурів (трикутників) із шарнірним з'єднанням актуаторів у вершинах. Використовуючи діагностичну інформацію про розміри оброблюваних поверхонь, формується поточний образ оброблюваної заготовки за допомогою нейромережевої моделі. Перевагою створення такої моделі є можливість мати математичні описи функцій, які моделюють реальну поверхню за малою кількістю діагностичних вимірів. При цьому в схемі управління передбачено отримання діагностичних даних на основі акустичних сигналів у вигляді спектрів із характеристичними частотами. Формування поточного геометричного стану мобільного інтелектуального верстата проводиться на основі діагностики стану інструментальної платформи. Відпрацювання керуючих команд проводиться мікропроцесорною системою управління актуаторами. Значення керуючих сигналів обчислюються на основі використання розробленого авторами методу потенціалів.

Основним вузлом верстатів-роботів із МПС є механізована приводна частина, яка керує положенням інструменту. Принципову конструкцію станка-робота, на основі якої був проведений аналіз приводів рухомих плечей МПС – октопода, показано на рис. 3.3.



*Рисунок 3.3 – Модель мобільної інтелектуальної технологічної машини – мобільного ремонтного верстата з МПС*

Приводи рухомих плечей октопода забезпечують:

- високу точність відпрацювання заданого закону руху;
- високу жорсткість;
- високу дискретність переміщення;
- підвищену продуктивність за рахунок безперервності обробки;
- невисоку вартість;
- можливість виконувати монотонну, циклічну роботу;
- швидкодію, якість та точність обробки;
- відсутність потреби в переривах;
- практичну відсутність потреби в перепочинку.

Найбільш відомими лінійними передачами є:

- пневмо-, гідроприводні;
- електроприводні;
- передача гвинт-гайка;
- ролико-гвинтова передача (РГП) [240];
- кульково-гвинтова передача (КГП) [241];
- хвильова гвинтова передача (ХГП) [242];
- пружна система переміщення (ПСП) [243].

Головною складовою частиною механізму лінійного приводу є тип рухомої енергії. Вибір виду приводу обумовлюється функціональним призначенням, яке він повинен виконати, а також умовами його експлуатації.

Енергоносієм пневматичного приводу є стиснене повітря, яке є робочим енергоносієм, і його перетворення в механічну енергію для руху вихідної ланки пневмодвигуна [255, 282, 274, 281].

В об'ємних гідроприводах мембранного, сільфонного, демпферного типів використовується потенційна енергія тиску робочої рідини [132, 247, 274, 281].

Електропривод для МПС – це, у спрощеному вигляді, електродвигун + передавальний механізм + система управління [281, 222]. Перетворювач

електричної енергії використовується для управління потоком електроенергії, що надходить від мережі до двигуна. Керуючи електричною енергією, перетворювач дозволяє керувати швидкістю двигуна. Сучасні перетворювачі виготовляються на базі потужних напівпровідникових елементів. Найбільш поширеними різновидами перетворювачів енергії є перетворювачі частоти та випрямлячі. Система автоматичного керування входить до складу перетворювача і являє собою мікропроцесорну систему, запрограмовану спеціальними законами стабілізації швидкості двигуна.

Передавальні механізми є двох типів:

- із безпосереднім дотиком закріплених на валах деталей;
- із включенням проміжного гнучкого зв'язку, наприклад ременя.

В обох випадках ведена деталь захоплюється провідною, або внаслідок тертя у місці їхнього зіткнення, або наявності на парних деталях взаємно чіпких виступів і западин. Швидкості обертання веденого й ведучого валів зазвичай різні [222, 129].

У зв'язку з поставленим завданням, доцільно звернути увагу на лінійні приводи. Лінійні приводи – це пристрої для переміщення в просторі з корисним навантаженням. До них відносяться різні типи актуаторів і систем лінійного переміщення. Важливим компонентом лінійних приводів є механічні передачі, такі як КГП:

- лінійні актуатори;
- електроциліндри;
- телескопічні колони;
- промислові домкрати;
- актуатори обертів.

Системи лінійного переміщення:

- лінійні модулі;
- координатні столи;
- багатокоординатні системи;



- промислові роботи;
- настільні верстати з ЧПК.

Гвинтові передачі:

- кулько-гвинтові передачі;
- телескопічні кулько-гвинтові передачі;
- ролико-гвинтові передачі;
- передача гвинт-гайка ковзання;
- передача шестерня-рейка.

Згідно із завданням привід ІММ повинен забезпечувати переміщення більш ніж у 2 рази, тому прийнятними приводами можуть виступити такі підтипи:

- типу актуаторів: тільки телескопічні колони мають здатність змінити довжини більш ніж у 2 рази. Інші варіанти не підходять, тому що для великого ходу в них мінімальна довжина теж є більшою, ніж необхідна мінімальна довжина для ІММ;

- типу систем лінійних переміщень: ні один із підтипів не підходить у якості привода ІММ, оскільки конструктивно пристрій складається з двигуна, направляючих і каретки, яка налаштовує своє положення двигуном у межах довжини напрямної. Отже, розміри таких приводів не зміняться, а лише визначають положення «виконавчого механізму»;

- типу гвинтових передач: високі точнісні властивості мають КГП і РГП. Але тільки телескопічні КГП можуть змінювати свою довжину більш ніж у 2 рази.

На основі наявної інформації про приводи в табл.3.1 наведено порівняння між основними групами приводів, розглянутих вище: пневмо-, гідро- і електроприводу.

У результаті порівняння приводів за факторами складності та експлуатаційної надійності можна зробити висновок, що категорія електроприводів лідирує за факторами, наданими в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Фактори порівняння основних видів приводів між собою

№	Фактори	П	Г	Э
01	Простота конструкції і технічного обслуговування	+	-	+
02	Пожежо- та вибухонебезпечність	+	-	-
03	Надійність роботи при (min; max) °С, в умовах агресивного оточення	+	-	-
04	Строк служби	+	-	-
05	Швидкодія	+	+	+
06	Передача енергії на великі відстані	-	-	+
07	Відсутність необхідності в захисних пристроях від перевантаження	+	+	+
08	Безпека обслуговування	+	+	-
09	Чуттєвість до радіаційного та електромагнітного випромінювання	+	-	-
10	Вартість обладнання/установлення	-	-	+
11	КПД	-	+	+
12	Вага й габарити	-	-	+
13	Забезпечення постійної швидкості/зусилля	-	+	+
14	Рівень шуму	-	+	+
15	Швидкість передачі сигналу (швидкість реакції)	-	+	+
Усього		8	7	11

У якості приводу ІММ можна використовувати телескопічну колону або КГП. Але телескопічні колони погано підходять за займаною робочою площею. Телескопічні КГП складні й мають високу вартість виготовлення. Тому логічно було б об'єднати ці дві конструкції в одну, що й було зроблено.

### 3.2 Теоретичний аналіз похибки позиціонування виконавчого органа октопода

Типовий гексапод виконаний на базі механізмів поступального переміщення, які являють собою, наприклад, кульково-гвинтові передачі [130, 20, 207, 208]. Для зміни їхньої довжини слугують регульовані електроприводи. Контроль їхнього переміщення здійснюється датчиками положення. Одним кінцем рухомі плечі шарнірно з'єднані з основою, а іншим

(також шарнірно) – із рухомою платформою, на якій установлений виконавчий механізм, наприклад мотор-шпindel.

Складові, що впливають на показники точності МПС:

1. Похибка системи управління. Основним фактором, який впливає на цю похибку, є точність використовуваних датчиків зворотного зв'язку.

2. Геометричні похибки від допусків на розташування центрів шарнірів, впливу допусків на довжини опор, не ідеальності руху сферичних шарнірів, впливу зазорів у шарнірах на траєкторію руху МПС [18, 19, 20, 76, 84, 101, 102, 107]. Узагальнений підхід, заснований на застосуванні чисельних оцінок, одержуваних у результаті розв'язання прямої задачі кінематики, і, відповідно, складний в обчислюванні, дозволяє зробити висновок, що немає можливості визначити загальні закономірності впливу геометричних помилок. У кожному конкретному випадку потрібно проводити окреме дослідження, оскільки вплив геометричних помилок залежить від архітектури, габаритів, робочого простору й конфігурації МПС.

3. Теплові процеси в МПС можуть впливати на точність верстатів-роботів, методи компенсації розроблені досить повно [37, 75]. Але необхідна постійна діагностика стану МПС для отримання точності переміщень виконавчих органів МПС.

4. Динамічні похибки у високошвидкісних машинах, що притаманні верстатам-роботам, впливають на точність більше статичних за рахунок пружних деформації, власних коливань, помилок відпрацювання приводів під дією гравітаційних сил [75,85].

Похибка позиціонування центру рухомої платформи, що виникає внаслідок похибки приводів рухомих плечей октопода, залежить від таких факторів, як:

- похибки вильоту рухомих плечей октопода;
- конструктивні особливості робота;
- орієнтація рухомої платформи робота.

Похибка, що викликається зміщенням вихідної ланки під дією прикладеної сили, залежить від фактора величини сили та її напрямку, а також від фактора жорсткості верстата-робота.

У свою чергу значення прикладеної сили різання залежить від обраного виду технологічної операції.

Жорсткість верстата залежить від декількох факторів:

- жорсткості рухомих плечей октопода;
- конструктивних особливостей робота;
- орієнтації рухомої платформи робота.

Похибка позиціонування центру рухомої платформи, що виникає внаслідок похибки приводів рухомих плечей октопода, і похибка, що викликається зміщенням вихідної ланки під дією прикладеної сили, є найменш вивченими, але потребують визначення, особливо – по краях робочої зони.

Підвищення точності паралельних робіт може бути досягнуте за рахунок підвищення точності кожної зі складових похибок, скорочення кількості складових, зменшення чутливості системи до вхідних впливів, застосування системи автоматичної компенсації всіх або основних складових похибки.

Аналіз похибки МПС забезпечено наступними чином.

Вирішення прямої задачі кінематики дозволяє розрахувати похибку позиціонування центру рухомої платформи верстата-робота на його геометричних параметрів (радіус підстави й рухомої платформи, максимальні й мінімальні вильоти рухомих плечей октопода, висоту). Для розв'язання зворотної задачі визначено траєкторію руху платформи виконавчого механізму.

Устаткування на основі МПС має значну не лінійність вихідних характеристик, таких як жорсткість і точність позиціонування, по відношенню до зміни координат інструмента. Ці недоліки обумовлені специфікою цього класу механізмів. Їхній вплив може бути в значній мірі знижений на ранніх стадіях проектування шляхом оптимізації компоновки для заданих умов обробки.

Ефективним напрямком підвищення точності є застосування методів структурного й параметричного синтезу для визначення раціональної структури й параметрів верстата-робота на базі МПС.

Розглянемо платформу, яка має вісім ступенів рухливості (рис. 3.4). З вихідною ланкою пов'язана базова система координат  $x, y, z, P$ . Кожен кінематичний ланцюг характеризується параметрами  $l_1, l_2, \dots, l_8$ , які називаються узагальненими координатами. Нехай узагальненими координатами є довжини стрижнів. Положення вихідної ланки ( $x, y, z, \varphi, \psi, \theta$ ) визначається щодо початку координат системи  $P$ . Координати  $x, y, z$  задають положення вихідної ланки в базовій системі, а  $\varphi, \psi, \theta$  – кути поворотів системи навколо осей  $x, y$  і  $z$ , які визначають кутову орієнтацію системи вихідної ланки щодо основи [162].

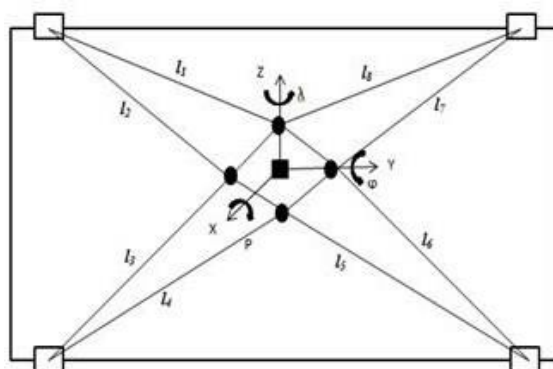


Рисунок 3.4 – Платформа октопода

Для паралельних роботів вирішення зворотної задачі кінематики зазвичай досить просте. Воно полягає у визначенні вектора довжин опор  $l$  для заданого положення платформи, що визначається вектором положення  $p$  заданої точки платформи в заданій фіксованій системі координат.

Якщо апріорна інформація (початкове наближення рішення) відома, рішення зазвичай шукається за допомогою ітераційних схем Ньютона – Рафсона або Ньютона – Гаусса. Для зворотної задачі кінематики буде актуальним записане:

$$l = f(x). \quad (3.1)$$

Також одним із методів розв’язання прямої та зворотної задач кінематики є використання матриць Якобі часткових передавальних відношень, який розглядається в цій роботі. Тоді вирішення прямої і зворотної задач кінематики можна представити у вигляді:

$$P = J \cdot l , \quad (3.2)$$

$$l = J^{-1} \cdot P , \quad (3.3)$$

де  $P$  – вектор положення центру платформи;  $l$  – вектор положення узагальнених координат;  $J$  – пряма матриця Якобі;  $J^{-1}$  – зворотна матриця Якобі.

Пряма та зворотна матриці Якобі [50] для механізму з вісьмома ступенями свободи мають вигляд:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(l_1, l_2, \dots, l_8)}{\partial l_1} & \frac{\partial f_1(l_1, l_2, \dots, l_8)}{\partial l_2} & \dots & \frac{\partial f_1(l_1, l_2, \dots, l_8)}{\partial l_8} \\ \frac{\partial f_2(l_1, l_2, \dots, l_8)}{\partial l_1} & \frac{\partial f_2(l_1, l_2, \dots, l_8)}{\partial l_2} & \dots & \frac{\partial f_2(l_1, l_2, \dots, l_8)}{\partial l_8} \\ \frac{\partial f_3(l_1, l_2, \dots, l_8)}{\partial l_1} & \frac{\partial f_3(l_1, l_2, \dots, l_8)}{\partial l_2} & \dots & \frac{\partial f_3(l_1, l_2, \dots, l_8)}{\partial l_8} \\ \frac{\partial f_4(l_1, l_2, \dots, l_8)}{\partial l_1} & \frac{\partial f_4(l_1, l_2, \dots, l_8)}{\partial l_2} & \dots & \frac{\partial f_4(l_1, l_2, \dots, l_8)}{\partial l_8} \\ \frac{\partial f_5(l_1, l_2, \dots, l_8)}{\partial l_1} & \frac{\partial f_5(l_1, l_2, \dots, l_8)}{\partial l_2} & \dots & \frac{\partial f_5(l_1, l_2, \dots, l_8)}{\partial l_8} \\ \frac{\partial f_6(l_1, l_2, \dots, l_8)}{\partial l_1} & \frac{\partial f_6(l_1, l_2, \dots, l_8)}{\partial l_2} & \dots & \frac{\partial f_6(l_1, l_2, \dots, l_8)}{\partial l_8} \\ \frac{\partial f_7(l_1, l_2, \dots, l_8)}{\partial l_1} & \frac{\partial f_7(l_1, l_2, \dots, l_8)}{\partial l_2} & \dots & \frac{\partial f_7(l_1, l_2, \dots, l_8)}{\partial l_8} \\ \frac{\partial f_8(l_1, l_2, \dots, l_8)}{\partial l_1} & \frac{\partial f_8(l_1, l_2, \dots, l_8)}{\partial l_2} & \dots & \frac{\partial f_8(l_1, l_2, \dots, l_8)}{\partial l_8} \end{bmatrix} ; \quad (3.4)$$

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x, y, z, \lambda, \Psi, \varphi)}{\partial x} & \frac{\partial f_1(x, y, z, \lambda, \Psi, \varphi)}{\partial y} & \dots & \frac{\partial f_1(x, y, z, \lambda, \Psi, \varphi)}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial f_2(x, y, z, \lambda, \Psi, \varphi)}{\partial x} & \frac{\partial f_2(x, y, z, \lambda, \Psi, \varphi)}{\partial y} & \dots & \frac{\partial f_2(x, y, z, \lambda, \Psi, \varphi)}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial f_3(x, y, z, \lambda, \Psi, \varphi)}{\partial x} & \frac{\partial f_3(x, y, z, \lambda, \Psi, \varphi)}{\partial y} & \dots & \frac{\partial f_3(x, y, z, \lambda, \Psi, \varphi)}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial f_4(x, y, z, \lambda, \Psi, \varphi)}{\partial x} & \frac{\partial f_4(x, y, z, \lambda, \Psi, \varphi)}{\partial y} & \dots & \frac{\partial f_4(x, y, z, \lambda, \Psi, \varphi)}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial f_5(x, y, z, \lambda, \Psi, \varphi)}{\partial x} & \frac{\partial f_5(x, y, z, \lambda, \Psi, \varphi)}{\partial y} & \dots & \frac{\partial f_5(x, y, z, \lambda, \Psi, \varphi)}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial f_6(x, y, z, \lambda, \Psi, \varphi)}{\partial x} & \frac{\partial f_6(x, y, z, \lambda, \Psi, \varphi)}{\partial y} & \dots & \frac{\partial f_6(x, y, z, \lambda, \Psi, \varphi)}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial f_7(x, y, z, \lambda, \Psi, \varphi)}{\partial x} & \frac{\partial f_7(x, y, z, \lambda, \Psi, \varphi)}{\partial y} & \dots & \frac{\partial f_7(x, y, z, \lambda, \Psi, \varphi)}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial f_8(x, y, z, \lambda, \Psi, \varphi)}{\partial x} & \frac{\partial f_8(x, y, z, \lambda, \Psi, \varphi)}{\partial y} & \dots & \frac{\partial f_8(x, y, z, \lambda, \Psi, \varphi)}{\partial \varphi} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Похибку позиціонування центру рухомої платформи можна знайти з рівняння

$$\Delta P = J * \Delta l, \quad (3.6)$$

де  $\Delta P = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \lambda, \Delta \Psi, \Delta \varphi]$  – вектор похибок позиціонування центру платформи;  $J$  – пряма матриця Якобі;  $\Delta l = [\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3, \Delta l_4, \Delta l_5, \Delta l_6, \Delta l_7, \Delta l_8]$  – вектор похибок приводів рухомих плечей октопода.

При відомих похибках рухомих плечей октопода  $\Delta q$  можна визначити похибку положення вихідної ланки  $\Delta P$ . Ставлячи бажані похибки  $\Delta P$ , можна розрахувати похибки  $\Delta q$ , які необхідно забезпечити, тобто вирішити пряму або зворотну задачі кінематики.

Таким чином, щоб знайти похибку позиціонування центру платформи паралельного робота, необхідно вирішити пряму задачу кінематики. Однак для паралельних роботів аналітичний вираз зазвичай є тільки для зворотного якобіана  ${}_{-1}J$ , але його дуже складно отримати для  $J$  (точніше, його аналітичне вираження для більшості роботів із 8 ступенями свободи настільки складне, що не може використовуватися на практиці).

Оскільки структура ВРПК має кінематичну розв'язку приводів, то пряму матрицю Якобі можна представити в блочно-діагональному вигляді:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(l_1, l_2, l_3, l_4)}{\partial l_1} & \frac{\partial f_1(l_1, l_2, l_3, l_4)}{\partial l_2} & \frac{\partial f_1(l_1, l_2, l_3, l_4)}{\partial l_3} & \frac{\partial f_1(l_1, l_2, l_3, l_4)}{\partial l_4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial f_2(x, y, z)}{\partial l_1} & \frac{\partial f_2(l_1, l_2, l_3, l_4)}{\partial l_2} & \frac{\partial f_2(l_1, l_2, l_3, l_4)}{\partial l_3} & \frac{\partial f_2(l_1, l_2, l_3, l_4)}{\partial l_4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial f_3(x, y, z)}{\partial l_1} & \frac{\partial f_3(l_1, l_2, l_3, l_4)}{\partial l_2} & \frac{\partial f_3(l_1, l_2, l_3, l_4)}{\partial l_3} & \frac{\partial f_3(l_1, l_2, l_3, l_4)}{\partial l_4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial f_4(x, y, z)}{\partial l_1} & \frac{\partial f_4(l_1, l_2, l_3, l_4)}{\partial l_2} & \frac{\partial f_4(l_1, l_2, l_3, l_4)}{\partial l_3} & \frac{\partial f_4(l_1, l_2, l_3, l_4)}{\partial l_4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_5(l_5, l_6, l_7, l_8)}{\partial l_5} & \frac{\partial f_5(l_5, l_6, l_7, l_8)}{\partial l_6} & \frac{\partial f_5(l_5, l_6, l_7, l_8)}{\partial l_7} & \frac{\partial f_5(l_5, l_6, l_7, l_8)}{\partial l_8} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_6(l_5, l_6, l_7, l_8)}{\partial l_5} & \frac{\partial f_6(l_5, l_6, l_7, l_8)}{\partial l_6} & \frac{\partial f_6(l_5, l_6, l_7, l_8)}{\partial l_7} & \frac{\partial f_6(l_5, l_6, l_7, l_8)}{\partial l_8} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_7(l_5, l_6, l_7, l_8)}{\partial l_5} & \frac{\partial f_7(l_5, l_6, l_7, l_8)}{\partial l_6} & \frac{\partial f_7(l_5, l_6, l_7, l_8)}{\partial l_7} & \frac{\partial f_7(l_5, l_6, l_7, l_8)}{\partial l_8} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f_8(l_5, l_6, l_7, l_8)}{\partial l_5} & \frac{\partial f_8(l_5, l_6, l_7, l_8)}{\partial l_6} & \frac{\partial f_8(l_5, l_6, l_7, l_8)}{\partial l_7} & \frac{\partial f_8(l_5, l_6, l_7, l_8)}{\partial l_8} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Уявімо матрицю Якобі у вигляді поступальних і обертальних рухів:

$$J = \begin{bmatrix} J_{11}^P & J_{12}^P & J_{13}^P & J_{14}^P & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{21}^P & J_{22}^P & J_{23}^P & J_{24}^P & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{31}^P & J_{32}^P & J_{33}^P & J_{34}^P & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{41}^P & J_{42}^P & J_{43}^P & J_{44}^P & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{11}^R & J_{12}^R & J_{13}^R & J_{14}^R \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{21}^R & J_{22}^R & J_{23}^R & J_{24}^R \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{31}^R & J_{32}^R & J_{33}^R & J_{34}^R \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{41}^R & J_{42}^R & J_{43}^R & J_{44}^R \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

де  $J_{ij}^P$  – частина якобіана, відповідна поступальним переміщенням;  $J_{ij}^R$  – частина якобіана, відповідна обертанням.

Для визначення максимальної та мінімальної довжини рухомих плечей  $l_{\min}$  та  $l_{\max}$  використані проекції октопода (рис. 3.5).

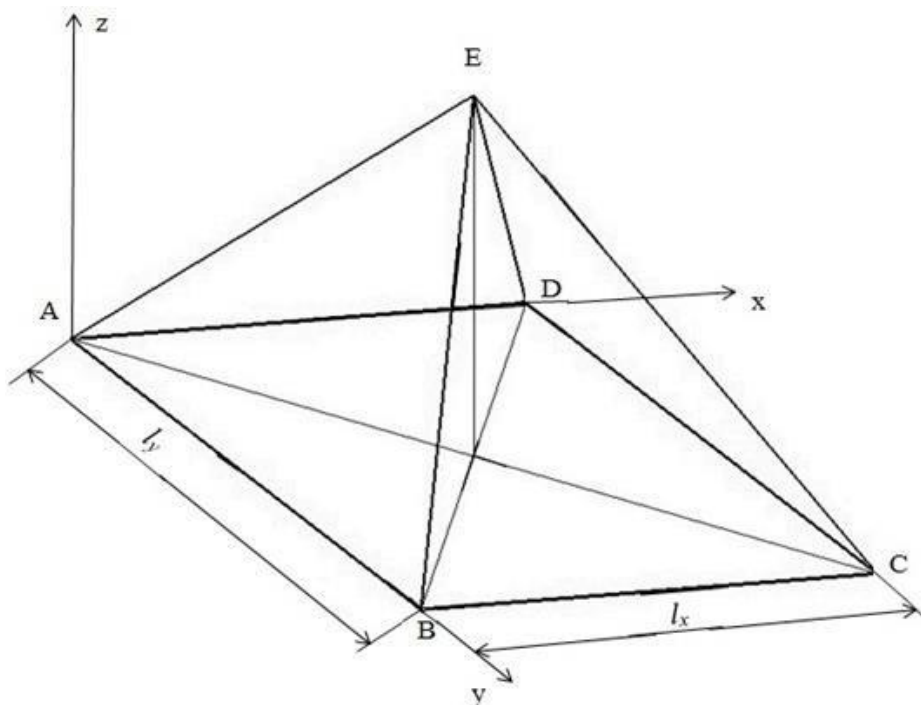
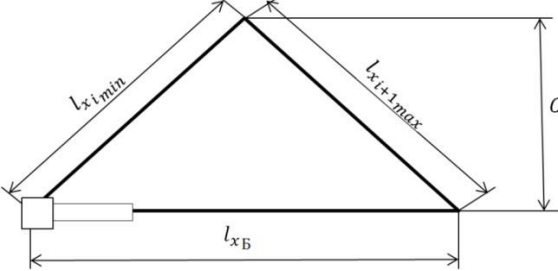
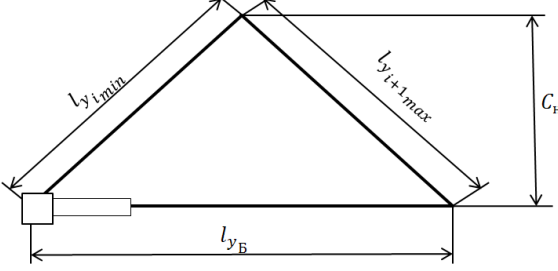
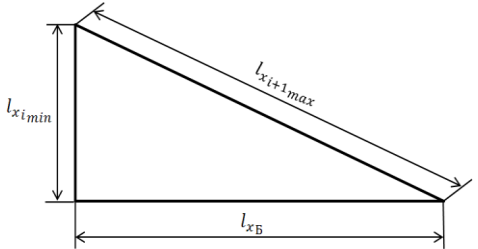
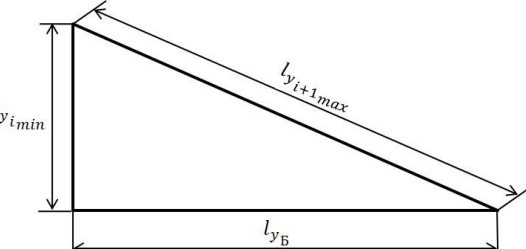
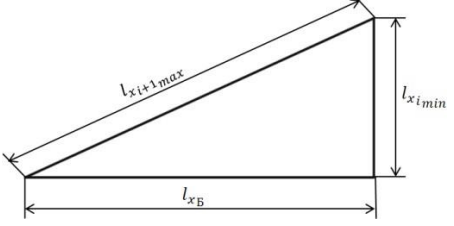
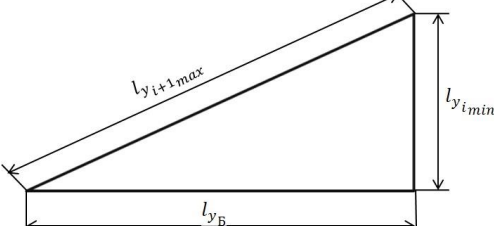


Рисунок 3.5 – Кінематична схема октопода



Таблиця 3.2 – Проекція осей X,Y

<p>Проекція на вісь X:</p> <p><math>l_{xB}</math> – довжина бази по осі x;  <math>l_{xi\min}</math> – мінімальна довжина по осі x;  <math>l_{xi+1\max}</math> – максимальна довжина по осі x;  <math>C_H</math> – розмір, що наструюється.</p>	<p>Проекція на вісь Y:</p> <p><math>l_{yB}</math> – довжина бази по осі y;  <math>l_{yi\min}</math> – мінімальна довжина по осі y;  <math>l_{yi+1\max}</math> – максимальна довжина по осі y;  <math>C_H</math> – розмір, що наструюється.</p>
	
	
	

Розрахункова схема:

$$l_{xi+1\max} = \sqrt{l_{xB}^2 + l_{xi\min}^2} = \sqrt{l_{xB}^2 + C_H^2}$$

$$\text{де } l_{xi\min}, l_{yi\min} = C_H, l_{yi+1\max} = \sqrt{l_{yB}^2 + C_H^2} \quad (3.10)$$

$$l_{i+1\max} = \sqrt{l_{xi+1\max}^2 + l_{yi+1\max}^2} \quad (3.11)$$

$$l_{i+1max} = \sqrt{l_{xB}^2 + l_{yB}^2 + 2C_H^2} \quad (3.12)$$

$$l_{i+1max} = \sqrt{l_{xB}^2 + l_{yB}^2 + 2l_{imin}^2} \quad (3.13)$$

З урахуванням розміру опори по X:

$$l_{xi_{min}} = \sqrt{\left(\frac{l_{x_{оп}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{d_{\Phi}}{2}\right)^2 + C_H^2} \quad (3.14)$$

$$l_{xi+1max} = \sqrt{\left[l_{xB} - \left(\frac{l_{x_{оп}}}{2} + \frac{d_{\Phi}}{2}\right)\right]^2 + C_H^2} \quad (3.15)$$

По осі Y:

$$l_{yi_{min}} = \sqrt{\left(\frac{l_{y_{оп}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{d_{\Phi}}{2}\right)^2 + C_H^2} \quad (3.16)$$

$$l_{yi+1max} = \sqrt{\left[l_{yB} - \left(\frac{l_{y_{оп}}}{2} + \frac{d_{\Phi}}{2}\right)\right]^2 + C_H^2}$$

Отримуємо:

$$\begin{aligned} l_{min} = l_{imin} &= \sqrt{\left(\frac{l_{x_{оп}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{d_{\Phi}}{2}\right)^2 + C_H^2 + \left(\frac{l_{y_{оп}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{d_{\Phi}}{2}\right)^2 + C_H^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{l_{x_{оп}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_{y_{оп}}}{2}\right)^2 + 2d_{\Phi}^2 + 2C_H^2}; \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} l_{max} = l_{i+1max} &= \sqrt{\left[l_{xB} - \left(\frac{l_{x_{оп}}}{2} + \frac{d_{\Phi}}{2}\right)\right]^2 + C_H^2 + \left[l_{yB} - \left(\frac{l_{y_{оп}}}{2} + \frac{d_{\Phi}}{2}\right)\right]^2 + C_H^2} = \\ &= \sqrt{\left[l_{xB} - \left(\frac{l_{x_{оп}}}{2} + \frac{d_{\Phi}}{2}\right)\right]^2 + \left[l_{yB} - \left(\frac{l_{y_{оп}}}{2} + \frac{d_{\Phi}}{2}\right)\right]^2 + 2C_H^2}. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Для вирішення завдання, спираючись на рис. 3.4, застосовуємо отримані формули (3.13) та (3.14), за допомогою яких складено таблицю розмірів у програмі Microsoft Office Excel (додаток А).

На основі отриманих результатів будуюмо графіки, які відображають зміни  $l_{min}$  та  $l_{max}$  при різних значеннях розміру, що настроюється.

На рис. 3.6 відображена, зміна максимальної та мінімальної довжини рухомих плечей октопода при  $C_H = 300$  мм,  $C_H = 400$  мм і  $C_H = 500$  мм для найменшого діаметра фрези  $d_{\Phi} = 100$  мм.

На рис. 3.7 відображена зміна максимальної та мінімальної довжини рухомих плечей октопода при  $C_H = 300$  мм,  $C_H = 400$  мм і  $C_H = 500$  мм для найбільшого діаметра фрези  $d_{\Phi} = 250$  мм.

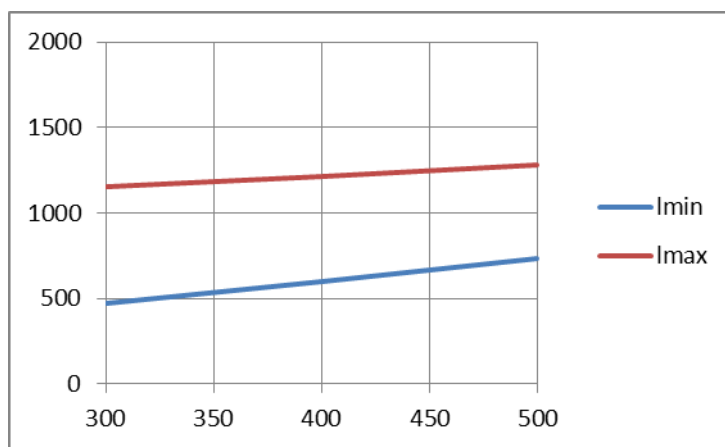


Рисунок 3.6 – Залежність  $l_{min}$  та  $l_{max}$  від розміру, що настроюється, для найменшого діаметра фрези

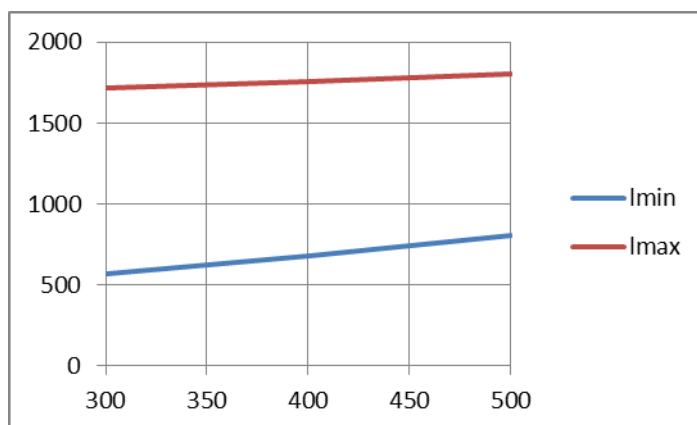


Рисунок 3.7 – Залежність  $l_{min}$  та  $l_{max}$  від розміру, що настроюється, для найбільшого діаметра фрези

На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що при  $C_H = 300$  мм відношення  $\frac{l_{min}}{l_{max}}$  коливається в інтервалі 450...1750 мм; при  $C_H = 400$  мм відношення  $\frac{l_{min}}{l_{max}}$  коливається в інтервалі 600...1750 мм, а при  $C_H = 500$  мм відношення  $\frac{l_{min}}{l_{max}}$  – 800...1800 мм.

$$l_{max_1}^2 = (l_{yB} + a + b)^2 + C_H^2 = (l_{yB} + a + b)^2 + l_{xB}^2$$

$$l_{max} = \sqrt{2(l_{xB} + a + b)^2 + C_H^2 + l_{yB}^2} \quad (3.19)$$

З формули (2.20) отримуємо, що при  $C_H = 300$  мм,  $l_{max} = 2431$  мм;  $C_H = 400$  мм,  $l_{max} = 2446$  мм;  $C_H = 500$  мм,  $l_{max} = 2464$  мм.

### 3.3 Методики розрахунку робочої зони октопода й оптимізація траєкторії руху вихідної ланки МПС

Методика розрахунку робочої зони базується на розрахунковій схемі (рис. 3.8) та проєкціях XY, ZX та ZY (формули (3.22), (3.23)).

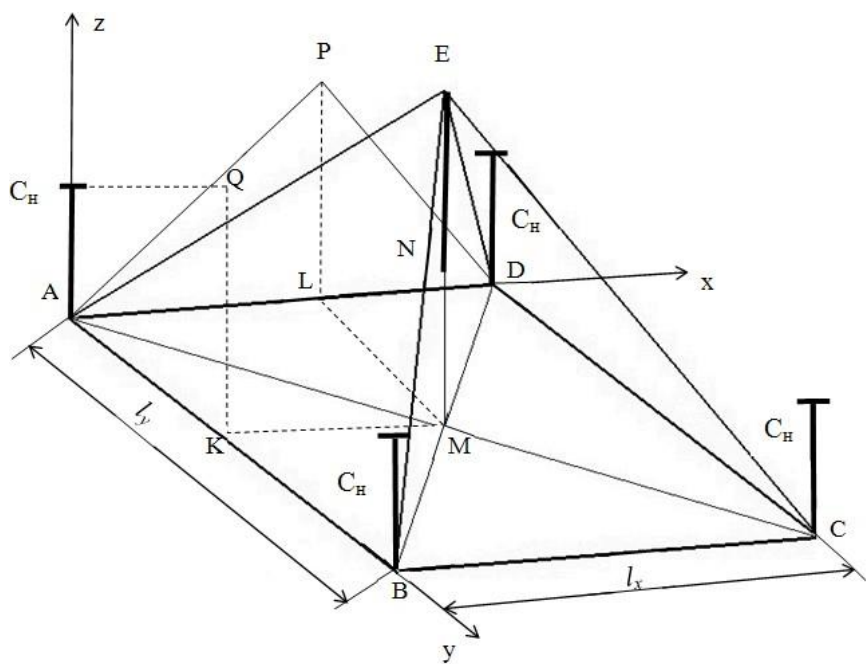


Рисунок 3.8 – Розрахункова схема октопода для визначення робочої області

Задано:

$$\begin{cases} l_{min} = C_H \\ l_{max} = \sqrt{C_H^2 + l_x^2 + l_y^2} \\ C_H \\ l_x \\ l_y \end{cases} \quad (3.20)$$

Для рухомих плечей октопода:

$$\begin{cases} AE \Rightarrow AE_{min} \dots AE_{max} \\ BE \Rightarrow BE_{min} \dots BE_{max} \\ CE \Rightarrow CE_{min} \dots CE_{max} \\ DE \Rightarrow DE_{min} \dots DE_{max} \end{cases} \quad (3.21)$$

Для побудови рівнянь зв'язків:

$$\begin{aligned} AE &= f_I (BE; CE; DE) \\ BE &= f_I (AE; CE; DE) \\ CE &= f_I (AE; BE; DE) \\ DE &= f_I (AE; BE; CE) \end{aligned} \quad (3.22)$$

Проекція XY:

$$\begin{aligned} AM^2 &= AK^2 + AL^2 \\ DM^2 &= (l_x - AL)^2 + AK^2 \\ BM^2 &= (l_y - AK)^2 + AL^2 \\ CM^2 &= (l_x - AL)^2 + (l_y - AK)^2 \end{aligned} \quad (3.23)$$

Змінні АК, АL:

$$\begin{aligned} AK &\Rightarrow 0..l_y \\ AL &\Rightarrow 0..l_x \end{aligned}$$

Проекція ZX:

$$\begin{aligned} AP^2 &= AL^2 + EM^2 \\ DP^2 &= (l_x - AL)^2 + EM^2 \end{aligned} \quad (3.24)$$

Проекція ZY:

$$\begin{aligned} AQ^2 &= AK^2 + EM^2 \\ BQ^2 &= (l_y - AK)^2 + EM^2 \end{aligned} \quad (3.25)$$

Умова обмеження:

$$C_H = l_{min} \leq EM^2 + AL^2 + AK^2 \leq l_{max} \quad (3.26)$$

$$C_H^2 \leq \sqrt{(z + C_H)^2 + x^2 + y^2} \leq l_{max}^2$$

$$\begin{cases} Z_N = EM - C_H > 0 \\ X_N = x \Rightarrow 0..l_x \\ Y_N = Y \Rightarrow 0..l_y \end{cases} \quad (3.27)$$

Для обчислення EM:

$$(C_H - l_{min})^2 \leq EM^2 + AL^2 + AK^2 \leq l_{max}^2$$

$$(C_H - l_{min})^2 \leq EM^2 + x_N^2 + y_N^2 \leq l_{max}^2 \quad (3.28)$$

$$EM^2 + x_N^2 + y_N^2 \geq (C_H - l_{min})^2$$

$$EM^2 + x_N^2 + y_N^2 \leq l_{max}^2$$

Із цих рівнянь можна зробити висновок, що EM обчислюється, як:

$$EM \geq \sqrt{(C_H - l_{min})^2 - x_N^2 - y_N^2} \quad (3.29)$$

$$EM \leq \sqrt{l_{max}^2 - x_N^2 - y_N^2} \quad (3.30)$$

Алгоритм обчислень області робочого простору МПС у вигляді октопода представлений на рис. 3.9.

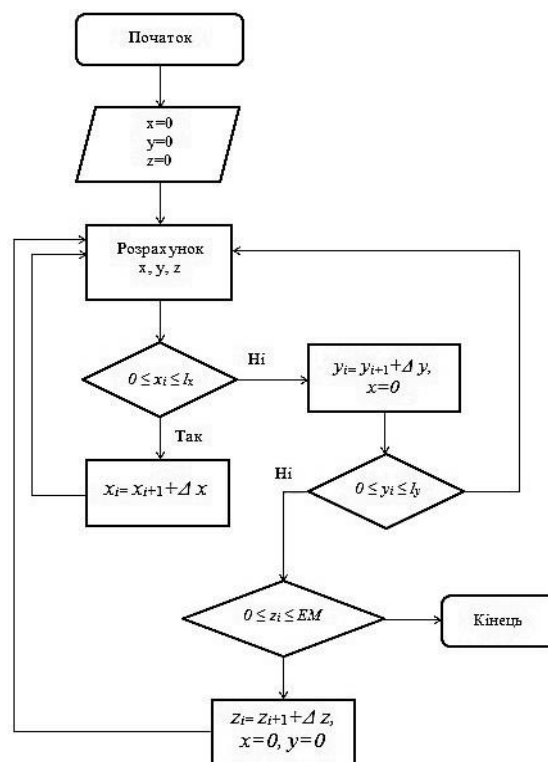


Рисунок 3.9 – Алгоритм обчислень області робочого простору МПС

Аналіз зони обробки виконаний за допомогою програми MathCad, при різних розмірах вильоту інструменту (рис. 3.10, *a...e*).

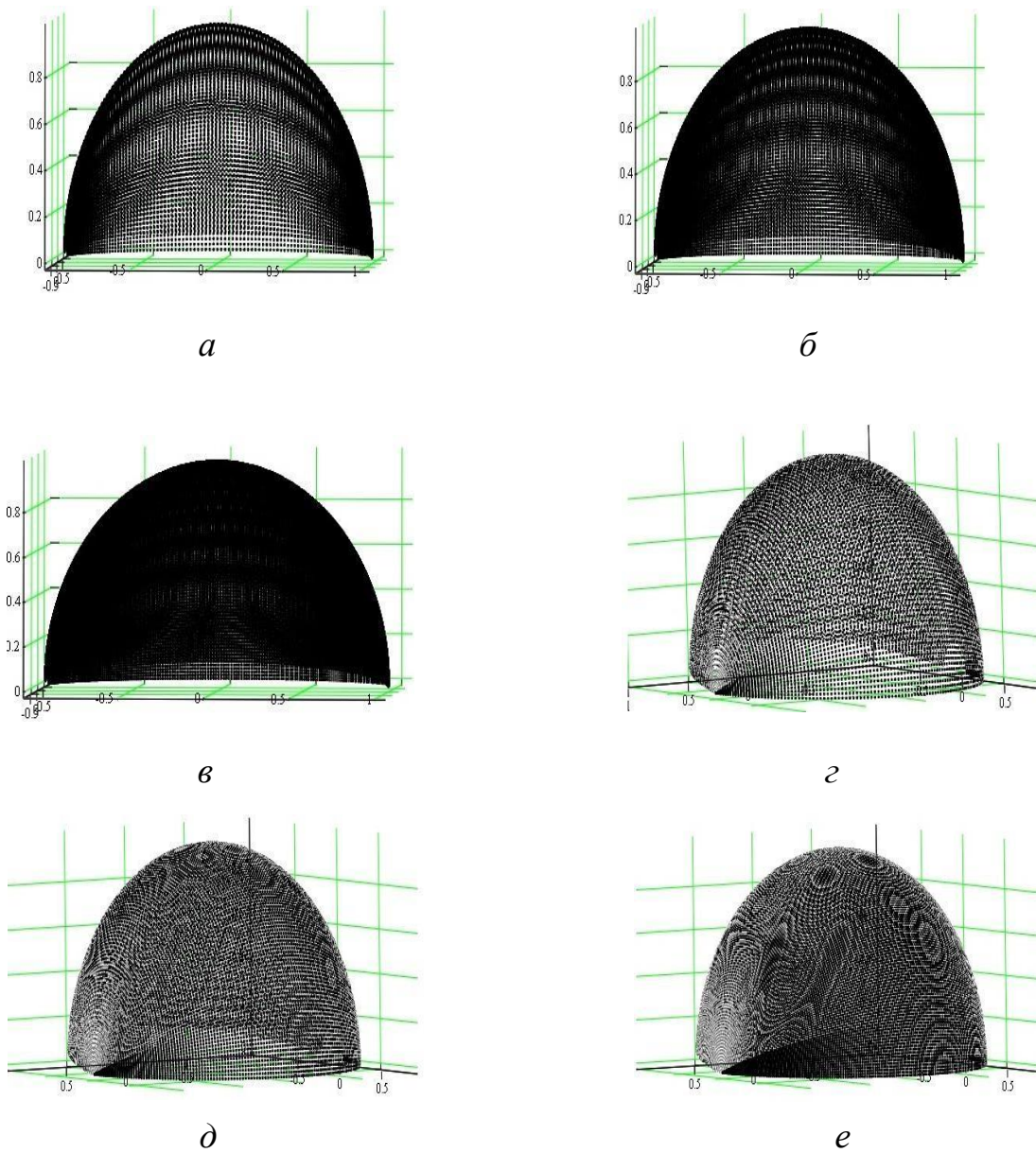


Рисунок 3.10 – Схеми робочого простору обробки: а) при  $C_H = 300$  мм; б) при  $C_H = 400$  мм; в) при  $C_H = 500$  мм; г) при  $C_H = 300$  мм,  $d_\phi = 100$  мм; д) при  $C_H = 400$  мм,  $d_\phi = 150$  мм; е) при  $C_H = 500$  мм,  $d_\phi = 200$  мм

Осі тривимірних графіків масштабовані щодо максимального значення  $C_H$  по осі  $Z$  і щодо  $\pm C_H$  по осях  $X$  і  $Y$ .

Оскільки дискрета – це величина переміщення рухомих плечей октопода за 1 керуючий імпульс крокового приводу, то кожен раз при збільшенні дискрети на 5 точність обробки вертикального значення  $z$  буде  $< 5$ .

Похибка весь час зменшується, тому що відстань 5 перетворюється в наступному кроці на 3, тому похибка зменшується в  $5/3$  раз. Найбільша похибка **дорівнює дискретний** 5 і буде зменшуватися по вертикалі. Тому похибка розміру  $z$  визначається крайньою точкою 4 (рис. 3.11).

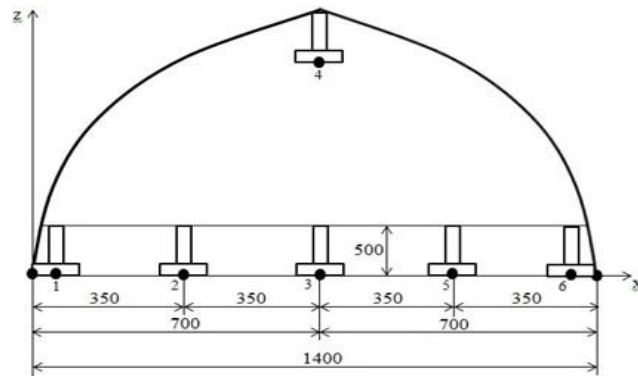
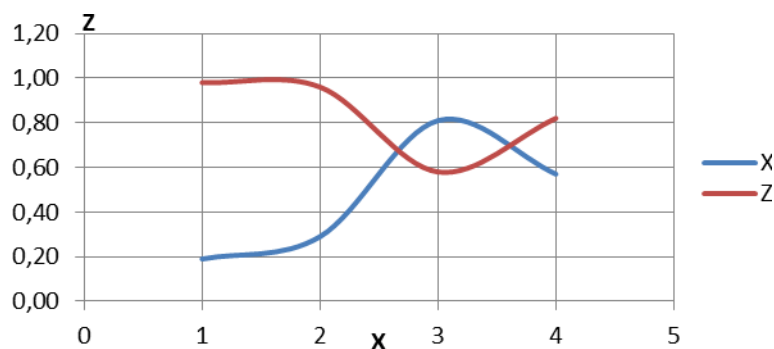


Рисунок 3.11 – Схема розміщення позицій 1...6 при визначенні похибок МПС



**Рисунок 3.12** – Графік похибок ВРПК

Для кожної точки позиції робочого простору точність позиціонування формується кожною рухомою ланкою октопода змінної довжини певної дискретності кроку, тобто точність позиціонування однієї точки визначає вісім рухомих плечей октопода (табл. 3.3).

Вершини рухомих плечей МПС при позиціонуванні здійснюють переміщення по всіх трьох координатах одночасно, оскільки сумарна похибка позиціонування являє собою композицію тривимірних розподілів, що мають тенденцію негативного ексцесу, тобто в сторону зменшення похибки. Тому очікувана похибка буде менше за рахунок того, що використовуються кілька рухомих плечей октопода.



Таблиця 3.3 – Похибка позиціонування робочого органа октопода відносно дискрети виконавчого механізму

X, мм	Y, мм	Z, мм	$\delta_x/\Delta$ , мкм	$\delta_y/\Delta$ , мкм	$\delta_z/\Delta$ , мкм
100,00	100,00	500,00	0,19	0,19	0,98
700,00	700,00	2464,00	0,29	0,29	0,96
700,00	700,00	500,00	0,81	0,81	0,58
350,00	350,00	500,00	0,57	0,57	0,82

Збільшення кількості керованих рухомих плечей октопода із шести до восьми, крім рівнодосяжних у зоні обробки, дозволяє зменшити похибку настройки інструменту. У цьому випадку виключається такий недолік, як інтерференція, за рахунок використання додаткових розмірних ланок.

Значення похибки позиціонування робочого органа октопода відносно дискрети виконавчого механізму використані для побудови просторового апроксиматора з метою визначення еталонної моделі. Для встановлення математичного опису асоціативних зв'язків використано програму з відкритою ліцензією Neuro Pro 0.25 [195].

На основі використання таблиці вихідних даних (див. табл. 3.3) – кортежів (тобто результатів експерименту з відомими вхідними й вихідними даними) навчена нейроподібна мережа, яка містить інформацію про асоціативні зв'язки між відомими векторами входів і виходів технічної системи і являє собою модель досліджуваного процесу, за допомогою якої проведені подальші дослідження (рис. 3.13).

У результаті дослідженої моделі в межах X, Y, Z визначені похибки позиціонування при різних розмірах, що настроюються.

При  $S_n = 300$  мм зі збільшенням координат X і Y похибка позиціонування зростає в межах 350 мм, а похибка позиціонування по Z зменшується в межах 300 мм (рис. 3.14, а); при  $S_n = 500$  мм зі збільшенням координат X і Y похибка позиціонування зростає в межах 400 мм, а похибка позиціонування по Z зменшується в межах 400 мм (рис. 3.14, б).

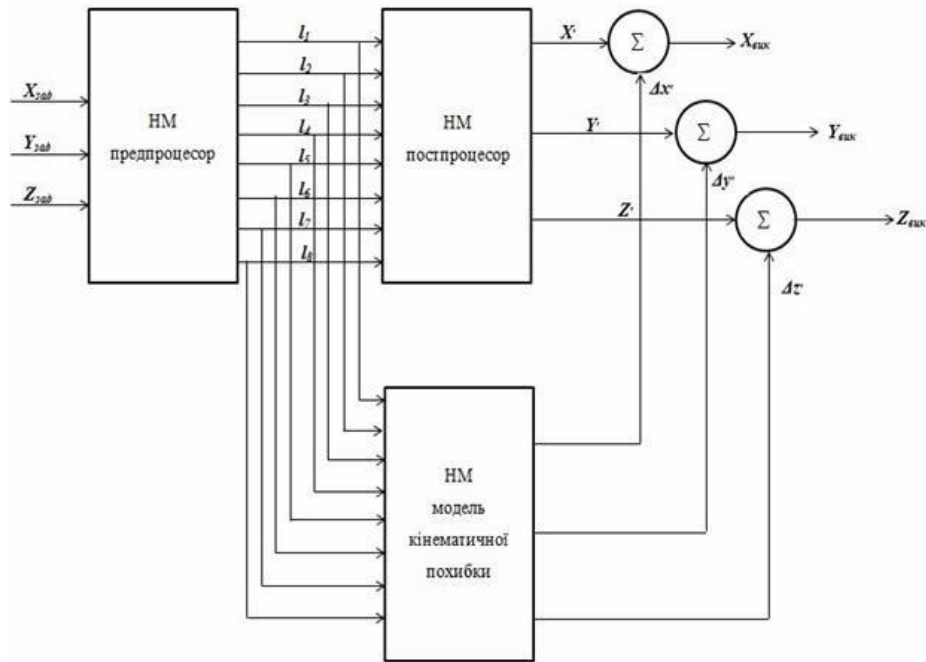


Рисунок 3.13 – Використання просторового апроксиматора з метою визначення еталонної моделі похибки МПС

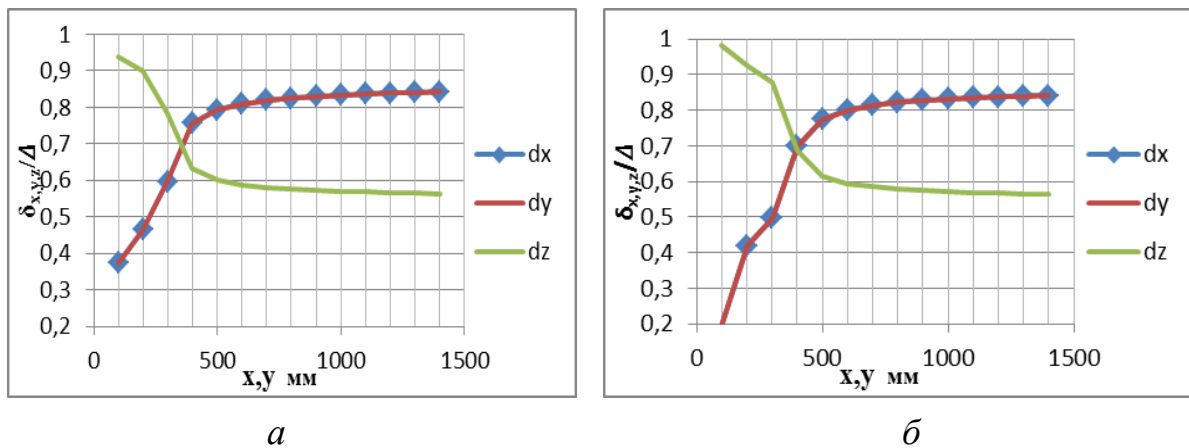


Рисунок 3.14 – Залежність похибки від довжини  $X$  при  $C_H$ :  
 $a$  – 300 мм;  $b$  – 500 мм

Незалежно від довжини  $X$ , найменша похибка спостерігається в зоні 350...400 мм. Тому для обробки малогабаритних деталей рекомендується встановлювати інструмент у зону 400 мм. Максимальна похибка при кінематиці октопода може бути отримана по осі симетрії. Тому найбільш точний розмір повинен виходити в напрямку осі  $Z$ .

На основі розв'язання оберненої задачі кінематики для октопода знайдемо оптимальну траєкторію руху вихідної ланки робота-верстата.

Найпростішим варіантом переміщення вихідної ланки від однієї точки до іншої є траєкторія, представлена у вигляді прямої. У цьому випадку рівняння руху вихідної ланки робота-верстата може бути представлене у вигляді

$$\begin{cases} x_i = f_x(l_1 l_2 l_3 l_4 l_5 l_6 l_7 l_8) \\ y_i = f_y(l_1 l_2 l_3 l_4 l_5 l_6 l_7 l_8) \\ z_i = f_z(l_1 l_2 l_3 l_4 l_5 l_6 l_7 l_8) \end{cases} \quad (3.31)$$

Для навчання нейроподібної мережі задаємо параметри:

де  $x_i$  – координати точок на верхній платформі;  
 $l_i$  – довжини рухомих плечей октопода.

Тут траєкторія руху виражена в параметричному вигляді, де параметр – координати верхньої платформи. Переміщення починається з координати центру платформи в позиції 0.

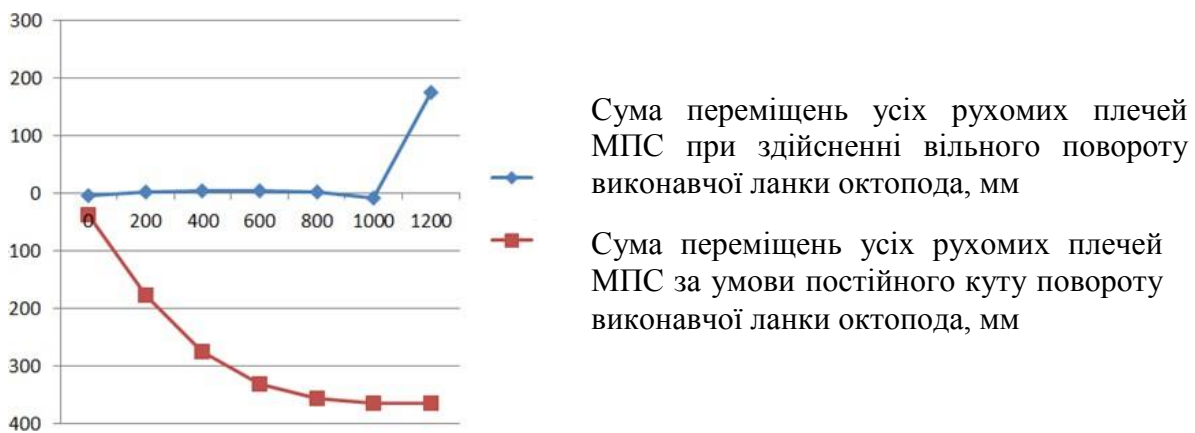
Для пошуку найкоротшого переміщення знайдено мінімальне переміщення кожного рухомого плеча октопода и для кожного кута повороту платформи по всій траєкторій ходу інструменту. Кути повороту платформи:  $\alpha_1 = -30^\circ$ ;  $\alpha_1 = -15^\circ$ ;  $\alpha_1 = 0^\circ$ ;  $\alpha_1 = 15^\circ$ ;  $\alpha_1 = 30^\circ$ .

Змінення довжин рухомих плечей октопода від повороту платформи, при переміщенні вихідної ланки з однієї довільної точки в іншу, може мати вигляд, представлений у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Визначення мінімального переміщення через суму мінімумів переміщень рухомих плеч МПС (мм)

	$X_1 = 0$	$X_2 = 200$	$X_3 = 400$	$X_4 = 600$	$X_5 = 800$	$X_6 = 1000$	$X_7 = 1200$
$\alpha_1$	-4,69	0,55	4,53	4,53	0,55	-14,70	-946,38
$\alpha_2$	-8,95	-16,14	-20,83	-20,83	-16,14	-8,94	609,44
$\alpha_3$	-37,37	-177,92	-276,35	-331,53	-357,45	-365,67	-365,69
$\alpha_4$	-58,95	51,23	132,82	188,00	230,77	227,09	174,21
$\alpha_5$	109,97	142,27	159,82	159,82	142,27	152,22	201,81
$\sum_{min}$	-4,69	0,55	4,53	4,53	0,55	-8,94	174,21

Для отримання оптимального переміщення вибір падає на суму, яка прямує до нуля. Тому для знаходження оптимального руху платформи при обробці поверхні треба будувати траєкторію переміщення (рис. 3.15).

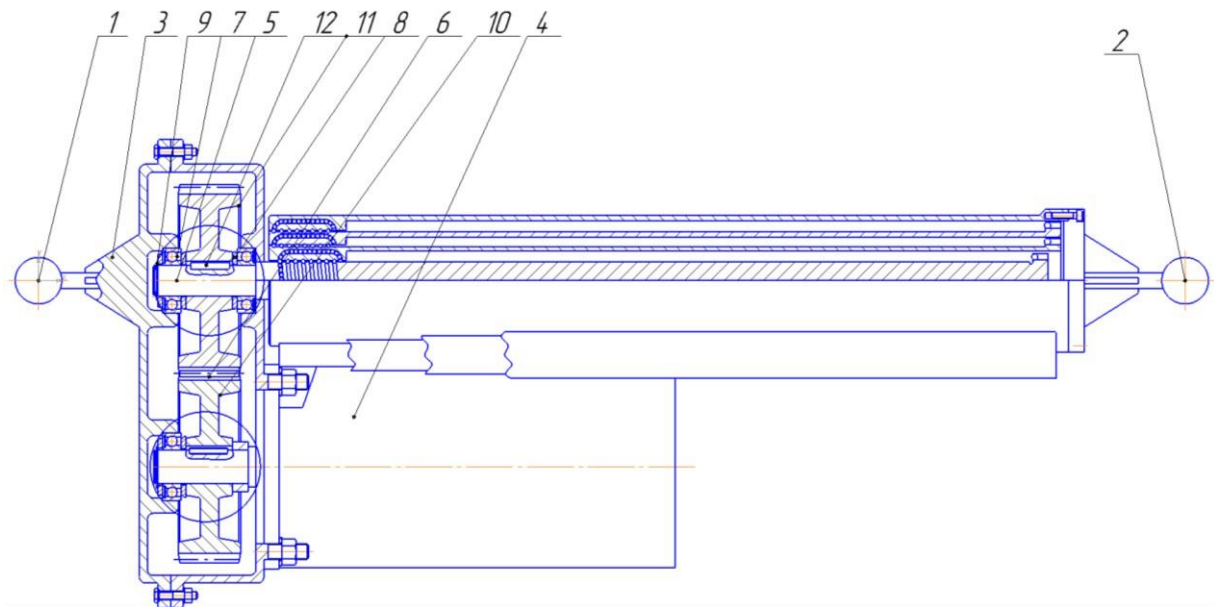


*Рисунок 3.15– Графічне відображення залежності переміщення від кута повороту платформи виконавчої ланки октопода*

Дослідження показали, що виконання прямолінійних переміщень виконавчих ланок МПС супроводжується додатковими переміщеннями рухомих плечей у межах 13...15 %. Однак створення МПС із додатковими надбудовами МПС дозволяє досягати підвищення ефективності механо-складального виробництва із синергетичним ефектом.

### **3.4 Створення рухомого плеча і його динамічний аналіз**

Для отримання уявлення про конструкцію приводу був проведений патентний пошук, у результаті якого можна визначитися з конструкцією приводу. У результаті маємо конструкцію приводу (рис. 3.16), який складається з високомоментного крокового електродвигуна, винесеного збоку плеча і з'єднаного через косозубе зачіплення з телескопічною кульково-гвинтовою передачею.



*Рисунок 3.16 – Рухома ланка МПС*

В основу запропонованої конструкції поставлено задачу вдосконалення **відомого** пристрою шляхом розміщення кулько-гвинтового блоку всередині гвинта.

Поставлена задача вирішується за рахунок того, що ступені привода виконані у вигляді тристоронніх кулько-гвинтових пар, розміщених коаксіально відносно середньої частини телескопічного лінійного приводу, яка приводиться в обертання через косозубе зачеплення за допомогою крокового електродвигуна.

Телескопічний лінійний привод рухомих плечей октопода і мобільного верстата-робота вміщує шарніри 1, 2; шарнір 1 з'єднаний із редуктором 3. Для налаштування приводу на заданий розмір застосований кроковий двигун 4. Через великі габарити кроковий двигун 4 винесено збоку кулько-гвинтової пари, і він передає обертання на вхідний вал 5 за допомогою косозубої зубчастої передачі 6 через редуктор 3. Для фіксації крокового двигуна 4 і вхідного вала 5 у корпусі редуктора 3 використані підшипники 7, шайби 8 і стопорні кільця 9. Для фіксації шестерні 10 і колеса 11 застосували шпонки 12.

Телескопічний лінійний привод рухомих плечей октопода і мобільного верстата-робота працює в такий спосіб.

У робочому стані телескопічний лінійний привід встановлено на шарніри 1, 2, для його налаштування по довжині використовуються: кроковий двигун 4, розташований збоку шаро-гвинтової пари, який передає обертання на вхідний вал 5 за допомогою косозубої зубчастої передачі 6 через редуктор 3; шестерня 10 і колесо 11, які обертаються за допомогою шпонок 12. При вигвинчуванні внутрішньої шаро-гвинтової пари вона чіпляє зовнішню шаро-гвинтову пару, допоки та не вийде повністю.

Застосування телескопічного лінійного приводу рухомих плечей октопода мобільного верстата-робота дає можливість збільшення діапазону лінійних переміщень гвинта, завдяки вдосконаленню конструкції гвинтових пар та їхнього розташування.

При розрахунку електромеханічного приводу необхідно визначити наступні основні характеристики ИММ, до яких відносяться:

1. Граничні значення чисел оборотів шпинделя, необхідних при обробці заданих металів, при заданих умовах різання:

$$n_{min} = 5000 \text{ об/мин}; n_{max} = 20000 \text{ об/мин.} \quad (3.32)$$

2. Діапазон регулювання кількості обертів

$$R = \frac{n_{max}}{n_{min}} = \frac{20000}{5000} = 4. \quad (3.33)$$

Основні характеристики важливі, оскільки є вихідними даними для кінематичного й силового розрахунку всіх елементів проєктованих елементів МПС.

Вибір граничних режимів різання, які мають здійснюватися на верстаті, розраховують при виконанні різних видів робіт і на основі аналізу отриманих результатів.

Глибину різання й подачі вибирають із нормативних документів [131] і в залежності від робіт, які передбачається виконувати. Як правило, розрахунок ведуть за основною (провідною) операцією, для якої спроектований верстат.

Найбільше значення сил різання необхідно визначати при наступних умовах: оброблюваний матеріал заготовки сірий чавун СЧ 70 ГОСТ 1412-85  $\sigma_B = 700$  МПа; матеріал різальної частини різця – ВК6-ОМ; глибина різання і подача найбільші:

$$K_{MV} = K_r \cdot \left(\frac{750}{700}\right)^{Nv} = 0.9 \cdot \left(\frac{750}{700}\right)^{1.75} = 1.13 \quad (3.34)$$

$$K_V = K_{MV} \cdot K_{NV} \cdot K_{UV} = 1.13 \cdot 0.8 \cdot 0.3 = 0.2712 \quad (3.35)$$

$$V_{max} = \frac{C_V}{T^m \cdot S^y} \cdot K_V = \frac{420}{30^{0.15} \cdot 0.005^{0.2}} = 724 \text{ м/мин} \quad (3.36)$$

$$K_{mp} = \left(\frac{750}{\sigma_B}\right)^n = \left(\frac{750}{750}\right)^{0.75} = 1 \quad (3.37)$$

$$K_p = K_{mv} \cdot K_{\varphi p} \cdot K_{\gamma v} \cdot K_{\lambda p} \cdot K_{rp} = 1.13 \cdot 1.08 \cdot 1.15 \cdot 1 \cdot 1.1 = 1.54 \quad (3.38)$$

Силу різання прийнято розкладати на складові сили, спрямовані по осях координат верстата, але оскільки сила різання  $P_z$  є найбільшою, тоді ми можемо розрахувати силу різання в програмному пакеті SMath.

При вихідних даних  $d$  фрези = 200 мм, часі обробки  $T = 30$  хв, матеріалі заготовки СЧ70, глибині різання  $t = 0,005$ мм отримано  $P_z = 200$  Н.

Ефективна (корисна) потужність різання

$$N_{\text{эф}} = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60} = \frac{200 \cdot 724}{1020 \cdot 60} = 2,3 \text{ кВт}, \quad (3.39)$$

де  $P_z$  – найбільше значення сил різання.

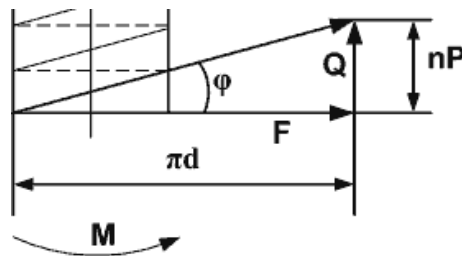
Попереднє значення потужності електродвигуна головного руху [222] (до визначення кінематичної структури приводу) визначається за формулою

$$N_{эд} = \frac{N_{эф}}{\eta} = \frac{0,65}{0,9} = 2,62 \text{ кВт}, \quad (3.40)$$

де  $\eta$  – ККД ланцюга головного руху (для верстатів з обертальним головним рухом  $\eta = 0,7 \dots 0,85$ ).

Для того щоб вибрати кроковий двигун, потрібно визначити необхідний крутний момент  $M$ , що діє на обертову деталь (у цьому випадку шаблі механізму), для подолання осьового навантаження  $Q$  при рівномірному русі:

$$M = \frac{F_d}{2} = \frac{1}{2} Qd \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (3.41)$$



**Рисунок 3.17** – Розрахункова схема для визначення  $M_{кр}$ :  
 $d$  – діаметр гвинта,  $P$  – крок гвинта,  $n$  – кількість заходів

Хід різьби за повний оберт

$$Ph = nP. \quad (3.42)$$

Кут підйому різьби

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left( \frac{nP}{nd} \right). \quad (3.43)$$

Для того щоб визначити крутний момент, необхідний від двигуна проведемо розрахунок максимальної осьової сили для максимального діаметру приводу – ступені найбільшого діаметру. Для спрощення попереднього розрахунку крутного моменту приймемо, що механізм є одноступінчастим. Розрахунок проведемо по максимальному діаметру ступенів.



Якщо досить довгий гвинт працює на стискування, його перевіряють на стійкість при найбільшому тяговому зусиллі  $Q$ , що приймається за критичну силу. З урахуванням того, що момент інерції перерізу гвинта визначають не для мінімального діаметра, а умовного  $d_0$ , отримують наближену залежність:

$$Q_{max} \approx \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2} \quad (3.44)$$

де  $E = 2 \cdot 10^5$  – модуль пружності матеріалу гвинта;

$$I = \frac{\pi \cdot d^4}{64} = \frac{\pi \cdot 0,070^4}{64} = 0,0000012 \text{ м}^2, \quad (3.45)$$

$I$  – момент інерції гвинта;

$\mu$  – коефіцієнт, що залежить від характеру закладення кінців гвинта (при обох шарнірних опорах  $\mu = 1$ );

$L = 500$  – найбільша відстань між гайкою і опорою гвинта.

$$Q_{max} = \frac{\pi^2 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,0000012}{(1 \cdot 0,5)^2} = 9,5 \text{ Н} \quad (3.46)$$

Обертаючий момент

$$M = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot d_{max} \cdot \text{tg} \varphi = \frac{1}{2} \cdot 9,5 \cdot 0,070 \cdot \text{tg}(89,71) = 48 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (3.47)$$

За отриманим розрахунком обрано двигун для лінійного приводу мод. FL130VYG2503. При збільшенні ступенів КГП до п'яти ККД буде дорівнювати приблизно 0,913.

Передача гвинт-гайка кочення має властивості, що дозволяють застосовувати її як у приводах подач без відліку переміщень (універсальних верстатів, силових столів агрегатних верстатів), так і в приводах подач і позиціонування верстатів із ЧПУ. Для передачі характерні високий коефіцієнт корисної дії (0,8...0,9), невелике розходження між силами тертя

руху й спокою, незначний вплив частоти обертання гвинта на силу тертя в механізмі, повна відсутність осьового зазору [235].

Приймаємо передачу з двома гайками. Пристрої для повернення кульок виконані у вигляді вкладишів, вставлених у три вікна кожної гайки. Вкладиші з'єднують два сусідніх витки гвинтової канавки, зрушені один щодо одного в осьовому напрямку на один її крок, і поділяють кульки в кожній гайці на три циркулюючі групи.

Для тонкого регулювання натягу гайки забезпечені зубчастими вінцями на фланцях, які входять у внутрішні зубчасті вінці корпусу. На одному фланці кількість зубів на одиницю більше, ніж на іншому. Якщо вінці обох фланців вивести з корпусу, повернути гайки в одну сторону на однакову кількість зубів (на нерівні кути) і знову з'єднати зубчасті вінці, можна завдяки невеликому осьовому зближенню профілів різьби гайок створити заданий натяг.

Передача гвинт-гайка кочення виходить із ладу в результаті втоми поверхневих шарів кульок, гайки й гвинта, утрати стійкості гвинта, зношування елементів передачі й зниження точності.

Можливими причинами виходу її з ладу є: занадто велике навантаження на гвинт, низька розрахункова довговічність, значний відносний перекіс гвинта й гайки, незадовільний захист від забруднень. Мета розрахунку передачі полягає у визначенні номінального діаметра гвинта  $d_0$  і в підборі за каталогом такої передачі, яка задовольняла б усім вимогам до працездатності.

Попередній натяг, підвищуючи осьову жорсткість передачі, збільшує момент холостого ходу й знижує її довговічність, тому сила попереднього натягу повинна бути обрана обґрунтовано.

За мінімально допустиму силу натягу  $P_{\text{Hmin}}$  (Н), віднесenu до одної кульки, приймають таку силу, яка забезпечує збереження попереднього натягу у гвинтовій передачі при дії поздовжньої сили  $Q$ :

$$P_{H_{min}} = \frac{Q}{2 \cdot k_z \cdot Z_1 \cdot u \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta} = \frac{13705,89}{2 \cdot 0,7 \cdot 26 \cdot 8 \cdot \sin 45^\circ \cdot \cos 1,1138} = 66,59 \text{ Н.} \quad (3.48)$$

Найбільша допустима сила натягу, віднесена до однієї кульки, при якій зберігається статична міцність механізму, Н:

$$P_{H_{max}} = P \left( 1 - \frac{0,55Q}{C_0} \right) = 437,5 \left( 1 - 0,55 \frac{0,55 \cdot 13705,89}{48510,10} \right) = 369,52 \text{ Н.} \quad (3.49)$$

У залежності від потрібної жорсткості передачі, її довговічності, допустимого нагріву гвинта й особливостей вимірювального перетворювача переміщень силу натягу вибирають найчастіше

$$P_H = 1,5 \cdot P_{H_{min}} = 1,5 \cdot 66,59 = 99,885 \text{ Н.} \quad (3.50)$$

Оскільки в процесі роботи на гвинтову передачу діють різні за значенням і часом дії навантаження, а частота обертання гвинта не залишається постійною, методика вибору передачі за динамічною вантажопідйомністю вимагає визначення еквівалентного навантаження та еквівалентної частоти обертання (табл. 3.5).

**Таблиця 3.5** – Режими навантаження гвинта протягом його експлуатації

Відносний час роботи в частках від загального, t	Частота обертання гвинта n, об./хв	Осьове навантаження Q, Н
0,45	0,05	4 460
0,3	10	3 510
0,2	62	2 870
0,05	380	446

Допустима тривалість роботи механізму, виражена в годинах:

$$T = \frac{N}{60n} = \frac{11680,75 \cdot 10^6}{60 \cdot 34,43} = 5,65 \cdot 10^6 \text{ ч.} \quad (3.51)$$

Оскільки необхідну тривалість роботи механізму до настання втоми будь-якого її елемента приймають рівною близько 10 000 годин, то можна залишити параметри поточного механізму.

Якщо досить довгий гвинт працює на стиск, його перевіряють на стійкість при найбільшому тяговому зусиллі  $Q$ , що приймається за критичну силу. З урахуванням того, що момент інерції перерізу гвинта визначають не для мінімального діаметра, а умовного  $d_0$ , отримують наближену залежність

$$Q_{max} \approx \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2}, \quad (3.52)$$

де  $E = 2 \cdot 10^5$  – модуль пружності матеріалу гвинта;

$$I = \frac{\pi \cdot d^3}{32} = \frac{\pi \cdot 25^3}{32} = 0,0000015 \text{ м}^2, \quad (3.53)$$

де  $I$  – момент інерції перерізу гвинта;  $\mu$  – коефіцієнт, що залежить від характеру закладення кінців гвинта (якщо обидва кінці гвинта затиснуті,  $\mu$  приймають рівним 0,5; при одному затиснутому кінці й розміщенні другого на шарнірній опорі, має можливість зміщуватися в осьовому напрямку,  $\mu = 0,707$ ; при обох шарнірних опорах  $\mu = 1$ ; при одному затиснутому кінці і другому вільному  $\mu = 2$ );  $l = 500$  – найбільша відстань між гайкою і опорою гвинта.

$$Q_{max} = \frac{\pi^2 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,0000015}{(0,707 \cdot 500)^2} = 2,49 \text{ Н}. \quad (3.54)$$

У моменти швидких переміщень робочого органа верстата, коли гвинт обертається з високою частотою, відцентрові сили можуть викликати втрату стійкості, що проявляється в появі вібрацій.

Критична частота обертання гвинта (об./хв)

$$n_k = \frac{5 \cdot 10^7 \cdot d \cdot v \cdot k}{l^2} = \frac{5 \cdot 10^7 \cdot 23,75 \cdot 2,2 \cdot 0,8}{500^2} = 836 \frac{\text{об.}}{\text{мин}}, \quad (3.55)$$

де  $d$  – внутрішній діаметр різьби гвинта, мм;  $v$  – коефіцієнт, що залежить від способу закладення гвинта (якщо один кінець гвинта закладено жорстко,

а другий вільний,  $\nu$  приймають рівним 0,7; у випадку обох опорних кінців  $\nu = 2,2$ ; якщо один кінець закладено жорстко, а інший опорний,  $\nu = 3,4$ ; коли обидва кінці закладені жорстко,  $\nu = 4,9$ ;  $k = 0,5 \dots 0,8$  – коефіцієнт запасу;  $l$  – відстань між опорами гвинта, мм.

Необхідний діаметр ходового гвинта  $d_0$  можна визначити з умови забезпечення жорсткості приводу, яка пов'язана із жорсткістю кулько-осьова жорсткість приводу впливає на можливість виникнення і його резонансних коливань.

Щоб не допустити резонансного режиму, власну частоту коливань механічної частини приводу  $j$  приймають у 3...3,5 рази більшою, ніж частота  $f_1$  імпульсів, що виробляються системою вимірювання переміщень.

Для великих верстатів  $f_1 = 10 \dots 15$  Гц, для середніх і малих  $f_1 = 15 \dots 25$  Гц. Виходячи з допустимої частоти коливань механічної частини приводу  $f$ , визначають його необхідну жорсткість (Н/мм):

Жорсткість кулько-гвинтового механізму з попереднім натягом і вертанням кульок через вкладиші при  $r_1/r_2 = 0,96$ .

Значення жорсткості опор гвинта (Н/мм):

$$j_0 = e \cdot d_0 = 10 \cdot 25 = 250 \text{ Н/мм}, \quad (3.56)$$

де  $e = 5; 10; 30$ , відповідно, для радіально-упорних, кулькових і роликів підшипників;  $d_0$  – в міліметрах.

### ***Вибір і розрахунок передачі гвинт-гайка (II ступінь)***

#### ***Вибір гвинта***

Параметри гвинта приймаємо:

$$d_0 = 45 \text{ мм}; p = 5 \text{ мм}.$$

#### ***Вибір гайки***

У цьому механізмі, як і в інших з поверненням кульок через вкладиші, робоча кількість кульок в одному витку

$$Z_1 = \frac{\pi \cdot d_0}{d_{\text{ш}}} - \frac{3p}{\text{ш}} = \frac{3,14 \cdot 45}{2,5} - \frac{3 \cdot 5}{2,5} \approx 51, \quad (3.57)$$

$$Z_p = k_z \cdot Z_1 = 0,75 \cdot 34 = 38,25, \quad (3.58)$$

де  $k_z = 0,7 \dots 0,8$  – коефіцієнт, що враховує похибки виготовлення різі гвинтового механізму.

### **Розрахунок передачі гвинт-гайка кочення (II ступінь)**

Крутний момент на ходовому гвинті, **Н·м:**

$$M = \frac{M_d \cdot \eta}{i} = \frac{20 \cdot 0,9}{0,5} = 36 \frac{\text{Н}}{\text{м}}, \quad (3.59)$$

де  $M$  – крутний момент на валу двигуна;

$\eta$  – КПД гільки від двигуна до гвинта;

$i$  – передаточне відношення цього ланцюга.

**Окружна сила** на радіусі різі, Н:

$$\beta = \frac{\text{arctg}(p)}{\pi \cdot d_0} = \frac{\text{arctg}5}{(\pi \cdot 32)} = 0,870, \quad (3.60)$$

**кут підйому різі:**

$\rho = \text{arctg}(f)$  – кут тертя, тут  $f$  – коефіцієнт тертя кочення,  $f = (57 \dots 85) \cdot 10^{-5}$ .

$$\rho = \text{arctg}(70 \cdot 10^{-5}) = 0,038,$$

$$Q = \frac{1937,5}{\text{tg}(0,870 + 0,038)} = 13548,95 \text{ Н.}$$

Гранично допустиме нормальне статичне навантаження на одну кульку (Н) визначають за залежністю

$$P = k_\sigma \cdot d_1^2 = 70 \cdot 2,5^2 = 437,5 \text{ Н}, \quad (3.61)$$

де  $k_\sigma$  – коефіцієнт, що залежить від допустимої контактної напруги на поверхні кульки  $\sigma_H$  (при  $\sigma_H = 2500; 3000; 3500$  і  $3800$  МПа відповідно  $k_\sigma = 20; 35; 55$  і  $70$ ; для звичайної передачі застосовувано  $k_\sigma = 70$ );  $d_1$  – діаметр кульки.

Статична вантажопідйомність  $C_0$  – це гранично допустиме осьове навантаження на гвинт, у результаті дії якого виникає загальна залишкова деформація тіл кочення, гайки й гвинта в найбільш навантаженій зоні контакту, що дорівнює  $0,0001$  діаметра тіла кочення:

$$C_0 = 70 \cdot k_z \cdot d_1 \cdot (\pi \cdot d_0 - 3 \cdot p) \cdot u \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta, \quad (3.62)$$

$$70 \cdot 0,7 \cdot 2,5 \cdot (\pi \cdot 32 - 3 \cdot 5) \cdot \sin 45^\circ \cdot \cos 0,870 = 7402,52 \text{ Н},$$

де  $u = 8$  – кількість витків в гайці;  $\alpha = 45^\circ$  – кут контакту кульки з гвинтом і гайкою;  $k_z = 0,7 \dots 0,8$  – коефіцієнт, що враховує похибки виготовлення різі гвинтового механізму.

### ***Розрахунок попереднього натягу передачі гвинт-гайка (II ступінь)***

За мінімально допустиму силу натягу  $P_{Hmin}$  (Н), віднесена до одної кульки, приймають таку силу, яка забезпечує збереження попереднього натягу у гвинтовій передачі при дії поздовжньої сили  $Q$ :

$$P_{Hmin} = \frac{Q}{2 \cdot k_z \cdot Z_1 \cdot u \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta} = \frac{13548,95}{2 \cdot 0,7 \cdot 34 \cdot 8 \cdot \sin 45^\circ \cdot \cos 0,87} = 292,00 \text{ Н}. \quad (3.63)$$

Найбільша допустима сила натягу, віднесена до однієї кульки, при якій зберігається статична міцність механізму,  $H$ :

$$P_{Hmax} = P \left( 1 - \frac{0,55Q}{C_0} \right) = 437,5 \left( 1 - 0,55 \frac{0,55 \cdot 13548,95}{7402,52} \right) = 195,27 \text{ Н}. \quad (3.64)$$

У залежності від потрібної жорсткості передачі, її довговічності, допустимого нагріву гвинта й особливостей вимірювального перетворювача переміщень, силу натягу вибирають найчастіше

$$P_H = 1,5 \cdot P_{H_{\min}} = 1,5 \cdot 292,0 = 438,0 \text{ Н.} \quad (3.65)$$

Динамічною вантажопідйомністю передачі називають таку постійну осьову навантаження, яку повинен витримати кулько-гвинтовий механізм протягом 106 обертів.

Прийнято, що на передачу з боку гайки діють осьові навантаження  $Q_1(1), Q_2(1), \dots, Q_k(1)$  при відповідних частотах обертання гвинта (гайки)  $n_1(1), n_2(1), \dots, n_k(1)$  протягом інтервалів часу  $t_1(1), t_2(1), \dots, t_k(1)$  (табл. 3.6).

Тоді сили, що діють на гайку передачі,

$$Q'_{i(1)} = P_H \cdot \left(1 + \frac{Q_{i(1)}}{4P_H}\right), \quad (3.66)$$

де  $P_H$  – сила попереднього натягу в кулько-гвинтовому механізмі;

$i = 1, 2, \dots, k$ .

У цьому випадку друга гайка навантажена силами

$$Q'_{i(2)} = Q'_{i(1)} - Q_{i(2)}. \quad (3.67)$$

Якщо з боку другої гайки діють осьові навантаження  $Q_1(2), Q_2(2), \dots, Q_s(2)$  при відповідних частотах обертання гвинта (гайки)  $n_1(2), n_2(2), \dots, n_s(2)$  протягом інтервалів часу  $t_1(2), t_2(2), \dots, t_s(2)$ , то вона навантажена силами

$$Q'_{i(2)} = P_H \cdot \left(1 + \frac{Q_{i(2)}}{4P_H}\right), \quad (3.68)$$

а перша:

$$Q'_{i(2)} = Q'_{i(1)} - Q_{i(2)}. \quad (3.69)$$



Середня частота обертання гвинта при постійному навантаженні

$$\bar{n} = \frac{n_{1(1)}t_{1(1)} + n_{2(1)}t_{2(1)} + \dots + n_{k(1)}t_{k(1)}}{t_{1(1)} + t_{2(1)} + \dots + t_{k(1)}}. \quad (3.70)$$

Таблиця 3.6 – Режими навантаження гвинта протягом його експлуатації

Відносний час роботи в частках від загального, t	Частота обертання гвинта n, об./хв	Осьове навантаження Q, Н
0,45	0,05	4403,40
0,3	10	3460,90
0,2	62	2829,80
0,05	380	439,80

Сили, що діють на першу гайку передачі:

$$Q'_{1(1)} = 292 \cdot \left(1 + \frac{4403,4}{4 \cdot 292}\right) = 1392,85 \text{ Н},$$

$$Q'_{2(1)} = 292 \cdot \left(1 + \frac{3460,9}{4 \cdot 292}\right) = 1157,23 \text{ Н},$$

$$Q'_{3(1)} = 292 \cdot \left(1 + \frac{2829,8}{4 \cdot 292}\right) = 999,45 \text{ Н},$$

$$Q'_{4(1)} = 292 \cdot \left(1 + \frac{439,8}{4 \cdot 292}\right) = 401,95 \text{ Н}.$$

Сили, що діють на другу гайку передачі:

$$Q'_{1(2)} = 4403,4 - 1392,85 = 3010,55 \text{ Н},$$

$$Q'_{2(2)} = 3460,9 - 1157,23 = 2303,67 \text{ Н},$$

$$Q'_{3(2)} = 2829,8 - 999,45 = 1830,35 \text{ Н},$$

$$Q'_{4(2)} = 439,8 - 401,95 = 37,85 \text{ Н},$$

Середня частота обертання гвинта при постійному навантаженні

$$\bar{n} = \frac{0,05 \cdot 0,45 + 10 \cdot 0,3 + 62 \cdot 0,2 + 380 \cdot 0,05}{0,45 + 0,3 + 0,2 + 0,05} = 34,43 \text{ об/мин}$$

Еквівалентне навантаження

$$Q_3 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^k (Q_{i(1)})^3 n_{i(1)} t_{i(1)}}{\bar{n}} + \frac{\sum_{j=1}^k (Q_{i(2)})^3 n_{i(2)} t_{i(2)}}{\bar{n}} \right]^{\frac{1}{3}} = 2475,35 \text{ Н.} \quad (3.71)$$

Допустима тривалість роботи механізму, виражена в оборотах,

$$N = \left( \frac{C}{Q_3} \right)^3 10^6 = \left( \frac{7402,52}{2475,35} \right)^3 10^6 = 26,75 \cdot 10^6. \quad (3.72)$$

Оскільки необхідну тривалість роботи механізму до настання втоми будь-якого її елемента приймають рівній близько 10 000 годин, то можна залишити параметри поточного механізму.

Якщо досить довгий гвинт працює на стискання, його перевіряють на стійкість при найбільшому тяговому зусиллі  $Q$ , що приймається за критичну силу. З урахуванням того, що момент інерції перерізу гвинта визначають не для мінімального діаметра, а умовного  $d_0$ , отримують наближену залежність

$$Q_{max} \approx \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2}, \quad (3.73)$$

де  $E = 2 \cdot 10^5$  – модуль пружності матеріалу гвинта;

$I$  – момент інерції перерізу гвинта:

$$I = \frac{\pi \cdot d^3}{32} = \frac{\pi \cdot 32^3}{32} = 0,0000032 \text{ м}^2, \quad (3.74)$$

$\mu$  – коефіцієнт, що залежить від характеру закладення кінців гвинта (якщо обидва кінці гвинта затиснуто,  $\mu$  приймають рівним 0,5; при одному затиснутому кінці й розміщенні другого на шарнірній опорі, що має можливість зміщуватися в осьовому напрямку,  $\mu = 0,707$ ; при обох шарнірних опорах  $\mu = 1$ ; при одному затиснутому кінці й другому вільному  $\mu = 2$ );

$l = 500$  – найбільша відстань між гайкою і опорою гвинта.

$$Q_{max} = \frac{\pi^2 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,0000032}{(0,707 \cdot 500)^2} = 5,79 \text{ Н.}$$

У моменти швидких переміщень робочого органа верстата, коли гвинт обертається з високою частотою, відцентрові сили можуть викликати втрату стійкості, що проявляється в настанні вібрацій.

Критична частота обертання гвинта (об./хв)

$$n_k = \frac{5 \cdot 10^7 \cdot d \cdot \nu \cdot k}{l^2} = \frac{5 \cdot 10^7 \cdot 30,75 \cdot 2,2 \cdot 0,8}{500^2} = 10824 \frac{\text{об}}{\text{мин}} \quad (3.75)$$

де  $d$  – внутрішній діаметр різі гвинта, мм;  $\nu$  – коефіцієнт, що залежить від способу закладення гвинта (якщо один кінець гвинта закладено жорстко, другий вільний,  $\nu$  приймають рівним 0,7; у випадку обох опорних кінців  $\nu = 2,2$ ; якщо один кінець закладено жорстко, а інший опорний,  $\nu = 3,4$ ; коли обидва кінця закладені жорстко,  $\nu = 4,9$ );  $k = 0,5 \dots 0,8$  – коефіцієнт запасу;  $l$  – відстань між опорами гвинта, мм.

Необхідний діаметр ходового гвинта  $d_0$  можна визначити з умови забезпечення жорсткості приводу, яка пов'язана із жорсткістю кулько-гвинтового механізму  $j_M$ , гвинта  $j_B$  і його опор  $j_0$ :

$$\frac{1}{j} = \frac{1}{j_M} + \frac{1}{j_B} + \frac{1}{j_0} = \frac{1}{682,43} + \frac{1}{1286000} + \frac{1}{320} = 0,0046 \text{ Н/мм.} \quad (3.76)$$

Осьова жорсткість приводу впливає на можливість виникнення його резонансних коливань. Для великих верстатів  $f_1 = 10 \dots 15$  Гц, для середніх і малих  $f_1 = 15 \dots 25$  Гц. Виходячи з допустимої частоти коливань механічної частини приводу  $f$ , визначають його необхідну жорсткість (Н/мм):

$$j = 4 \cdot 10^{-6} \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot m = 4 \cdot 10^{-6} \cdot 3,14^2 \cdot 25^2 \cdot 10 = 0,247 \text{ Н/мм.} \quad (3.77)$$

де  $m$  – маса вузлів механічної частини приводу, кг (ходового гвинта, виконавчого вузла прийmemo  $m \approx 10$  кг). Жорсткість кулько-гвинтового механі-

зму з попереднім натягом і поверненням кульок через вкладиші при  $r_1/r_2 = 0,96$

$$j_M = 6 \cdot k_\delta \cdot u \cdot \left( \frac{d_0}{p} - 1 \right) \cdot \sqrt[3]{0,1 \cdot P'_H \cdot p} =$$

$$= 6 \cdot 0,5 \cdot 8 \cdot \left( \frac{32}{5} - 1 \right) \cdot \sqrt[3]{0,1 \cdot 292 \cdot 5} = 682,43 \text{ Н/мм.} \quad (3.78)$$

де  $k_\delta = 0,3 \dots 0,5$  – коефіцієнт, що враховує похибки виготовлення гайки, а також деформації у гвинтовому механізмі та в усіх його стиках.

Найменша жорсткість ходового гвинта залежить від способу установа-лення його на опорах. При защемленні обох кінців (Н/М)

$$j_B = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot E}{l_1} = \frac{3,14 \cdot 32^2 \cdot 2 \cdot 10^5}{500} = 12,86 \cdot 10^5 \text{ Н/мм.} \quad (3.79)$$

Наближене значення жорсткості опор гвинта (Н/МКМ)

$$j_0 = e \cdot d_0 = 10 \cdot 32 = 320 \text{ Н/мм.} \quad (3.80)$$

де  $e = 5; 10; 30$ , відповідно, для радіально-упорних, кулькових і роликівих підшипників.

Для змазування кулько-гвинтового механізму застосовують рідкий або пластичний мастильний матеріал. Масло типу індустріального підводиться до корпусу, у якому встановлені гайки. Використовується змазування наступних видів: крапельне, порційне, циркуляційне, масляним туманом. Пластичний мастильний матеріал типу солідолу застосовується, коли при використанні рідкого виникають труднощі; у невеликому обсязі його закладають у гвинтові канавки гайки. Ефективними є масла з проти-задирними присадками, особливо у зв'язку з тим, що в каналах повернення має місце тертя ковзання.

Для запобігання гвинтів від забруднення застосовані захисні при-строї в сукупності з пристроями ущільнення й очищення. Захисні телеско-пічні трубки з ущільненнями, маючи значні габарити, можуть бути вико-

ристані лише при збільшенні довжини гвинта. Телескопічні кожухи добре захищають гвинт і не займають багато місця. Короткі гвинти можуть бути захищені сталевими стрічками, згорнутими в спіраль.

Добре очищає гвинт охоплююча його фетрова або повстяна втулка з різьбою по внутрішній поверхні, однак при зношуванні вона гірше виконує свої функції. При використанні втулки з нейлону виникає менша сила тертя в контакті з гвинтом, і втулка менше шаржується твердими частинками.

У торця гайки, де гвинт угвинчується в неї, виникає контакт із натягом між гвинтовими профілями кілець і гвинта. При зміні напрямку його обертання такий самий контакт виникає у протилежного торця гайки. Зношування кілець не впливає на якість роботи пристрою. Для відводу забруднень у кільцях передбачені похилі пази.

Одним із суттєвих підходів до процесу проєктування технічних об'єктів є використання САЕ-пакетів для моделювання фізико-технічних об'єктів та систем, таких як LMS Imagine.Lab AMESim [65, 66, 67], Automation Studio [7], Modelica[6], MapleSim [70], SimulationX, MATLAB Simulink і SolidWorks, у яких розрахунки проєктованих моделей проводяться з допомогою числових методів вирішення диференціальних рівнянь.

Серед САЕ-пакетів, представлених на ринку, можна відмітити пакет AMESim. Щодо інших популярних програм, таких як MATHLAB і SolidWorks, то вони потребують більше часу для отримання готового рішення.

LMS Imagine.Lab AMESim – комплексна платформа 1D багатодисциплінарного системного моделювання мехатронних систем. Платформа дозволяє оцінити функціональні вимоги на початковій стадії проєктування виробу або системи та закінчуючи стадією доводки. Можливість об'єднання в рамках однієї моделі елементів систем різної фізичної природи, або, іншими словами, багатодисциплінарний підхід, суттєво полегшує і пришвидшує процес моделювання. Необхідно лише задати зв'язки між досліджуваними елементами системи. Комплект великої кількості спеціалізованих бібліотек компонентів дозволяє скоротити витрати часу й зусиль

при розробці нового виробу. Ще до початку проведення випробувань прототипу визначаються найбільш оптимальні параметри.

Провідні постачальники й розробники у автомобільній і аерокосмічній галузях промисловості, а також підприємства загального машинобудування вибрали програмну платформу LMS Imagine.Lab AMESim як основу для функціонального моделювання. Список користувачів програмної платформи включає такі компанії, як General Motors, Toyota, Renault, PSA Peugeot Citroen, Bosch, Siemens, Delphi, Airbus, Embraer, Dassault, Snecma, Caterpillar, Komatsu, CNH та ін. Є великий набір рішень, сконцентрований на можливостях моделювання для оцінки поведінки певних функціональних підсистем та для проведення функціонального аналізу двигунів внутрішнього згоряння, трансмісій, систем «термобаланс», динаміки автомобіля, гідро- і газодинамічних систем, навантажень на шасі літака, систем керування польотом і електричних систем.

Інтерактивне графічне середовище AMESim дозволяє будувати складні мультифізичні системні моделі. Отримана схема легко читається і представляє логічну інтерпретацію досліджуваної системи. Основу AMESim становить колекція компонентів із різних фізичних областей. Процес моделювання в AMESim гранично простий і заснований на використанні стандартних блоків – фізичних моделей типових елементів (таких як, наприклад, гідроциліндр, електродвигун або термостат). AMESim повністю звільняє користувача від необхідності створення аналітичних моделей, написання скриптів або програмування й забезпечує безпосереднім інструментом для аналізу та оптимізації проектного рішення.

Архітектура AMESim дозволяє реалізувати технічне рішення за чотири кроки: у режимі ескізу відбувається побудова ескізу моделі з готових блоків, наявних у бібліотеці; режим підмоделі дозволяє обирати підмоделі для компонентів системи; у режимі параметрів задаються відомі параметри підмоделей; режим симуляції виконує обробку даних і отримання результатів.

Завдяки наявності в AMESim різноманітних бібліотек для динамічного моделювання, цей програмний пакет був використаний для побудови ескізу приводу верстата-робота (рис. ), з подальшим складанням ескізу верстата-робота повністю.

Процес моделювання системи складається зі створення ескізу системи, призначення підмоделей компонентів, завдання параметрів і запуску симуляції. Кожен крок виконується в певному робочому режимі:

1. Режим ескізу (Sketch mode) – перший крок побудови моделі, у якому на робочому полі збирається модель системи з елементів бібліотек. Режим ескізу дозволяє створити нову систему, змінити або завершити існуючу, видалити компоненти.

2. Режим підмоделі (Submodel mode) передбачає процес призначення підмоделей обраних компонентів (рівень математичного опису процесів, що відбуваються в компонентах). Можна скористатися функцією Premier submodel – автоматичне призначення головних (елементарних) підмоделей.

3. Режим параметрів (Parameter mode) дозволяє задавати й змінювати параметри, копіювати параметри підмоделей, установлювати глобальні параметри (Global parameters), відображати основні параметри обраної області ескізу, вибрати серійний запуск (Batch run). Коли параметри задані, AMESim компілює систему. При цьому створюється виконуваний файл. Цей файл робить симуляцію можливою.

4. Режим симуляції (Simulation mode) дозволяє запустити стандартну або серійну симуляцію, створювати, зберігати й завантажувати графіки, почати лінеаризацію системи, провести її аналіз.

Треба відзначити, що якщо потрібно, можна створити моделі компонентів, які будуть повністю сумісні з існуючими моделями та готові для повторного використання у складі бібліотек, що настроюються. Наявні бібліотеки стосуються систем управління (Signal, Control & Observers), електромеханічних систем (електричні двигуни й приводи, електротехніка, електромеханіка), двигунів (компоненти IFP \*: IFP Drive, IFP Engine, IFP

Exhaust, IFP C3D), течії рідини й газів (гідравліка, гідравлічні компоненти, гідравлічний опір, наповнення, пневматика, пневмокомпоненти, газодинаміка), механіки (одновимірна механіка, двовимірна механіка, трансмісія, динаміка автомобіля), термодинаміки й теплопередачі (теплові моделі, термогідравліка, термогідравлічні компоненти, термопневматика, **двофазне протягом**, системи кондиціонування, системи охолодження, теплообмінники). Авторами була вибрана бібліотека механіки.

Для побудови ескізу приводу в AMESim використовувався сигнальний блок, який отримує параметри для керування механічним блоком від вхідних параметрів, а також блок механічних 3D-елементів для відображення зібраної в режимі ескізу моделі та її симуляції в режимі симуляції і отримання результатів.

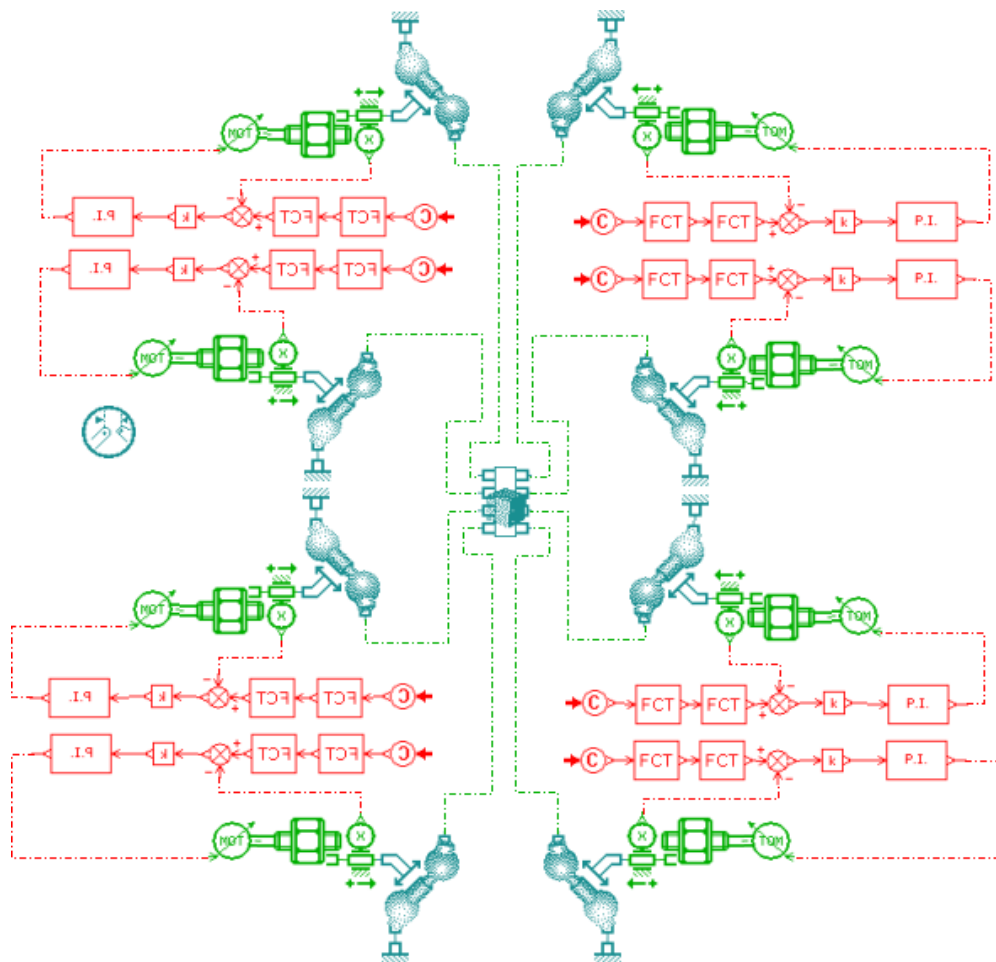
Усі елементи системи розташовані в бібліотеці Mechanical, що позначена зеленим кольором. Якщо використовується кілька бібліотек, то обрані елементи мають різний колір. Зафарбований фон свідчить про те, що в цього елемента ще не з'єднані всі доступні порти для підключення до інших елементів. Обрані елементи можна обертати за часовою стрілкою, дзеркально відображати та змінювати положення в просторі. Точки, у яких елементи з'єднуються, називаються портами. Якщо при з'єднанні елементи виділяються зеленим кольором, це означає, що ескіз не завершений. Наявність зелених квадратиків у портів, що з'єднуються, говорить про те, що ці порти мають однаковий тип. Тобто лінії передачі фізичних змінних між елементами ідентичні й сумісні і можуть бути з'єднані. У випадках, коли система, що моделюється, громіздка й немає можливості безпосередньо з'єднати два елементи, можна з'єднати їх за допомогою ліній, при цьому колір лінії, що з'єднує, буде відповідати кольору бібліотеки або розділу, до якого відноситься тип фізичної лінії.

З використанням тих самих бібліотек, що й для побудови ескізу приводу, була побудована вся конструкція станка-робота (рис. 3.18),



яка складається з восьми приводів (актуаторів), розташованих попарно із чотирьох сторін відносно платформи зі шпинделем і з'єднаних із нею.

Про передані змінні на відповідних портах елемента можна дізнатися, викликавши контекстне меню, далі натиснути меню External variables. Після побудови ескізу додаємо написи через меню Modeling → Insert → Text. Усі написи також можна обертати та відображати. Далі треба зберегти отриману модель.



*Рисунок 3.18 – Схема моделювання МПІС у вигляді октопода в програмному пакеті AMESim*

Створені ескізи інженерних систем дають можливість наступного етапу, а саме процесу симуляції, який проходить у послідовності:

- вибір математичного опису компонентів;
- установлення параметрів компонентів;
- запуск симуляції;
- аналіз результату.

При проходженні цих дій ескіз системи весь час відображається на екрані.

Після побудови ескізу станка-робота в режимі підмоделі призначається прив'язка командного блока з вихідними параметрами (рис. 3.16, а, б, в, г) до всіх восьми входів сигнальних блоків, керуючих кроковими електродвигунами приводів верстата-робота. Кожен елемент системи пов'язаний із математичною моделлю. Це набір математичних рівнянь і їхня реалізація як частина комп'ютерного коду. Для цього необхідно використовувати режим Submodel. Якщо елементи мають декілька підмоделей різної складності, вонизначаються вручну.

Далі в режимі параметрів задаються всі відомі дані для надання підмоделям та ескізу функціональної можливості до симуляції. AMESim проводить різні перевірки й створює виконуваний код системи. Вікно компіляції системи показує дані про рівняння, які він повинен вирішити, щоб виконати розрахунок. Набір рівнянь в AMESim визначає динамічну поведінку системи. Модель будується з рівнянь для кожного компонента в системі. Більшість підмоделей мають набір параметрів, що пов'язані з ними. При присвоєнні елементу підмоделі у ньому автоматично задаються значення параметрів. Для переходу на рівень розрахунку характеристик використовуємо Simulation mode в лівій частині вікна програми. Запуск розрахунку здійснюється натисканням кнопки Start simulation.

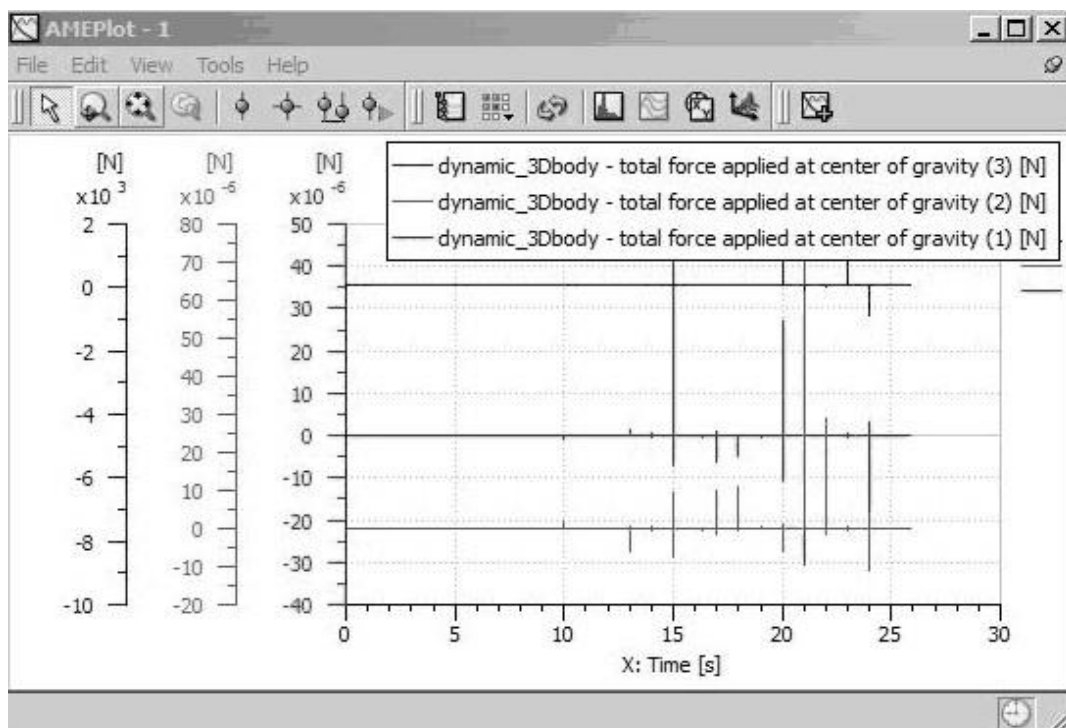
Результатом симуляції є отримані дані для ескізу платформи, до портів якої були під'єднані гілки ескізів приводів.

Для кожного з восьми портів ми маємо результати :

- абсолютну швидкість на порту;
- абсолютну позицію в порту;
- передача матриці (R0-Rs) в порт;
- абсолютне прискорення в порту;
- крутний момент в порту.

Після проведення аналізу абсолютної швидкості на портах були отримані результати, які вказують на їхню ідентичність. Тобто протягом часового проміжку симуляції абсолютна швидкість на кожному з восьми

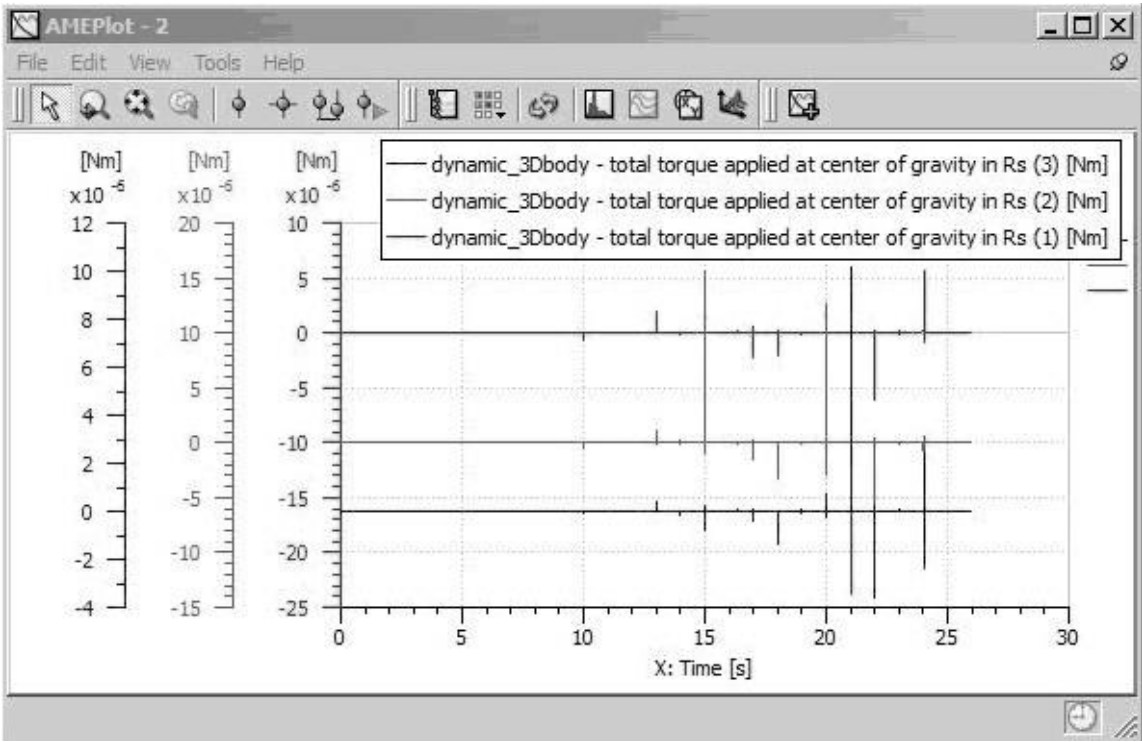
портів майже не відрізняється. Побудова графіку відбувається методом Drag-and-drop або Plot через меню. Далі треба вибрати досліджувані параметри. При необхідності можна будувати різні графіки, додавати сторінки та переміщати їх між сторінками у AMEPlot. Використання курсору часової координати надає інформацію про значення координат при зміні положення курсору. Подвійний курсор дозволяє розрахувати різницю між значеннями на графіку. При перетаскуванні змінної на робоче поле будується графік залежності цієї змінної від часу. На цю площину можна додати ще декілька елементів, тоді бачимо декілька перехідних характеристик на одній осі та з однаковим масштабом. Щоб розділити осі декількох кривих, розташованих на одному графіку, необхідно натиснути правою кнопкою миші на вертикальну вісь значень і вибрати пункт контекстного меню Separate, при цьому кожна з них має свою розмірність. Можна проаналізувати перехідні сигнали управління, зокрема позитивний та негативний. Аналогічно можна проаналізувати і інші характеристики, наприклад залежність одного параметра від іншого, а не від часу.



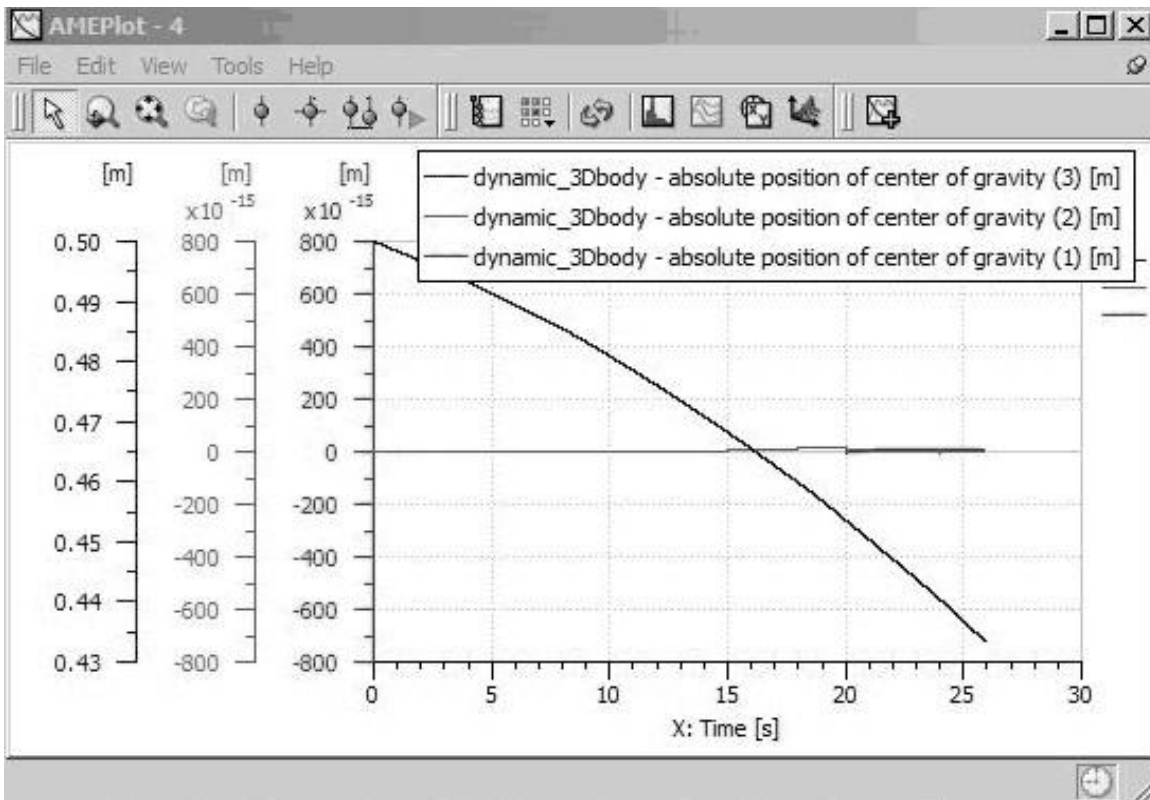
*a*

*a, б – абсолютне прискорення порту; в – абсолютна позиція на порту;  
г – абсолютна швидкість на портах*

**Рисунок 3.19** – Центр ваги

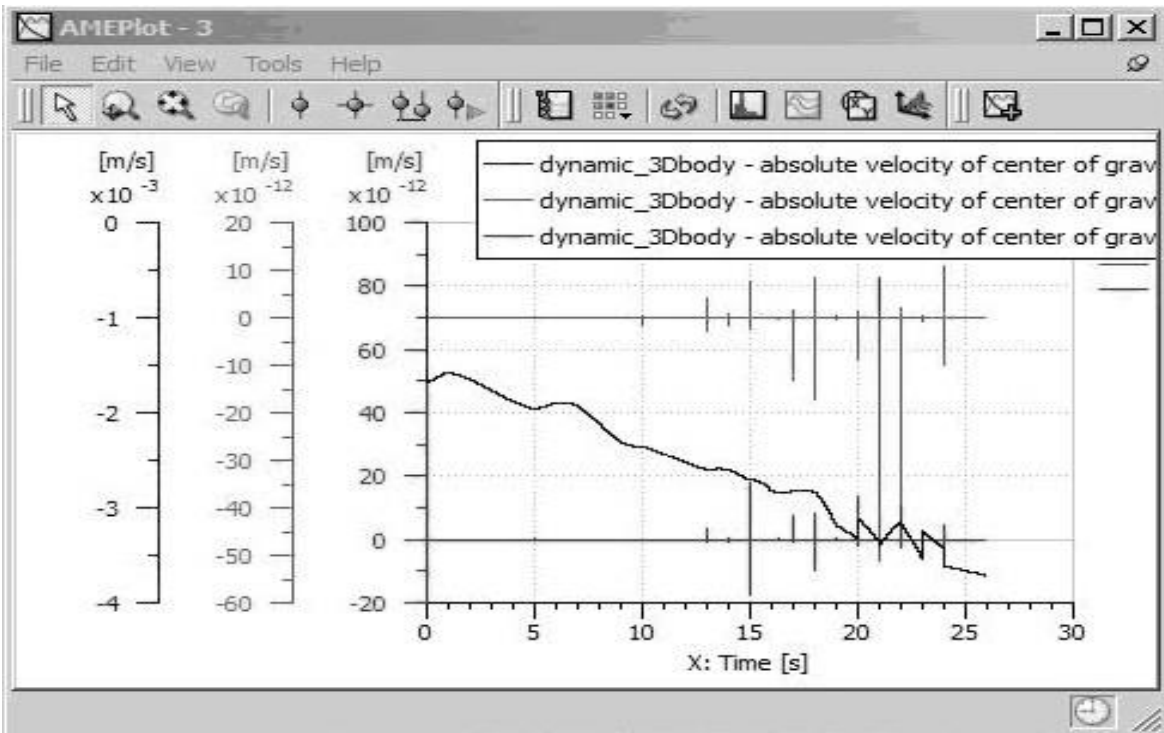


б



в

Рисунок 3.19, лист 2



2

Рисунок 3.19, лист 3

Перехідні функції позиції портів представлені на рис. 3.20.

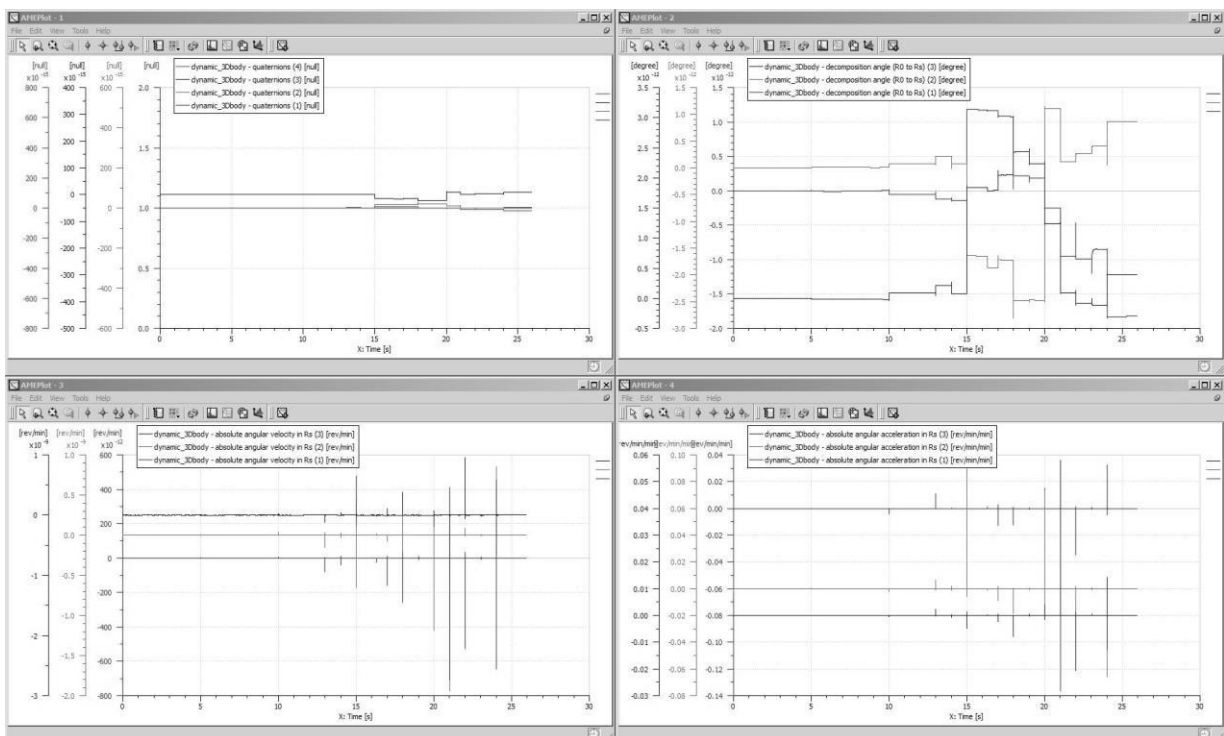


Рисунок 3.20 – Орієнтація платформи (кватерніони, кут розкладання (R0-Rs) абсолютної кутової швидкості на Rs, абсолютне кутове прискорення в Rs)

По факту всі вісім портів являють собою площину платформи, тому можна характеризувати зміну координати з плином часу на порту 1 як рух платформи. На графіку бачимо, що перехідна функція досить добре показує, що платформа завдяки використанню восьми опорних точок рухається плавно й не змінює свого положення відносно осі  $Z$ .

Щодо абсолютного прискорення, воно змінюється досить плавно, зважаючи на те, що командний блок працює одразу з вісьмома кроковими двигунами, які саме задають довжини кожного з восьми приводів.

Оскільки в симуляції було відпрацювання переміщення платформи донизу, то ми можемо спостерігати, що всі графіки практично ідентичні. Це дає можливість запевнити, що конструкція складена правильно і вона є працездатною.

Машинні випробування дають уявлення про динаміку центру ваги платформи й про те, що платформа завдяки використанню восьми опорних точок рухається плавно й не змінює свого положення відносно осі  $Z$ , так само як і на приводах. Тобто вся конструкція регулюється добре й взаємодія восьми приводів працює злагоджено.

При занесенні всіх даних і побудові ескізу отримана симуляційна модель станка-робота. Відпрацювання переміщень платформи налаштовується в командному блоці й за підсумками проведення симуляції можна мати уявлення про працездатність спроектованої до початку робіт в AMESim конструкції.

Таким чином, проектування та дослідження привода зводиться до визначення вимог, поставлених до приводу, вибору кращої конструкції та її дослідженню в програмних САЕ-пакетах для визначення динамічних характеристик приводу.

Оскільки саме привод забезпечує збереження всіх якостей станка-робота, то розробка приводного плеча, тобто приводу штанги, є обґрунтованою, бо саме штанга є основою конструкції станка-робота.

Дослідження можливостей пакету динамічного моделювання LMS Imagine.Lab AMESim SE дозволяє використовувати його за рахунок легкості створення конструкції і проведення динамічного аналізу, а також за рахунок скорочення часу від ідеї до отримання результатів.

### 3.5 Дослідження зміщення центру мас виконавчої ланки МПС

При прогнозуванні експлуатаційних характеристик мобільних верстатів-роботів на основі МПС динамічний аналіз виконавчої ланки верстатної системи являє собою важливу задачу, вирішення якої доцільно виконувати на основі залучення коштів імітаційного моделювання поведінки стрижневих просторових конструкцій.

Розрахункова схема, що дозволяє провести аналіз особливостей динаміки конструкції, може бути представлена просторовою системою маси  $m$ , підвішеною в просторі на гнучких елементах із показниками жорсткості  $c_x, c_y, c_z$  і демпфірування  $h_x, h_y, h_z$  (рис. 3.21 ).

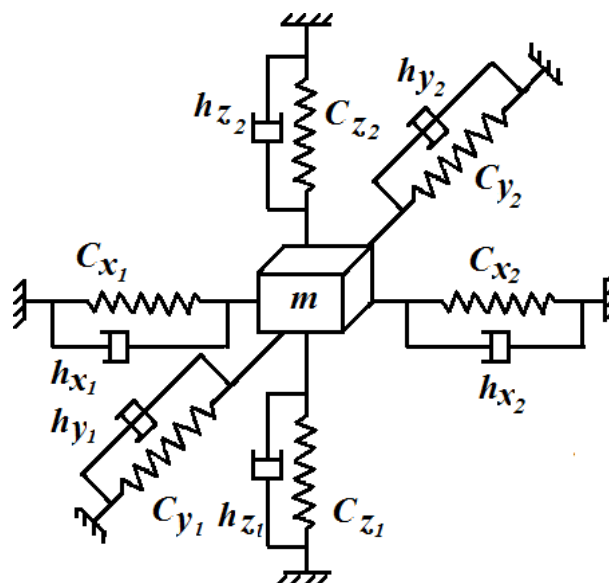


Рисунок 3.21 – Розрахункова схема для імітаційного моделювання

Для цієї системи, у межах малих амплітуд, буде справедливим твердження про те, що частота власних коливань  $f_0$  маси  $m$  може бути розрахована за формулами:

$$f_{ox} = \sqrt{\frac{c_{1x} + c_{2x}}{m}}; \quad f_{oy} = \sqrt{\frac{c_{1y} + c_{2y}}{m}}; \quad f_{oz} = \sqrt{\frac{c_{1z} + c_{2z}}{m}}, \quad (3.81)$$

де  $f_0$  – частота власних коливань, Гц;  $m$  – маса, кг;  $c_{1x}, c_{2x}, c_{1y}, c_{2y}, c_{1z}, c_{2z}$  – жорсткість, Н/м.

Оскільки резонансна частота однакова для будь-якого напрямку осей, а маса матеріальної точки залишається однією і тією ж для будь-якого вимірювання простору, то можна прийняти **рівність**:

$$f_{ox} = \sqrt{\frac{c_{1x} + c_{2x}}{m}}; \quad f_{oy} = \sqrt{\frac{c_{1y} + c_{2y}}{m}}; \quad f_{oz} = \sqrt{\frac{c_{1z} + c_{2z}}{m}},$$

$$c_{1x} + c_{2x} = c_{1y} + c_{2y} = c_{1z} + c_{2z} \quad (3.82)$$

Виходячи із цього виразу, можна обмежитися дослідженням особливостей динаміки системи, що складається з тіла масою  $m$ , підвішеного на двох пружинах із жорсткістю  $c_1$  і  $c_2$  так, як показано на рис. 3.22.

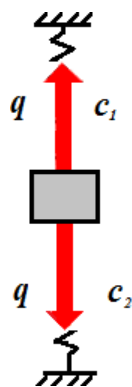


Рисунок 3.22 – Схема для динамічного аналізу виконавчої ланки верстата з МПС



Для цієї схеми одержано математичний опис гармонічного осцилятора, яким є виконавча ланка мобільного верстата, якщо взяти до уваги вплив, що обурює, що підкоряється залежності

$$x + \frac{1}{\tau} \dot{x} + \omega^2 x = \alpha \cos \omega t \quad (3.83)$$

Сила, що обурює, представлена у вигляді виразу

$$\alpha e^{i\omega t} \equiv \alpha (\cos \omega t + i \sin \omega t) \quad (3.84)$$

Можна прийняти за рішення речову частину  $X$ , якщо  $\alpha_0$  у виразі  $\alpha_0 \cos \omega t$  – це дійсна величина, то рішення знайдено:

$$x = X_0 e^{i\omega t} \quad (3.85)$$

Тоді

$$\left( -\omega^2 + \frac{i\omega}{\tau} + \omega^2 \right) X_0 e^{i\omega t} = \alpha_0 e^{i\omega t} \quad (3.86)$$

Звідси

$$X_0 = \frac{\omega^2 - \omega^2 + i(\omega/\tau)}{\omega^2 - \omega^2 - i(\omega/\tau)} \alpha_0 = \alpha_0 \frac{\omega^2 - \omega^2 - i(\omega/\tau)}{\omega^2 - \omega^2 + (\omega/\tau)^2} \quad (3.87)$$

А дійсна й уявна частини знаходяться, як:

$$Re(X_0) = \frac{(\omega^2 - \omega^2) \alpha_0}{(\omega^2 - \omega^2)^2 + (\omega/\tau)^2}, \quad (3.88)$$

$$Im(X_0) = \frac{-(\omega/\tau) \alpha_0}{(\omega^2 - \omega^2)^2 + (\omega/\tau)^2} \quad (3.89)$$

При великих значеннях  $\tau$  затухання послаблюється й збільшується уявна частина зсуву при резонансі.

Для амплітуди зміщення можна записати:

$$\rho = \begin{pmatrix} X & X^* \\ 0 & 0 \end{pmatrix}^{1/2} = \frac{\alpha_0}{\sqrt{(\omega^2 - \omega^2)^2 + (\omega/\tau)^2}}^{1/2} \quad (3.90)$$

Тоді, сила, що діє у виконавчій ланці, може бути визначена за формулою

$$P = -\frac{1}{2} M \alpha_0 \omega I_m(x_0) = -\frac{1}{2} M \alpha_0 \frac{\omega^2/\tau}{(\omega^2 - \omega^2)^2 + (\omega/\tau)^2} \quad (3.91)$$

Отриманий вираз повністю узгоджується з висновками, представленими в роботах [233, 6, 34, 46, 61, 93].

Для дослідження особливостей динаміки навантаженої виконавчої ланки мобільного верстата була створена імітаційна модель у комп'ютерному середовищі Simulink (рис. 3.23).

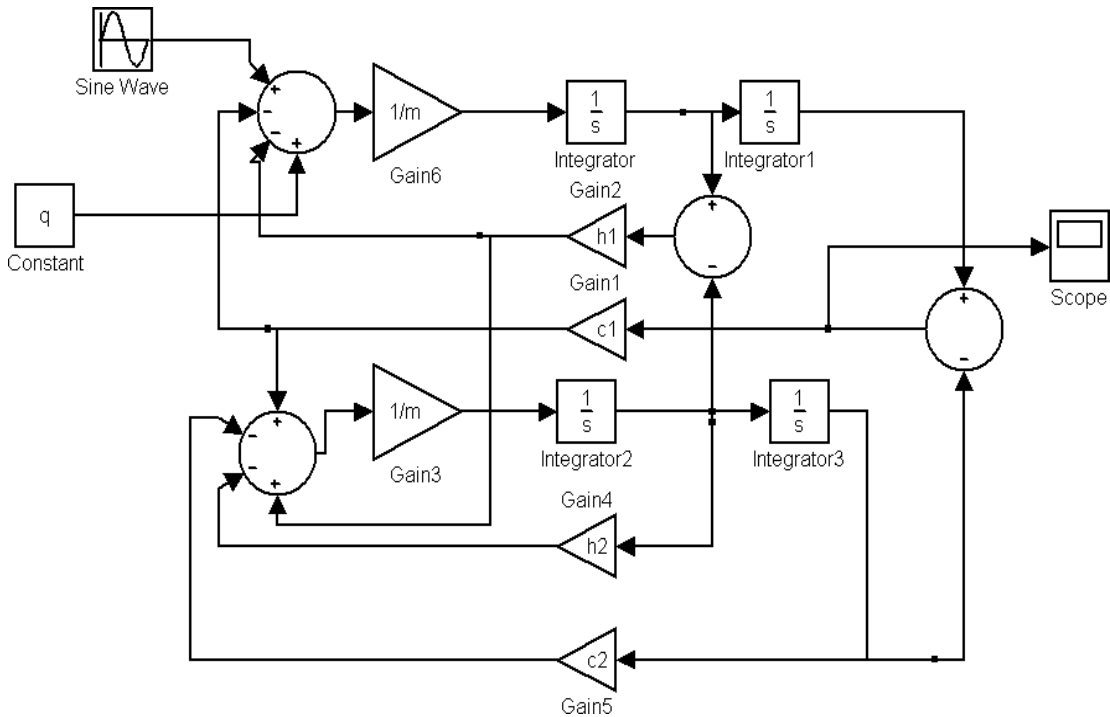
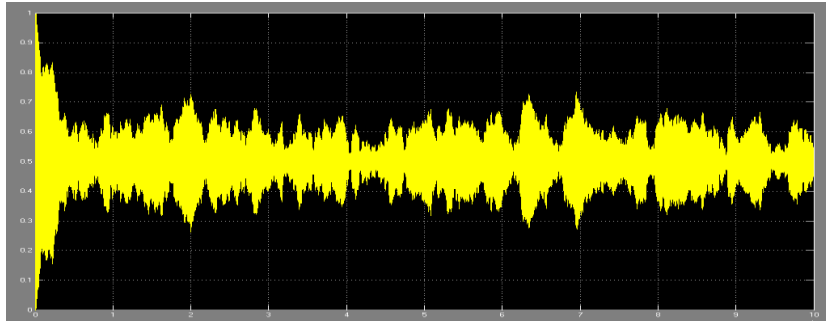


Рисунок 3.23 – Імітаційна модель виконавчої ланки мобільного верстата в Simulink

При заданих значеннях  $m = 20$ ,  $c_1 = 20$ ,  $h_1 = 0,02$ ,  $c_2 = 30$ ,  $h_2 = 0,03$ ,  $q = 10$ , амплітуді вимушених гармонічних коливань  $0,2$  мкм отримана реакція моделі на вимушені гармонійні коливання у вигляді, представленою на рис. 3.24.



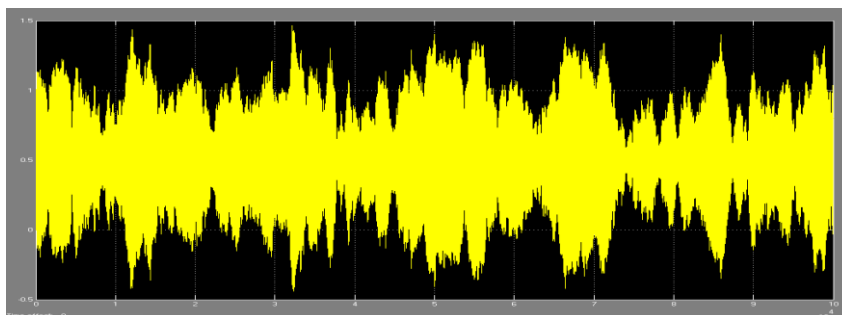
*Рисунок 3.24 – Тимчасова діаграма коливань виконавчої ланки мобільного верстата при вимушених гармонійних коливаннях*

Значення амплітуд у такій моделі не перевищує  $2$  мкм, однак заслуговує на увагу квазівипадковий характер коливань, **хоча рівноваги вплив має синусоїдальну форму.**

Для випробувань випадковим впливом із характеристиками:

$$\text{Mean} = 0; \text{Variance} = 1; \text{Seed} = 0; \text{Sample time} = 0, 1$$

характер коливань виконавчої ланки аналогічний наведеному вище, і за амплітудою вони також не перевищують  $2$  мкм (рис. 3.25).



*Рисунок 3.25 – Діаграма коливань виконавчої ланки мобільного верстата при вимушених випадкових впливах*

Отриманий результат дозволяє припустити, що у виконавчій ланці мобільного верстата виникають коливання з широким частотним і амплітудним спектром, здатні викликати резонанс елементів технологічної системи в широкому діапазоні частот. Такий режим роботи мобільних верстатів із МПС повинен ураховуватися при проєктуванні технологічних процесів і при технологічній підготовці виробництва з метою забезпечення продуктивності й точності обладнання протягом усього терміну його експлуатації.

Отримані результати показали, що у виконавчій ланці мобільного верстата виникають коливання з широким частотним і амплітудним спектром, здатні викликати резонанс елементів технологічної системи в широкому діапазоні частот. Такий режим роботи мобільних верстатів із МПС повинен ураховуватися при проєктуванні технологічних процесів і при технологічній підготовці виробництва з метою забезпечення продуктивності й точності устаткування протягом усього терміну його експлуатації.

Спираючись на дані машинного експерименту, проведено натурний експеримент для визначення зсуву центру мас, для чого була розроблена методика й був створений експериментальний стенд (табл. 3.7, рис. 3.26, 3.27).

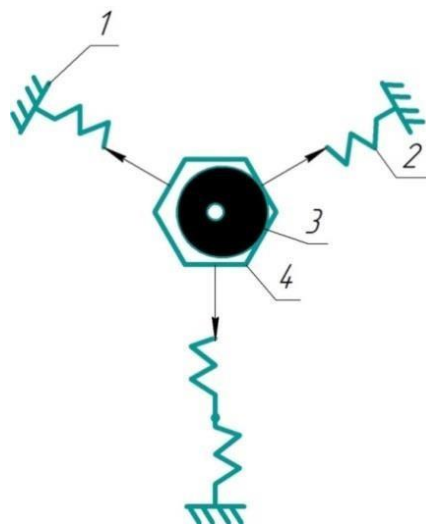


Рисунок 3.26 – Схема експериментальної установки для визначення зсуву центру мас МПС

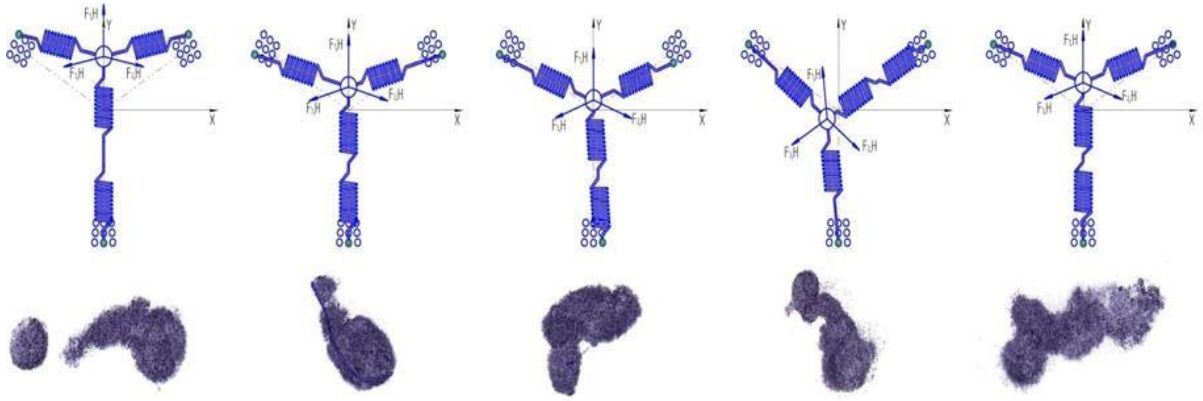


Рисунок 3.27 – Сліди зміщення центру мас МПС

Таблиця 3.7 – Дані експерименту з визначення ефекту зсуву мас МПС

F <sub>1</sub> , кН	F <sub>2</sub> , кН	F <sub>3</sub> , кН	α°	β°	γ°	Зміщення центру мас		
						x, мм	y, мм	n, об./хв
1,7	0,3	0,3	157°10	101°25'	101°25'	2,50	1,3	50...2000
			149°43	105°08'	105°08'	-1,15	2,2	50...2000
			139°06	105°26'	115°28'	0,49	2,72	50...2000
			113°22	113°22'	133°17'	-0,48	2,63	50...2000
			143°04	108°28'	108°28'	3,25	2,3	50...2000

Отримані результати практично показали, що в проєктованому виконавчому ланцюзі МПС виникає зсув центру мас, здатний викликати резонанс елементів технологічної системи в широкому діапазоні частот. Такий режим роботи МПС повинен враховуватися при проєктуванні з метою забезпечення точності МПС і її продуктивності при експлуатації.

## РОЗДІЛ 4 ДІАГНОСТИКА Й УПРАВЛІННЯ В МПС

### 4.1 Передумови інформаційного забезпечення мехатронних систем

Актуальність робіт із розробки наукових основ щодо ефективного використання верстатів на базі МПС підтверджується численними зверненнями до джерел дослідників у цьому напрямку створення нової високо-ефективної техніки. При цьому якість інформації отримує додаткову вагу в тому разі, якщо ця інформація містить критичний аналіз.

Структурована інформація відповідно до загальних вимог її подання та з урахуванням конкретних зразків в області створення мобільних інтелектуальних технологічних машин стає джерелом подальшого розвитку мехатронних систем, оскільки вони є синергетичним поєднанням механічної підсистеми та підсистем силової та інформаційної електроніки. Отже, при проєктуванні мехатронної системи слід використовувати принципи системотехніки, при одночасних модельних ідентифікаціях фізичних явищ у кожній із підсистем. Моделювання мехатронної системи вимагає удосконалення математичного апарату та інструментальних засобів, що здатні забезпечити вирішення завдань на різних ієрархічних рівнях – від програм автоматизованого проєктування, інжинірингу та універсальних математичних процесорів до створення необхідного керуючого пристрою, який забезпечує складний координований рух МПС [17, 42, 67, 82, 131, 145, 198, 232].

Розробка та вдосконалення верстатів із МПС в останній час призводить до того, що функції нових верстатів стають більш універсальними. Це дозволяє розглядати верстат як обробляючу, так і контрольну вимірювальну машину, тому що кількість ступенів свободи перевищує відомі шість і дозволяє при наявності виконавчої ланки велику кількість рухів при обробці, складанні й контролі. При таких можливостях забезпечення гнучкості

обладнання слід розглядати гнучкість виробничих ділянок не тільки як технологічну, але і як структурну гнучкість. Верстати з ЧПУ на ділянці, комплекси верстатів із ЧПУ і гнучкі виробничі системи мають можливість перейти в нову стадію, коли організація робочого місця верстатника відбувається не навколо верстата шляхом нарощування вартості автоматизації і шляхом нарощування робочого місця засобами автоматизації допоміжних операцій, засобами технологічного забезпечення систем складування, доставки, стружко-прибирання, загального підвищення рівня автоматизації, але й оснащення робочого місця необхідними верстатами-роботами з мобільною організацією робочого середовища за допомогою рухливих накопичувачів – магазинів і забезпечення випуску продукції за принципом «виробництво з коліс», або «у той самий час».

Управління технологічним інструментом для обробки заготовки за заданою програмою здійснюється шляхом зміни довжини актуаторів, які являють собою сторони змінної довжини замкнутих контурів із шарнірним з'єднанням актуаторів у вершинах. При використанні діагностичної інформації про розміри оброблюваних поверхонь формується поточний образ оброблюваної заготовки за допомогою ідентифікаційної моделі об'єкту (рис. 4.1).

Перевагою створення такої моделі є можливість мати математичні описи функцій, які моделюють реальний об'єкт за малою кількістю діагностичних вимірів. При цьому в схемі управління передбачено отримання діагностичних даних на основі акустичних сигналів у вигляді спектрів із перетворенням характеристичних частот. Формування поточного геометричного стану мобільного інтелектуального верстата проводиться на основі діагностики стану інструментальної платформи. Відпрацювання керуючих команд проводиться мікропроцесорною системою управління актуаторами.

Одним з основних напрямків в управлінні верстатами з МПС є питання точності позиціонування, забезпечення оптимального переміщення інструмента в умовах великих швидкостей виконавчих механізмів по заданій траєкторії [59, 130, 199, 152, 161, 163, 200, 207, 208, 254, 269, 270, 271 і т. ін.].

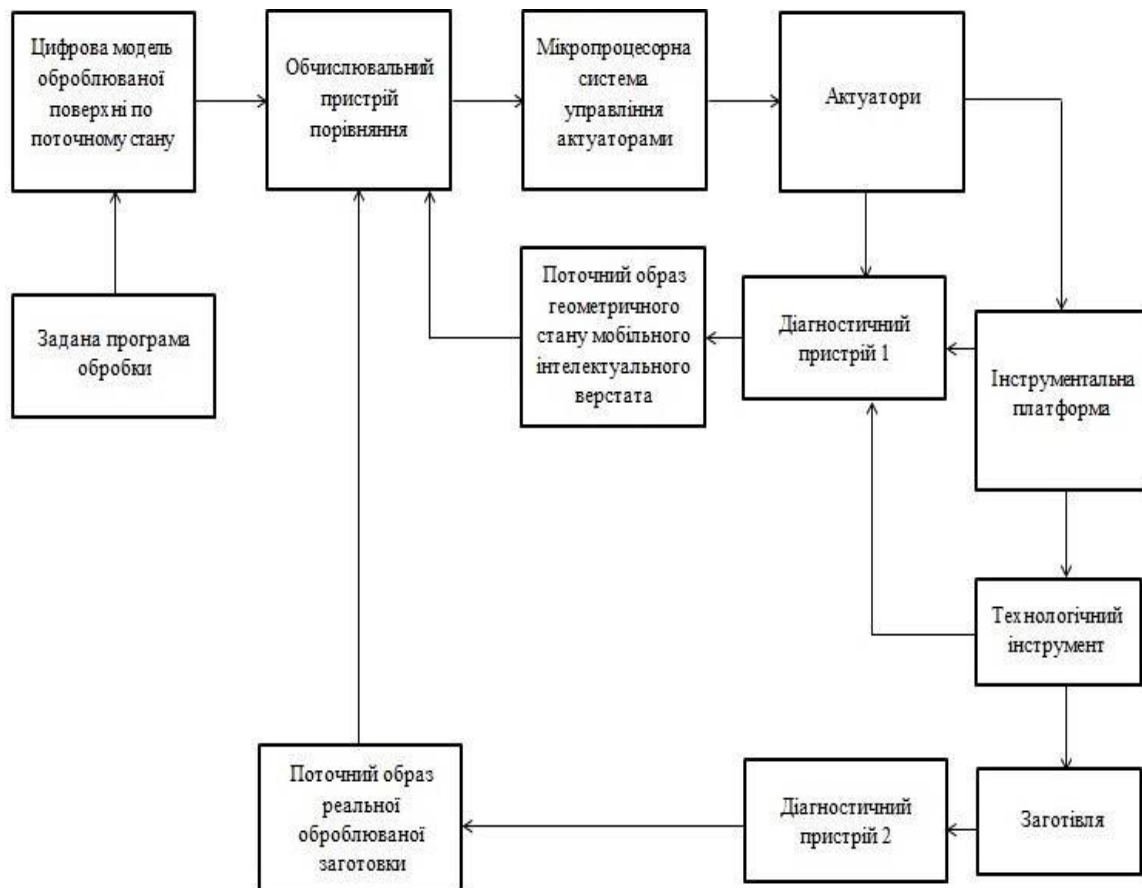


Рисунок 4.1 – Структурна схема управління мобільним верстатом із МПС

У роботах [263, 264] стверджується, що для точного позиціонування робочих органів виконавчих механізмів при оптимальних швидкостях і прискореннях їхніх рухів по заданій траєкторії необхідно враховувати ефективність процесів за критеріями витрат енергії. Показано, що в заданому діапазоні швидкостей робочого органа при реалізації такого управління можна не враховувати маси та інерційні параметри елементів такого обладнання. Однак основні переваги обладнання з МПС найбільш яскраво проявляються в умовах великих швидкостей переміщення виконавчих механізмів при заданій точності траєкторії переміщення інструменту і його позиціонування. Тому є необхідність створення ідентифікаційних моделей для швидко рухомих механізмів.

Авторами розглянуто питання, пов'язані з діагностикою технологічного обладнання [28, 172], і здійснено висновок, що основним завданням



діагностики є розпізнавання стану об'єкта в умовах обмеженої інформації [59]. Алгоритм розпізнавання частково ґрунтується на діагностичних моделях, які встановлюють взаємозв'язок між станами об'єктів і їхніми відображеннями в просторі діагностичних ознак [165].

Запропоновано використовувати акустичний контроль для таких алгоритмів, ґрунтуючись на амплітудо-частотних характеристиках власних коливань об'єктів [192, 195].

Раніше, у роботах [117, 165], було висловлено й частково підтверджено припущення про те, що у якості інформативного джерела діагностичного сигналу слід використовувати його амплітудно-частотну характеристику власних коливань об'єкта в акустичному діапазоні.

Серед методів акустичного контролю виділяють: активні – використовують випромінювання й прийом акустичних сигналів, і пасивні – засновані тільки на прийомі акустичних сигналів [219].

Акустичні методи контролю засновані на взаємодії з контрольованим виробом пружних коливань і хвиль широкого діапазону частот [237, 285]. Для неруйнівного контролю багатошарових конструкцій ці методи використовуються найбільш широко. Основними з них є низькочастотні методи, ультразвуковий метод проходження і, у меншій мірі, ревербераційний і акустико-топографічний, хоча можливості їхні розкриті далеко не повністю. Очевидно, основна проблема полягає в методології і застосуванні математичного апарату для обробки даних акустичних сигналів.

Для здійснення контролю стану конструкцій, у тому числі – у важкодоступних і недоступних місцях, та ідентифікації тріщиноутворення в металевих конструкціях реєструють сигнали акустичної емісії і струми витокку, а потім накопичують ці сигнали в неперервному режимі та попереджають про наближення їхніх значень до критичних рівнів [153].

Відомі приклади використання при механічній обробці для діагностування та прогнозування стану процесу різання акустичних сигналів, що виникають у зоні обробки. На основі аналізу даних акустичної емісії

попереджається настання аварійних ситуацій. Для розпізнавання стану процесу механічної обробки застосовують матричний метод, який дозволяє визначити працездатність об'єктів при зміні одного з параметрів у часі або якщо необхідне паралельне знімання інформації за декількома параметрами в строго фіксований момент часу [253, 154]. У верстатах із числовим програмним управлінням із метою підвищення точності механічної обробки застосовують нейромережеве прогнозування, що дає можливість автоматичної зміни траєкторії подачі різального інструменту в процесі обробки і її корекції впродовж зміни [139].

Таким чином, метою розділу є представлення системи ідентифікації і управління мобільним верстатом-роботом на основі спектрального аналізу функцій, що супроводжується отриманням математичних ідентифікаційних моделей, які дозволяють за заздалегідь та поточно вимірюваними параметрами точності приймати наступні рішення з подальшою обробкою інформації на глибоких нейроподібних мережах каскадної архітектури, що є вперше розробленими.

Механізми переміщення МПС відрізняються сукупністю та багатозв'язаністю діючих факторів. У залежності від геометрії впливу силових факторів для забезпечення постійного якісного керування, показників точності відпрацювання виконавчої ланки МПС необхідно прогнозувати стан технологічної системи в безперервно змінних умовах, тим самим підвищувати якісні показники точності (рис. 4.2).

Висунута гіпотеза про взаємозв'язок характеристик робочих поверхонь і спектрів власних коливань деталей дозволила сформулювати основні принципи створення методики акустичної діагностики одночасно комплексу характеристик виробу.

На підставі збуджених власних коливань об'єкта за допомогою застосування спектрів поглинання акустичних сигналів нормованого «білого шуму» просторовими механізмами з деталями МПС установлена можливість ідентифікування їхньої конфігурації в статиці й динаміці, а також діагностування координат траєкторій і позицій виконавчих органів і динамічних характеристик рухомих елементів МПС.

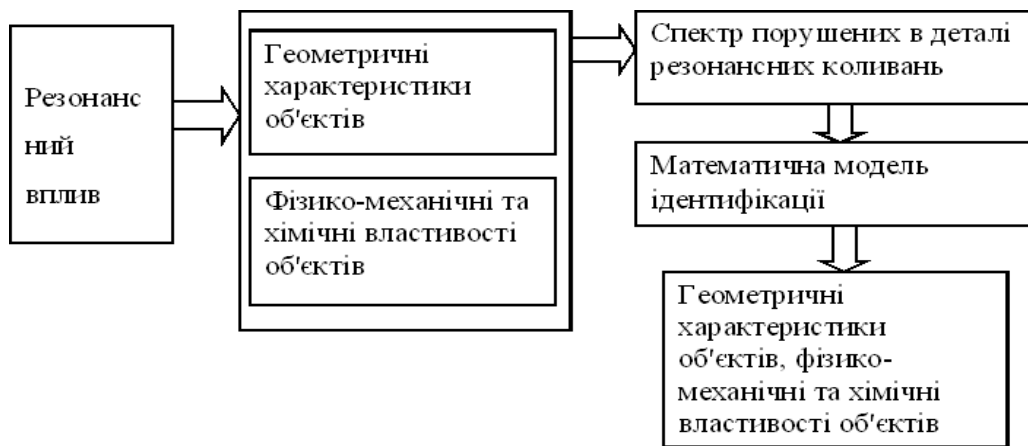


Рисунок 4.2 – Концепція метода акустичної діагностики поверхні деталі

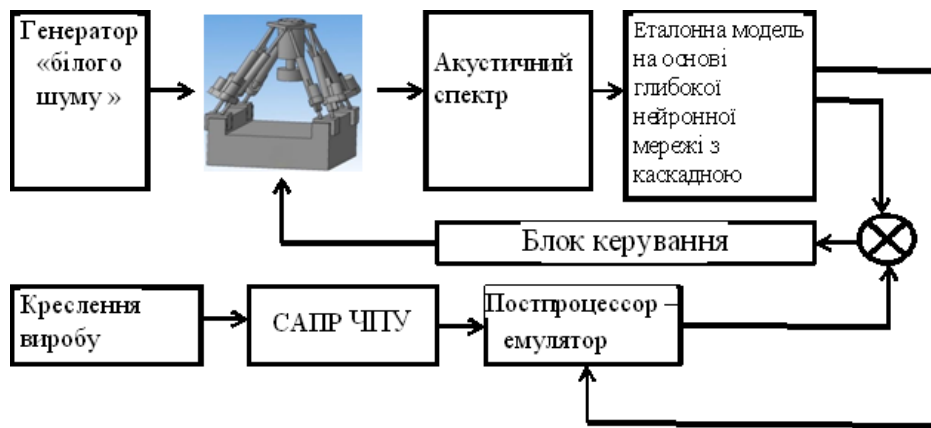
Реалізація запропонованого й розробленого методу ідентифікації виконана на натурній моделі шляхом порушення конструкції малопотужним акустичним сигналом із рівноімовірнісним розподілом сигналів однакової амплітуди в діапазоні 20...20 000 Гц. Акустичний спектр відгуку, що являє собою суму збуджених, поглинених і відображених акустичних хвиль, піддається обробці на глибоких нейроподібних мережах. Результатом такої обробки є ідентифікаційна модель, що інтегрує особливості багат шарових перцептронів і карт Кохонена. Показано, що таке об'єднання можливе за допомогою нейроподібних мереж каскадної конфігурації і модифікованим нейроподібним елементом.

На рис. 4.3 представлена структура системи управління верстатом-роботом із використанням запропонованого підходу.

Оскільки акустичний спектр поглиненого «білого шуму» змінюється при зміні конфігурації об'єкта, актуалізація нейромережної моделі (математичної моделі, у якій рівняння модифікованих активаційних функцій мають складну структуру зв'язків) дозволяє встановлювати залежності

$$F(A,t) \equiv x(t), y(t), z(t), \quad (4.1)$$

де  $F(A, t)$  – акустичний спектр,  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$  – координати актуальної точки об'єкта.



*Рисунок 4.3 – Структура системи управління на глибоких нейроподібних мережах із каскадною реалізацією*

Ці дані можуть бути використані для управління позиціонуванням об'єкта. Однак для реального об'єкта облік складних траєкторій зі змінними координатами й похідними першого й другого порядку від траєкторії переміщення дозволяють визначати й прогнозувати стан об'єкта в будь-який момент часу. Тим самим створюються умови для управління станом робочого органа мобільного верстата-робота з **урахуванням поточних умов** роботи верстата-робота (добре й слабо формалізованих) **змінних факторах**. На відміну від ідеальної розрахункової схеми, яка дає тільки загальну інформацію, реальна система верстата має похибку, яку не можна порівняти з реальною.

У верстатах із МПС управління переміщеннями ускладнюється необхідністю узгодження довжин рухомих плечей МПС для забезпечення прямолінійного руху, а функцією оптимальності є мінімізація переміщень із т. А в т. В. Тому еталонна модель повинна враховувати характеристики об'єкта, що постійно змінюються, а також використовуватися в процесі функціонування верстата (рис. 4.4).

На підставі вихідних програмних даних про координати  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , які перетворюються в переміщення робочого інструмента, можна отримати відомості про стан керованих ланок МПС, а з огляду на конфігурацію рухомих плечей МПС, отриману за допомогою обробки акустичного спектру, скорегувати точне положення робочого органа верстата.



Рисунок 4.4 – Взаємозв’язок вхідних і вихідних параметрів моделі, де  $T_1, T_2 \dots T_n$  – керовані ланки МПС

Точність моделювання на кожному наступному кроці збільшується за рахунок ускладнення моделі. Глибокі нейроподібні мережі ґрунтуються на тому принципі, що кожний наступний шар нейроподібних елементів підлаштовується під новий рівень абстрактності даних, де додавання нового шару в моделі покращує (зменшує) варіаційну межу правдоподібності моделі.

На цьому етапі виявляються значущі й незначущі фактори, що встановлюють взаємозв’язки вхідних і вихідних параметрів. Для цього виконується побудова кортежів, які ідентифікуються за ступенями АЧХ. Причому, чим складніше вплив на об’єкт, тим більше індивідуальних властивостей об’єкта проявляється у функції відгуку [258]. Тому застосування збуджуючого впливу «білого шуму» у якості проявника виправдане, для визначення власних властивостей об’єкта і запропоновано методику акустичної діагностики для механізмів верстатів-роботів, а також подальшу обробку даних за допомогою глибоких нейроподібних мереж.

## 4.2 Каскадна ідентифікаційна модель керованого об’єкта

У моделюванні виробничих, технологічних, економічних і організаційних систем, необхідність якого визначається постановкою оптимізаційних задач, важко припустити ситуацію, при якій усі значущі фактори будуть ураховані дослідником [9, 32, 175, 268, 97]. Завжди знайдеться група чинників, впливом яких дослідники знехтували з певним ступенем ризику.

Уже згадана проблема має місце практично в будь-якій постановці завдання. Тому нейромережне моделювання виступає як досить надійний інструмент моделювання системних об'єктів. Таке моделювання може виконуватися для вирішення наступних завдань [49, 48, 99]:

1. Дослідження й діагностики об'єктів
2. Дослідження й прогнозування часових рядів
3. Дослідження й оптимізації параметрів виробничих і, зокрема, технологічних процесів
4. Дослідження й оптимізації управління виробничими і, зокрема, технологічними процесами
5. Управління технічними, організаційними та економічними системами
6. Дослідження й прогнозування надійності виробничих систем
7. Дослідження й оптимізації організаційних структур
8. Дослідження й оптимізації економічної діяльності підприємств і організацій
9. Дослідження й оптимізації наукової діяльності організацій
10. Дослідження освітніх процесів та їхньої оптимізації
11. Створення інтегрованих систем проектування

Для вирішення цих завдань можна застосовувати як традиційні методи моделювання, так і методи, засновані на застосуванні систем Data Mining [96, 176]. При цьому, очевидно, нейромережне моделювання слід віднести до одного з методів, що застосовуються в згаданій системі.

Використання методу ідентифікаційного моделювання дозволяє науково обґрунтувати експериментальні дослідження, на основі чого можна дати об'єктивну оцінку результатам експерименту. Моделювання на базі нейроподібних елементів використовується для вирішення слабо формалізованих задач із неповною інформацією при великій кількості вхідних факторів. Такими є масиви вхідних даних спектрів, що складають АЧХ власних коливань МПС.

Нейроподібна мережа – система, що складається з великої кількості простих обчислювальних елементів із сигмоїдальними функціями, що пов'язана за принципом коннекціонізму [59, 195, 197, 219, 195]. Результат роботи кожного елемента залежить від його внутрішнього стану. Усі елементи працюють незалежно один від одного, тобто поза межами дозволеного діапазону з іншими елементами.

Використання нейроподібних мереж забезпечує наступні переваги [59, 195, 197, 219, 195]:

- нейроподібні мережі дозволяють отримати нелінійну залежність вихідного сигналу від вхідного;

- нейроподібні мережі мають здатність адаптувати свої синаптичні ваги до змін навколишнього середовища. Більш того, для роботи в нестационарному середовищі (де статистика змінюється із часом) можуть бути створені нейроподібні мережі, змінюють синаптичні ваги в реальному часі;

- нейроподібні мережі, реалізовані на основі електронних компонентів, потенційно стійкі до відмов, тому що контекстна інформація розподілена по всіх зв'язках нейроподібної мережі, і вихід із ладу одного або декількох вузлів не призводить до відмови системи в цілому;

- нейроподібні мережі дозволяють вирішувати складні обчислювальні задачі за допомогою однакових простих обчислювальних сигмоїдальних елементів – нейронів. Ця спільність дозволяє застосовувати одні й ті ж самі алгоритми навчання для вирішення різних прикладних задач.

Навчена нейроподібна мережа набуває здатності будувати асоціативні зв'язки між вхідними й вихідними факторами технічної системи і являє собою ідентифікаційну модель [42, 192, 195, 117].

Як показує досвід проведення досліджень у сфері нейромережного моделювання, найбільші проблеми виникають на етапах подання даних навчальних вибірок, але в роботі запропоновано метод вирівнювання помилок навчання й тестування шляхом формування із загального масиву даних випадковим чином навчальних і тестових вибірок із подальшою оцінкою помилки апроксимації до тих пір, поки значення помилок не зрівняються.

Для створення ідентифікаційних моделей систем, що змінюють свій стан у часі, був використаний модифікований авторами метод моделювання часових рядів на основі виявлення їхньої внутрішньої структури методом вікон із зсувом на  $N$  елементів. Для цього спостерігається залежність кількості нейронів  $K$  мережі, що моделює тимчасовий ряд від ширини вікна  $N$  – різка зміна кількості нейронів при збереженні величини помилки апроксимації свідчить про якісну зміну складу даних часового ряду по ширині вікна. Висунуто припущення про взаємозв'язок таких якісних «стрибків» кількості нейронів моделі й фрактальної природи тимчасового ряду. У цьому випадку є можливість визначити період прогнозу часового ряду із заданим рівнем помилки прогнозу [192, 195].

При вирішенні перелічених вище завдань у багатьох випадках залишається проблематичною побудова нейроподібної мережі в умовах надходження потоку даних, у тому числі в реальному масштабі часу. Для створення таких нейромережевих моделей запропонований метод побудови нейроподібної мережі на основі апроксимації функції поточної помилки даних. У багатьох випадках такий підхід дозволяє використовувати не тільки нейроподібні елементи з традиційно нелінійною функцією, яка має області насичення й зони нелінійності, а й звичайні регресивні моделі. До числа таких моделей можна віднести традиційні статичні ряди й т. п. Результати побудови таких обчислювальних мереж на основі звичайних рівнянь регресії показали, що така апроксимація допустима в обмеженій області даних, коли порядок функції помилки зростає повільніше, ніж скорочується значення обраного критерію помилки. Так, наприклад, апроксимація даних, що описуються рівнянням другого порядку функціями першого порядку, збільшує порядок функції помилки. Подальша апроксимація функції помилки таким же рівнянням першого порядку веде до подальшого зростання порядку нової функції помилки. Але нейроподібні елементи позбавлені такого недоліку, оскільки їхні можливості апроксимації елементів заданої множини навчальної вибірки такі, що кожна



наступна функція помилки «вирівнює» криву помилки, приводячи її до функції помилки нульового порядку [192, 195].

Найбільш результативними в таких дослідженнях показали себе нові нейроподібні елементи, сформовані на основі відомих нейроелементів із сигмоїдною функцією активації. Уведення додаткового коефіцієнта перед експонентою, що має можливість змінювати значення від негативних до позитивних величин, формує новий елемент, який працює з використанням властивостей функцій, що мають точку розриву. Усього один такий елемент дозволяє вирішувати класичну задачу «виключає» або «». Для дискретних моделей такий підхід дозволяє істотно скоротити обсяг обчислювальних процедур.

Вирішення задач діагностики й управління на основі нейроподібних мереж запропонованого типу дозволяє виявити нові можливості таких мереж. Очевидно, що апаратна реалізація таких адаптивних моделей також досить проста й не вимагає складних алгоритмів настроювання безлічі коефіцієнтів – на кожному кроці одночасно налаштовуються лише  $N + 4$  коефіцієнти, де  $N$  – це кількість входів моделі.

У ряді своїх робіт А. Г. Івахненко і Г. А. Івахненко відзначають актуальність створення ідентифікаційних моделей на основі нейроподібних елементів [175, 176].

Запропоновано новий базовий елемент, який відрізняється тим, що при експоненті встановлюється коефіцієнт, який при негативних значеннях перетворює розглянутий нейроподібний елемент у комплексний. Нейроподібні елементи можна подати у вигляді комплексного числа, що дозволяє розширити їхні можливості за функцією

$$y(x) = \left( \frac{a_0}{1 + a_1 \cdot e^{a_2(x) + a_3}} \right) + a_4. \quad (4.2)$$

При коефіцієнтах  $a_0 = 1$  ;  $a_1 = 1$  ;  $a_2 = -1$  ;  $a_3 = 0$  ;  $a_4 = 0$  отримується класична передавальна функція – сигмоїда (рис. 4.5).

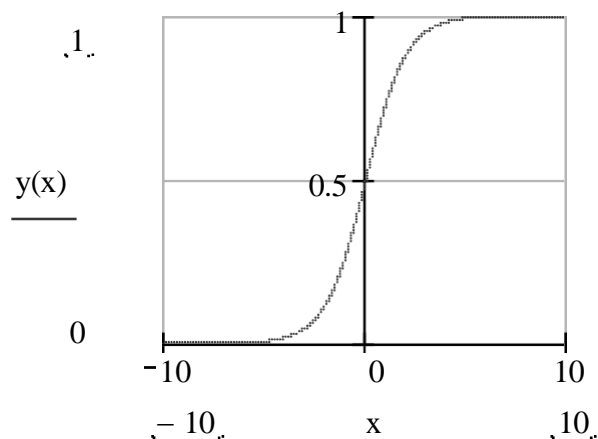


Рисунок 4.5 – Класична передавальна функція нейрона – сигмоїда

При значеннях коефіцієнта поведінка передавальної функції змінюється й відповідає двом нейроподібним елементам. Такий базовий елемент представлений таким чином (рис. 4.6):

$$a_0 = 1; \quad a_1 = -0,1; \quad a_2 = -0,1; \quad a_3 = 2,3; \quad a_4 = -0,1.$$

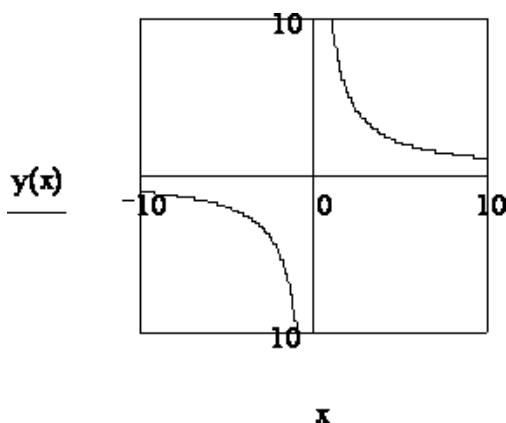
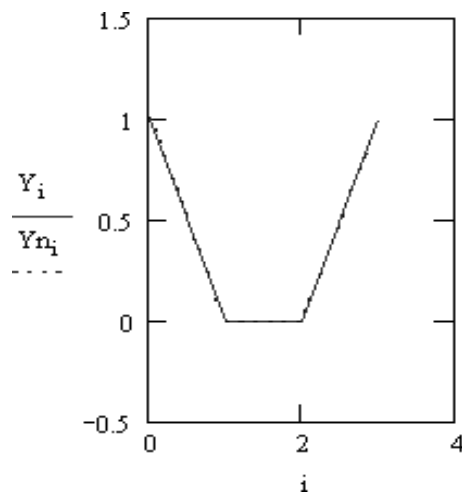


Рисунок 4.6 – Передавальна функція нейрона – симетрична гіпербола

Цей нейроподібний елемент здатний подолати проблему персептрона при моделюванні функції «виключаюче ”або”» – завдання вирішується одним нейроподібним елементом (рис. 4.7).

Таким чином, очевидно, що новий нейроподібний елемент має великі можливості в порівнянні з класичним штучним нейроном. Тому, об’єднуючи такі нейроеlementи в мережі, можна отримати ідентифікаційні

моделі, що здатні ефективніше реалізовувати відображення вхідних просторів ознак у вихідні простори категорій за рахунок більш гнучкого підстроювання ідентифікаційної моделі під дією вхідних факторів.



*Рисунок 4.7 – Вирішення завдання «виключаюче ”або”» одним нейроподібним елементом (помилка відтворюваності даних кінцева й становить допустимо малу величину не більше 0,015)*

Створення запропонованого нейроподібного елемента дозволило створити каскадну еволюційну модель у вигляді:

$$y = y' + \Delta y_1 + \Delta y_2 + \dots + \Delta y_n, \quad (4.3)$$

або

$$y = y' + \sum_{i=1}^n \Delta y_i .$$

**Приклад апроксимації** заздалегідь відомої функції  $y = a_1 x$ , **тобто ви-**  
**значимо** всі значення моделі

$$a(x+b)^c + d = a_1 x. \quad (4.4)$$

Мінімізація функції

$$F(a, b, c, d) = \left[ a x - a(x+b)^c - d \right]_1^2 \rightarrow \min \quad (4.5)$$

дає значення коефіцієнтів  $c = 1$ ;  $d = 0$ ;  $b = 0$ ;  $a = a_1$ .

Тоді

$$\Delta y = a_1 - a(x+b)^c - d. \quad (4.6)$$

Функція

$$F^{(1)} = \left[ a(x+b)^c - d - a'(x+b')^{c'} - d' \right]^2 \rightarrow \min. \quad (4.7)$$

Ця функція представлена у вигляді

$$F^{(i)} = \left[ a x - a(x+b)^c - a'(x+b')^{c'} - d'' \right]$$

або в загальному вигляді

$$F^{(k)} = \left\{ a_i x - \left[ a(x+b)^c - d \right] - \sum_j^k \left[ a^{(j)} (x+b^{(j)})^{c^{(j)}} + d^{(j)} \right] \right\}^2 \rightarrow \min. \quad (4.8)$$

Або

$$F^{(k)} = \left\{ a_i x_i - \sum_j^k \left[ a^{(j)} (x_m + b^{(j)})^{c^{(j)}} + d^{(j)} \right] \right\}^2 \rightarrow \min. \quad (4.9)$$

Особливістю цього ряду є поступове зменшення «вкладу» кожного наступного члена моделі в уточнення значень  $y_m$ .

$$y_m = \sum_j^k \left[ a^{(j)} (x_m + b^{(j)})^{c^{(j)}} + d^{(j)} \right]. \quad (4.10)$$

Аналогічно може бути створена модель з будь-якої іншої функції:

$$y_m = \sum_j^k F_j(x). \quad (4.11)$$

Для моделювання об'єкта з одним входом і одним виходом використаний файл вихідних даних (ww.pgn) з кількістю даних рівним N. Загальний вигляд програми представлений на рис. 4.8.

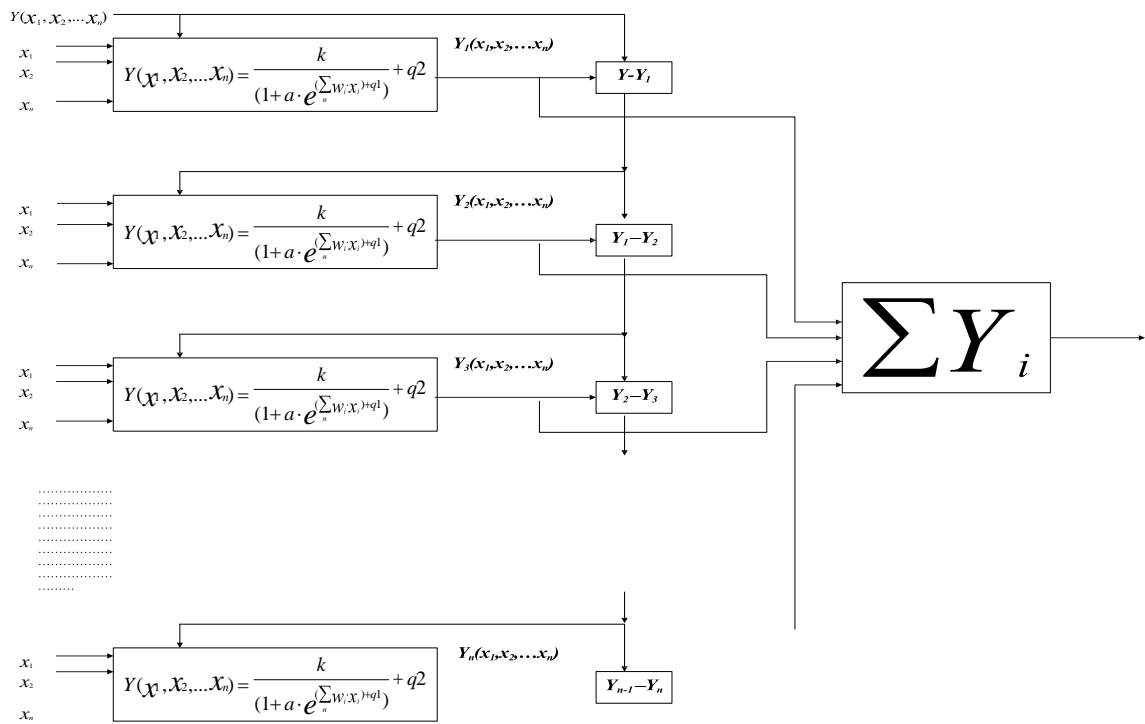


Рисунок 4.8 – Структура еволюційної ідентифікаційної моделі

Алгоритм побудови еволюційної мережі на основі нового нейроподібного елемента із застосуванням пакета MathCad представлений файлом з описом згідно з виразом (4.12).

Моделювання об'єкта з двома й більше входними змінними на основі еволюційної мережі не відрізняється принципово від наведеного на рис. 5.6. Похибка моделювання не перевищувала на досліджених прикладах 0,5 %. Уведення сигналу зворотного зв'язку в структуру входів нейроподібного елемента істотно підвищує точність і можливості моделювання багатовимірних об'єктів.

Верстат-робот із МПС повинен являти собою складну динамічну систему, що має властивість гомеостатичності, тобто здатність зберігати рівноважний стан в умовах внутрішніх і зовнішніх впливів. Тому побудова ідентифікаційної моделі оптимального управління складними рухами верстата-робота з МПС має такі особливості:

- об'єкт управління являє собою гомеостатичну систему, у якій виходи одних елементів є входами інших;

- рівновагу виробничої системи має бути збережено за умови її функціонування;

- змінюючи параметри такої системи (довжини штанг), можна досягти стану гомеостатичної рівноваги, що означає моделювання різних якісних станів системи.

```

data := READPRN("ww.prn" )           N := 40
T := data <0>                         Y := data <1>
neuron (y, x, D) :=
  Ymin ← y(x)
  while D > 0.001
    p ← 1
    while p
      p ← 0
      for i ∈ 0..2
        for X ∈ -D, D
          xi ← xi + X
          Y ← y(x)
          p ← X if Y < Ymin
          if Y < Ymin
            p ← X
            j ← i
            Ymin ← Y
          xi ← xi - X
        x ← x + p
      D ← D / 2
  x

```

(4.12)

i := 0.. N - 1

$$y(x) := \sum_i \left[ \frac{x_0}{x_1 + e^{x_2 \cdot (T_i) + x_3}} + x_4 - Y_i \right]^2$$

$$A := \text{neuron} \left[ y, \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.1 \\ 0.1 \\ 0.1 \end{bmatrix}, 0.1 \right]$$

$$Y_n := \left[ \frac{A_0}{A_1 + e^{A_2 \cdot (T_i) + A_3}} \right] + A_4$$

У загальному вигляді модель гомеостатичної рівноваги описується системою рівнянь (4.13), що має такий вигляд:

$$\begin{cases} X_1 = F(X_2, X_3, \dots, X_n) \\ X_2 = F(X_1, X_3, \dots, X_n) \\ \quad \quad \quad \square \\ X_n = F(X_1, X_2, \dots, X_{n-1}), \end{cases} \quad (4.13)$$

де  $X_1, X_2, \dots, X_n$  – параметри системи.

З рівнянь (4.13) можна зробити висновок про те, що кожна зі змінних  $X_i$  стає як «виходом», так і «входом» системи – усе залежить від постановки задачі дослідження.

Гомеостатична модель побудована на основі прогнозних значень показників довжин штанг з урахуванням значущості кожного з них. Метою побудови гомеостатичної моделі в нейромережному логічному базисі є визначення зміни відгуку в результаті зміни одного або декількох чинників – довжин штанг. Реалізація гомеостатичної моделі здійснювалася за допомогою програми MathLab.

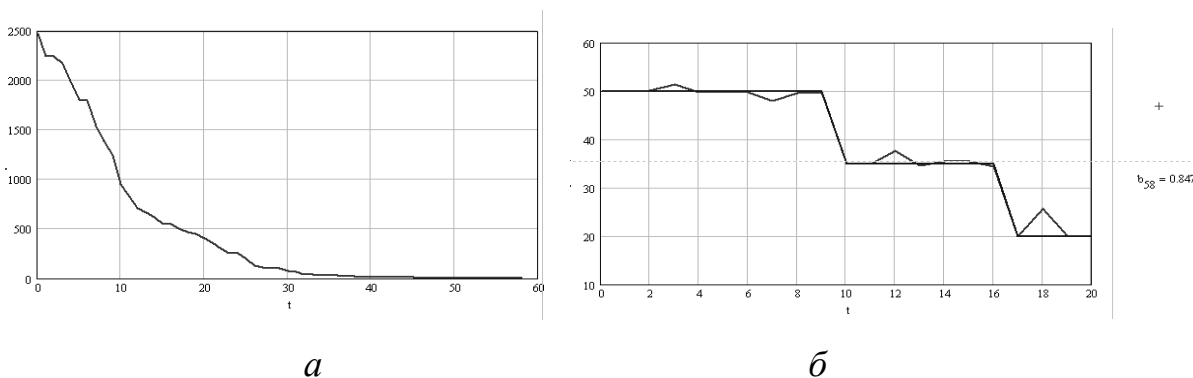
У результаті тестування навчених модулів гомеостатичної системи на базі ідентифікаційних моделей максимальна відносна похибка рішення прикладів тестової вибірки склала:

- для модуля розрахунку точності позиціонування платформи верстата-робота з МПС – 0,84 %;
- для модуля розрахунку швидкості переміщень робочого органа верстата-робота з МПС – 6,12 %;
- для модуля розрахунку продуктивності верстата похибка становить 2,44 %.

Ідентифікаційна модель гомеостатичного стану МПС може бути використана для управління за еталонною моделлю для виявлення можливих резервів із метою підвищення точності відпрацювання траєкторії руху виконавчої ланки МПС. Тобто запропонований вид ідентифікаційної моделі може бути використаний для моделювання

багатофакторних технологічних об'єктів, де функції управління поєднуються з оптимізацією витрат інструменту й забезпечення точності обробки на такому верстаті за рахунок оптимального управління динамікою робочих рухів виконавчого вузла верстата-робота.

Результати моделювання процесу оптимізації зношування різального інструменту при одночасному забезпеченні точності позиціонування робочого вузла верстата-робота з використанням критерію найкоротшого шляху представлені на рис. 4.9, а, б. Наприклад, як видно з рисунків, у результаті лише 58 кроків помилка апроксимації склала 0,85 %.



*Рисунок 4.9 – Результати моделювання зношування твердосплавного різального інструмента при одночасному забезпеченні мінімуму похибки відпрацювання траєкторії (а) із дотриманням принципу найкоротшого шляху як умови мінімізації енергоємності технологічного процесу (б)*

Таким чином, отримані результати дозволяють зробити висновок про успішне застосування еволюційних ідентифікаційних моделей в області управління комплексом показників обробки на верстатах-роботах із МПС.

### 4.3 Програмно-апаратні засоби акустичної діагностики

Раніше в роботах [7, 10] було зроблено припущення, що як інформативне джерело діагностичного сигналу слід використовувати його амплітудно-частотну характеристику власних коливань об'єкта в акустичному діапазоні, було виражено та частково підтверджено.



Для того отримання інформативного спектра акустичного сигналу, гіпотеза про її інформаційному вмісті приймається у випадку порушення об'єкта під впливом «білого шуму», який разом з виявленням інформації активних частот спектра, що дозволяє формувати в процесі діагностики єдині початкові умови.

Вибір діагностичних характеристик об'єкта визначається завданнями управління об'єктами, якими є:

- збільшення точності позиціонування виконавчого механізму об'єкта;
- забезпечення динамічної адаптації виконавчого механізму;
- оптимізація траєкторій переміщень робочого органа.

Вирішення цих завдань спрямоване на підвищення якості та продуктивності технологічних машин і процесів.

Основним завданням діагностики є визнання стану об'єкта в умовах обмеженої інформації. Алгоритм розпізнавання частково ґрунтується на діагностичних моделях, що встановлюють зв'язок між станами об'єктів та їхнім відображенням простору діагностичних ознак. Авторами запропоновано ідентифікаційні моделі виходячи з амплітудно-частотних характеристик власних коливань об'єктів.

Для досліджень використано алгоритм швидкого обчислення дискретного перетворення Фур'є [7] за допомогою FFT-аналізатора, на вхід якого надходить цифровий аудіосигнал. Аналізатор вибирає із сигналу послідовні інтервали («вікна»), на яких обчислюється спектр, який фіксується у вигляді оцифрованої залежності амплітуди від частоти (рис. 4.10).

Аналогічно **смуговим аналізатора**, зазвичай використовується логарифмічний масштаб по осях частот і амплітуд. Але через лінійне розташування смуг FFT за частотою спектр може виглядати недостатньо детальним на нижніх частотах або таким, що надмірно осцилює на верхніх частотах.

Горизонтальною лінією на FFT-аналізаторі відображається білий шум, який має рівну енергію в рівних лінійних частотних інтервалах.



Рисунок 4.10 – Вікно аналізатора при діагностиці МПС

Параметр  $N$  – число аналізованих відкликів сигналу – має вирішальне значення для виду спектра. Чим більше  $N$ , тим щільніше сітка частот, за якими FFT розкладає сигнал, і тим більше деталей за частотою видно на спектрі.

Довші зони сигналу аналізуються для більш високої роздільної здатності. Якщо сигнал у вікні БПФ змінює його властивості, спектр відображає усереднену інформацію сигналу з усього інтервалу вікон.

Для аналізу швидких змін сигналу довжина вікна  $N$  призначається невеликою. Тоді роздільна здатність аналізу в часі зростає, а за частотою – зменшується. Отже, роздільність частотного аналізу зворотно пропорційна роздільності часу, що можна пояснити співвідношенням невизначеності [7, 8, 9].

Для формалізації математичного опису можна скористатися рекомендаціями роботи [14], у якій спектр сигналу представляється по спектральній характеристиці

$$X_p(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} c_p(t) e^{-j\omega t} dt \quad (4.14)$$

Спектральна щільність сигналу визначається за формулою

$$S_x(\omega) = \lim_{T_p \rightarrow \infty} \frac{1}{2 \cdot T_p} M \left[ \left| X_p(j\omega) \right|^2 \right] \quad (4.15)$$

Оцінка спектральної щільності проводиться за відомою реалізацією  $x_p(t)$  сигналу шляхом формування з неї дискретної послідовності  $x(n)$ ,  $n = 0, 1, \dots, N-1$  і обробки цієї послідовності відповідно до заданого квантування. Перетворення Фур'є дійсної послідовності кінцевої довжини  $x(n)$ ,  $n = 0, 1, \dots, N-1$ , так само

$$X(e^{j\omega T}) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\omega T n}, \quad (4.16)$$

у якості оцінки спектральної щільності використовують функцію

$$P_x(\omega) = \frac{1}{N} \left| X(e^{j\omega T}) \right|^2. \quad (4.17)$$

У загальному випадку ці оцінки не є спроможними, і існує можливість їхньої флуктуації близько до істинного значення спектра. Для отримання дійсної оцінки спектра використовуються фільтри й методи усереднення.

Використовуючи фільтри частот із частотною характеристикою  $S(k)$ , можна отримати модифікований спектр об'єкта  $\Omega$  як функцію його властивостей  $Y$

$$A_k \{ f_k [S(k)] \} \rightarrow \Omega(Y). \quad (4.18)$$

Устаткування для проведення експериментальних досліджень:

- експериментальний стенд у вигляді дельта-механізму, що являє собою групу механізмів на основі МПС, який оснащений системою числового програмного керування на базі плати MEGA 2650, що забезпечує програмування управління стендом за допомогою G-кодів;

- дві звукові карти, установлені на двох комп'ютерах з операційною системою Windows XP;

- п'єзоелектричні випромінювач і датчик.
- підсилювач сигналу збудження «білим шумом», потужністю 2 Вт.

Програмне забезпечення:

- комп'ютерний пакет Spectrolab;
- комп'ютерний пакет NeuroPro-0,25;
- комп'ютерний пакет Statistica 10.

#### 4.4 Побудова еталонної моделі МПС

Для формалізації математичного описання застосовані рекомендації роботи [261], у якій спектр сигналу представляється за спектральною характеристикою.

У загальному випадку ці оцінки не є дійсними, і існує можливість їхньої флуктуації близько істинного значення спектра. Використовуючи фільтри частот із частотною характеристикою  $S(k)$ , можна отримати модифікований спектр  $\bar{Y}$  об'єкта  $\Omega$  як функцію його властивостей  $\bar{X}$ :

$$\bar{Y} = A_k \{f_k[S(k)]\} \rightarrow E_y(\bar{X}) . \quad (4.19)$$

При постановці завдання використана теорема Байєса [63]. Тому використані дві основних вхідних позиції: одна – відома, інша – невідома (рис. 4.11). Перша – це гіпотеза про функціональний взаємозв'язок АЧХ із позиціонуванням робочого органа верстата-робота, інша – це статистичні дані, які завдяки перетворенням теореми Байєса формують апостеріорну інформацію, що має похибку в межах довірчого інтервалу.

Вхідними даними є амплітудно-частотні характеристики (що отримані завдяки проведеному вимірюванню з допомогою спектрального аналізу акустичного сигналу у вигляді відклику дії збуджуючого впливу «білого шуму»). Амплітуди дискретних ступенів отриманого амплітудно-частотного спектру визначаються з міркувань об'єму розрахунків та припущення про гідну похибку.

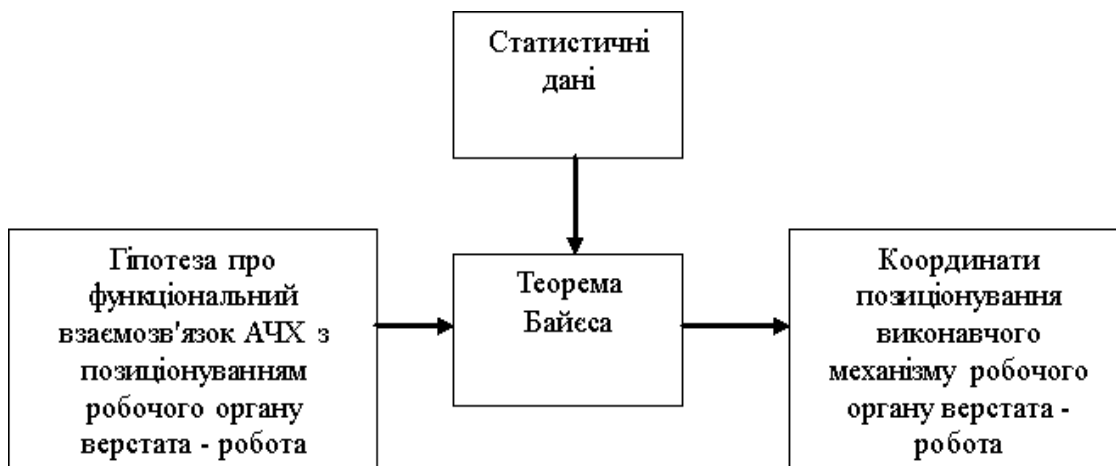


Рисунок 4.11 – Представлення з використанням підходу Байєса, з урахуванням [63]

Обчислювальна модель дозволяє визначити координати виконавчого механізму верстата-робота й використовується для вирішення прямої та зворотної задач. Пряма задача полягає у визначенні оцінки  $\delta$  похибки, тому сума квадратичних відхилень відновленої спектральної характеристики мінімізована в межах заданої похибки. Зворотна задача вирішується шляхом прямих перетворювачів. Для цього використано побудовану нейроподібну мережу у зворотному порядку. Визначено входи за відомими координатами  $\bar{X}$  та відновлено вихідні значення  $\bar{Y}$  (рис. 4.12).

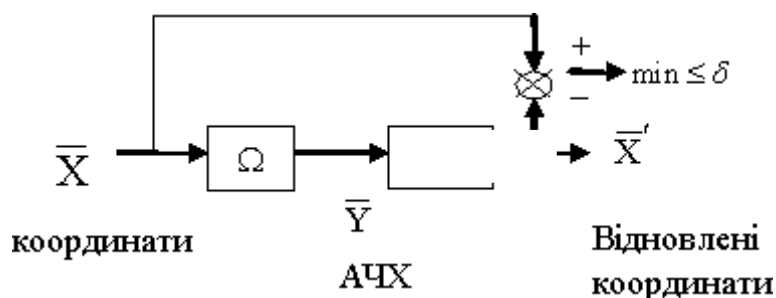


Рисунок 4.12 – Концепція використання еталонної моделі на базі ідентифікаційної моделі

При прямому вирішенні задачі еталонна модель будується з невідомими даними, а потім завдяки навчанню отримує необхідну точність згідно з виразами:

$$\begin{aligned} \bar{Y} &= F_x [x_j, y_j, z_j], \\ \bar{X}' &= F_y [A_i(f_i)], \\ i &= 1..N, \\ j &= 1..M, \\ M &\leq N. \end{aligned} \tag{4.20}$$

У зворотній задачі, знаючи координати позиціонування, відновлення координат виконують шляхом навчання нейроподібної мережі для ідентифікації акустичного спектру з наступним відновленням відновлених координат за заданими акустичними спектрами. Відновлені координати повинні відрізнятися від вхідних координат позиціонування не більше, ніж на величину похибки  $\delta$  (рис. 4.13). Тому оптимізаційна задача полягає в зменшенні похибки між вхідними та відновленими координатами позиціонування.

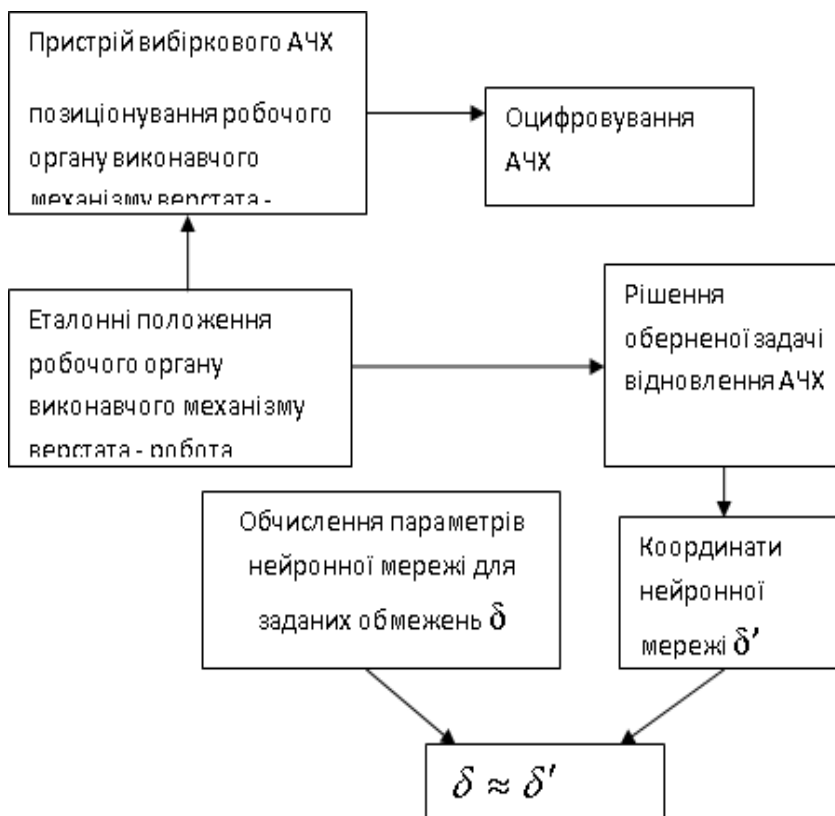


Рисунок 4.13 – Інформаційна модель процесу побудови еталонної моделі

У якості вихідних даних використовується уявлення про АЧХ (входами є амплітуди дискретних ступенів АЧХ). Кількість таких ступенів визначається ступенем дискретності й вибирається з міркувань обсягу обчислень, ємності й необхідної точності моделі (рис. 4.14).

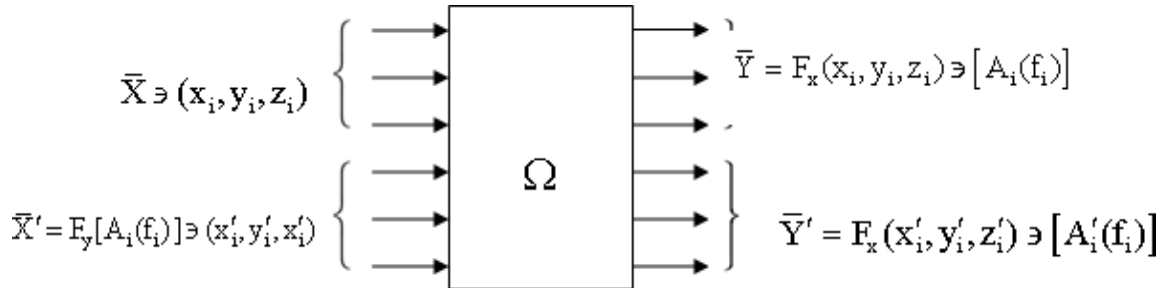


Рисунок 4.14 – Моделювання вхідних та відновлених координат

$$\begin{cases}
 \bar{X} \ni (x_i, y_i, z_i), \\
 \bar{Y} \ni [A_j(f_j)] = F_x(x_i, y_i, z_i), \\
 X' \ni (x'_i, y'_i, z'_i) = F_y[A_i(f_i)], \\
 Y' \ni [A'_i(f_i)] = F_x[x'_i, y'_i, z'_i], \\
 \sum_i^N [(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2 + (z_i - z'_i)^2] \rightarrow \min \\
 \sum_j^i [(A_j(f_j) - A'_j(f_j))]^2 \rightarrow \min \\
 |\bar{X} - X'| \leq \delta \\
 |\bar{Y} - Y'| \leq \delta'
 \end{cases} \quad (4.21)$$

Для координат  $\{x_i, y_i, z_i\}$  обмеження виглядають, як:

$$\begin{cases}
 |x_i - x'_i| \leq \delta \\
 |y_i - y'_i| \leq \delta \\
 |z_i - z'_i| \leq \delta
 \end{cases} \quad (4.22)$$

За умовами відновлення амплітудо-частотних характеристик у межах похибки  $\delta'$  згідно з виразом (3.19):

$$|A(f_i) - A'_i(f)| \leq \delta' \quad (4.23)$$

Кожна амплітуда  $A_i(f_i)$  має розподіл ймовірнісних характеристик. Для заданих вхідних  $X$  нейроподібна мережа відновлює значення  $Y$ . За заданим АЧХ зразків створено обчислювальну модель, що дозволяє з точністю  $|\bar{X} - \bar{Y}| \leq \delta$  відновлювати  $\bar{Y}' = F_x[x'_i, y'_i, z'_i]$ . Для цього вирішується оптимізаційна задача, що має цільову функцію і має обмеження.

З огляду на особливу важливість проблеми здійснено комплексний підхід, при якому процеси контролю й діагностики являють собою процедуру створення еталонної моделі об'єкта управління й підтримки цієї моделі в актуальному стані впродовж технологічної операції. Основою такого підходу є спектр акустичного сигналу, відбитий від елементів технологічної системи, і система його перетворення (рис. 4.15).

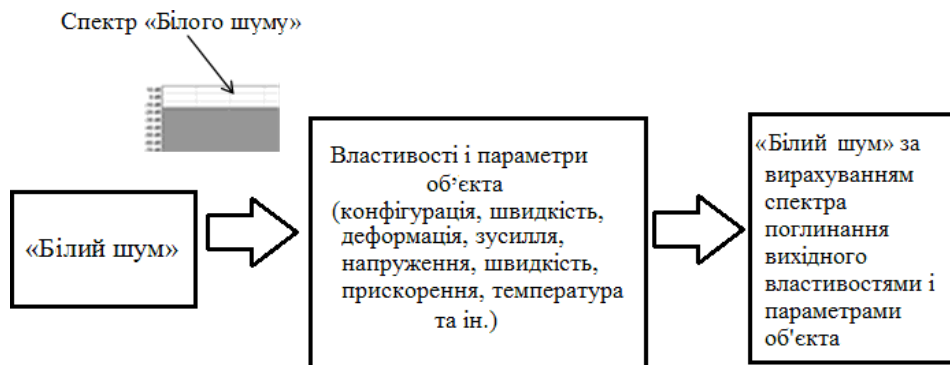


Рисунок 4.15 – Структурна схема створення еталонної моделі мобільного верстата-робота

В основу створення еталонної моделі покладена гіпотеза про інформативні можливості спектра акустичного сигналу як джерела даних про властивості й параметри об'єкта. Як показано в роботах [195, 117], спектр власних порушених коливань об'єкта є найбільш інформативним щодо різних властивостей і параметрів об'єкта. Однак інформативні можливості діагностичного спектра акустичного сигналу значно розширюються шляхом збудження спектрів вимушених коливань «білим шумом», що наводиться випромінювачем у тестовому діапазоні.



Для прийнятих  $W(f)$  – сигнал збудження об'єкта «білим шумом»;  $R[W(f)]$  – реакція об'єкта на збудження «білим шумом»;  $x_k, x_1, \dots, x_r, \dots$  – властивості й параметри об'єкта (конфігурація, швидкість, деформація, зусилля, напруження, швидкість, прискорення, температура й т. п.)  $R[W(f)] = F\{x_k, x_1, x_r, \dots\}$ .

Завданням діагностики й створення еталонної моделі об'єкта є визначення властивостей і параметрів об'єкта  $x_k, x_1, \dots, x_r, \dots$  за реакцією  $R[W(f)]$  (рис. 4.16).

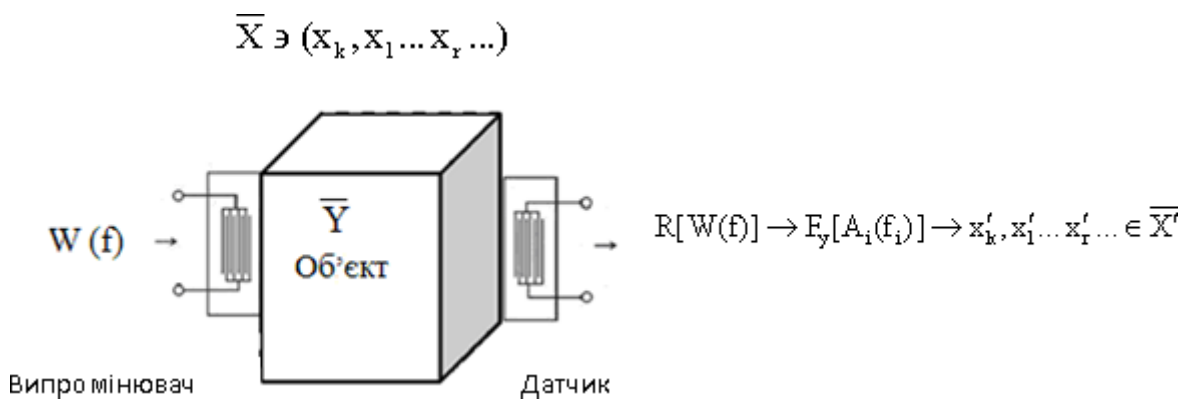


Рисунок 4.16 – Інформаційна модель визначення властивостей і параметрів об'єкта :  $W(f) \rightarrow \text{Object} \rightarrow R[W(f)] \rightarrow F_y[A_i(f_i)] \rightarrow \bar{X}'$

Випромінювач і приймач діагностичного пристрою є оборотні п'єзоелектричні елементи, на які подаються (випромінювач) і з яких знімаються (датчик) сигнали. Оскільки діагностика об'єкта проводиться щодо опорного сигналу «білого шуму», то такий підхід дозволяє нормувати вихідні діагностичні сигнали щодо опорного сигналу.

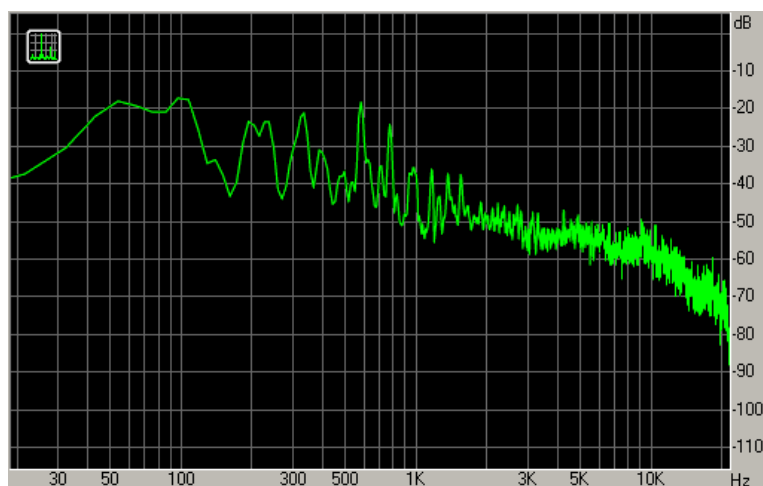
Кожен вимір має максимально можливий захист від випадкових флуктуацій сигналу. Це досягається тим, що при кожній реалізації елементів плану експерименту вимірювання усереднюють у циклі зі 100 послідовних сканувань спектра з дискретністю спектра в 178,3 від 0 до 20 000 Гц. Завдяки повнофакторному експерименту рандомизацією сполучень факторів було сформовано базу даних, де факторами є координати позиціонування виконавчого механізму експериментального стенду ( $X_i, Y_i, Z_i$ ).

Акустичний спектр відгуку, що являє собою суму збуджених, поглинених і відображених акустичних хвиль, піддається обробці на глибоких нейроподібних мережах. Результатом такої обробки є модель, що інтегрує особливості багатшарових перцептронів і карт Кохонена. Таке об'єднання можливе **за допомогою нейроподібних мереж каскадної конфігурації і модифікованим нейроподібним елементом.**

У програмному пакеті NeuroPro надана можливість застосувати отриману модель для прогнозування властивостей і параметрів об'єкта за амплітудо-частотними характеристиками і тим самим забезпечити функціонування еталонної моделі, яка використовується для інтелектуального управління верстатом-роботом.

Після обробки інформації щодо позиціонування в кожному з характерних положень виконавчого органа отримано еталонну модель, що дозволяє коригувати координати переміщень при обробці або складанні у верстатах-роботах.

Для досліджень використано алгоритм швидкого обчислення дискретного перетворення Фур'є за допомогою FFT-аналізатора, на вхід якого надходить цифровий аудіосигнал. Аналізатор вибирає із сигналу послідовні інтервали («вікна»), на яких обчислюється спектр, який відображається у вигляді графіка залежності амплітуди від частоти (рис. 4.17).



*Рисунок 4.17 – Вікно FFT-аналізатора*

Аналогічно смуговим аналізаторам, зазвичай використовується логарифмічний масштаб по осях частот і амплітуд. Але через лінійне розташування смуг FFT за частотою спектр може виглядати недостатньо детальним на нижніх частотах або таким, що надмірно осцилює на верхніх частотах.

Горизонтальною лінією на FFT-аналізаторі відображається «білий шум», який має рівну енергію в рівних лінійних частотних інтервалах.

Параметр  $N$  – число аналізованих відкликів сигналу – має вирішальне значення для виду спектра. Чим більше  $N$ , тим щільніше сітка частот, за якими FFT розкладає сигнал, і тим більше деталей по частоті видно на спектрі.

Для досягнення більш високого частотного розділення аналізуються довші ділянки сигналу. Якщо сигнал у межах вікна FFT змінює свої властивості, то спектр відображає усереднену інформацію про сигнал з усього інтервалу вікна.

Для аналізу швидких змін у сигналі довжина вікна  $N$  призначається малою. Тоді розділення аналізу за часом збільшується, а за частотою – зменшується. Таким чином, розділення аналізу за частотою обернено пропорційне вирішенню за часом, що може пояснюватися співвідношенням невизначеностей.

Для створення інформативного спектра акустичного сигналу в роботі прийнята гіпотеза про його інформаційний зміст при порушенні об'єкта впливом «білого шуму», який, разом із виявленням інформаційно активних частот спектра, дозволяє формувати в процесі діагностики єдині початкові умови.

Побудова нейромережевої еталонної моделі для діагностики поточних характеристик об'єкта розпочинається з вибору діагностованих характеристик об'єкта, що визначаються завданнями управління:

- підвищення точності позиціонування виконавчого механізму об'єкта;
- забезпечення динамічної настройки виконавчого механізму;

– оптимізація траєкторій переміщень робочого виконавчого органа.

Вирішення цих завдань спрямоване на підвищення якості й продуктивності технологічних машин і процесів.

Устаткування для проведення експериментальних досліджень:

– експериментальний стенд у вигляді дельта-механізму, що являє собою групу механізмів на основі МПС, який оснащений системою числового програмного керування на базі плати MEGA 2650, що забезпечує програмування управління стендом за допомогою G-кодів;

– дві звукові карти, установлені на двох комп'ютерах з операційною системою Windows XP;

– п'єзоелектричні випромінювач і датчик;

– підсилювач сигналу збудження «білим шумом», потужністю 2 Вт.

Програмне забезпечення:

– комп'ютерний пакет Spectrolab;

– комп'ютерний пакет NeuroPro-0,25;

– комп'ютерний пакет Statistica 10.

Планом експериментів передбачалося дослідження залежності між параметрами спектра акустичного сигналу із заданою дискретністю, **порушеною** збудженим впливом у вигляді «білого шуму». Авторами висунуто припущення про можливість діагностики характеристик досліджуваних об'єктів, інваріантної стосовно похибок, що вносяться апаратною частиною системи діагностики. Це припущення ґрунтується на тому, що діагностичний сигнал має початкові значення ступенів акустичного спектру, що формуються «білим шумом» тими ж інформаційними каналами й тими ж апаратними засобами, що й основний збуджений діагностичний сигнал.

Кожен із  $n$  вимірів мав максимально можливий захист від випадкових флуктуацій сигналу. Це досягалося тим, що при кожній реалізації елементів плану експерименту вимірювання усереднюють у циклі зі 100 послідовних сканувань спектра з дискретністю спектра в 178,3 від 0 до 20 000 Гц. Повнофакторний експеримент із рандомізацією сполучень

факторів дозволив сформувати базу даних, де факторами були координати позиціонування виконавчого механізму експериментального стенду  $(x_i, y_i, z_i)$ ,  $i = 1 \dots n(\Xi_i, \Psi_i, Z_i)$ . Приклад фрагмента такої бази для експериментальних позицій представлений у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Амплітуди акустичного спектру за його дискретою

№	Входи: координати позиціонування, мм			Виходи: амплітуди акустичного спектру, дБ, за його дискретою, Гц					
	X, мм	Y, мм	Z, мм	172,3	344,6	516,9	...	21 882,1	22 054,4
1	-52	-30	5	-29,9	-29,76	-46,87	...	-73,68	-81,32
2	52	-30	5	-32,3	-31,94	-46,98	...	-75,34	-83,49
3	0	-60	5	-34,49	-33,72	-45,56	...	-75,61	-83,99
4	0	0	5	-36,68	-36,11	-48,39	...	-76,12	-84,93
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
n-3	-52	-30	250	-54,24	-48,78	-49,53	...	-75,75	-83,77
n-2	52	-30	250	-53,57	-48,33	-48,57	...	-76,55	-84,44
n-1	0	-60	250	-55,13	-48,41	-48,71	...	-76,27	-84,16
n	0	0	250	-54,31	-49,35	-50,21	...	-75,86	-84,02

Приклад акустичного спектру діагностичного сигналу ідентифікації позиціонування виконавчого механізму експериментального стенду представлений на рис. 4.18.

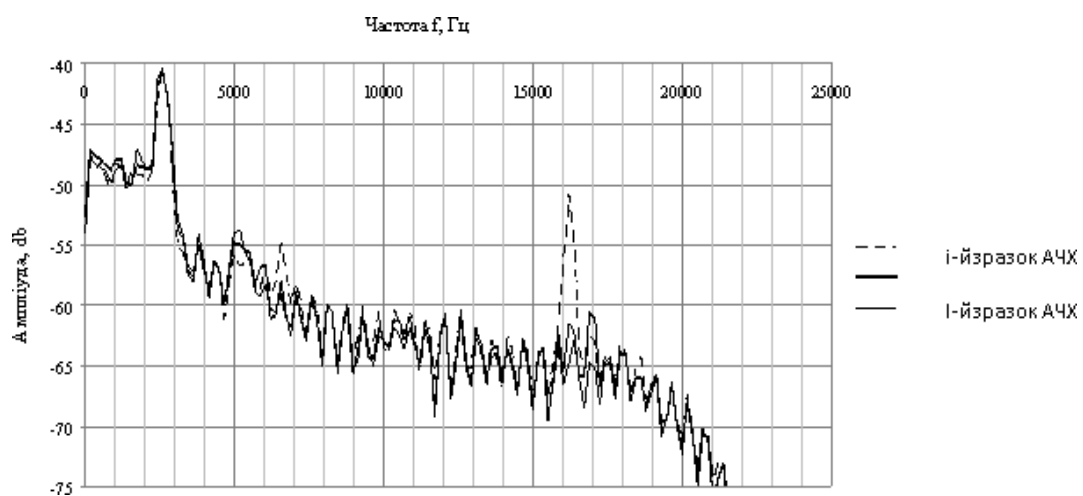


Рисунок 4.18 – Приклади спектрів акустичних сигналів для координат позиціонування виконавчого механізму експериментального стенду

Створені нейромережеві моделі були піддані перевірці на адекватність за критерієм Фішера. Результати оцінок цих моделей представлені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Перевірка математичних моделей, побудованих за експериментальними даними, на адекватність за критерієм Фішера за умовами  $F_{\text{табл}} \ll F_{\text{розрах}}$

Об'єкт експерименту	Координати входів $x_i, y_i, z_i$		$\delta$	$F_{\text{табл}}$	$F_{\text{розрах}}$
Конфігурація механізму	$x_0 = -75, -50, -25, 0, 25, 50, 75$		0,01	2,67	$8,6 \times 10^7$
	$y_0 = -75, -50, -25, 0, 25, 50, 75$		0,01	2,66	$4,5 \times 10^7$
	$z_0 = -75, -50, -25, 0, 25, 50, 75$		0,01	2,66	$1,6 \times 10^8$
	$x_1 = -75, -50, -25, 0, 25, 50, 75$		0,01	2,60	$9,6 \times 10^3$
	$y_1 = -75, -50, -25, 0, 25, 50, 75$		0,01	2,60	$3,1 \times 10^4$
	$z_1 = -75, -50, -25, 0, 25, 50, 75$		0,01	2,60	$2,1 \times 10^4$
Конфігурація з робочим мотор-шпинделем	$x_0 = -75, -50, -25, 0, 25, 50, 75$		0,01	2,63	$1,4 \times 10^3$
	$y_0 = -75, -50, -25, 0, 25, 50, 75$		0,01	2,60	$2,9 \times 10^8$
	$z_0 = -75, -50, -25, 0, 25, 50, 75$		0,01	2,59	$1,8 \times 10^7$
Траєкторія переміщення зі змінною швидкістю й навантаженням на привод	$X_0 \rightarrow X_1$	$X_0$	0,01	2,60	$5,9 \times 10^2$
		$X_1$	0,01	2,60	$6,5 \times 10^2$
	$Y_0 \rightarrow Y_1$	$Y_0$	0,01	2,60	$6,7 \times 10^2$
		$Y_1$	0,01	2,60	$6,7 \times 10^2$
	$Z_0 \rightarrow Z_1$	$Z_0$	0,1	2,60	$8,8 \times 10^2$
		$Z_1$	0,1	2,60	$8,8 \times 10^2$
	Швидкість переміщення		0,01	2,60	$4,7 \times 10^2$
	Маса виконавчого механізму		0,01	2,60	$3,5 \times 10^2$
Зміни температури зразка в межах 25...90 °C	Зразок 1		0,1 °C	3,17	$3,7 \times 10^2$
	Зразок 2		0,1 °C	3,05	$6,9 \times 10^2$

При навчанні нейроподібної мережі сформовано вхідну вибірку даних (параметри АЧХ) – вхідні дані відносно позиціонування. У рамках цих вхідних даних побудовано нейромережну модель, для чого в самому початку прийнято припущення, що вона дозволить установити взаємозв'язок між АЧХ та координатами положення робочого органа верстата-робота. Але ці дані отримано завдяки вимірюванню, тому є похибка (звідси має місце статистична ймовірність). Ці дані – отримані до проведення експерименту.

У цілому такий підхід обґрунтовує доцільність використання концепції глибокої нейроподібної мережі (рис. 4.19).

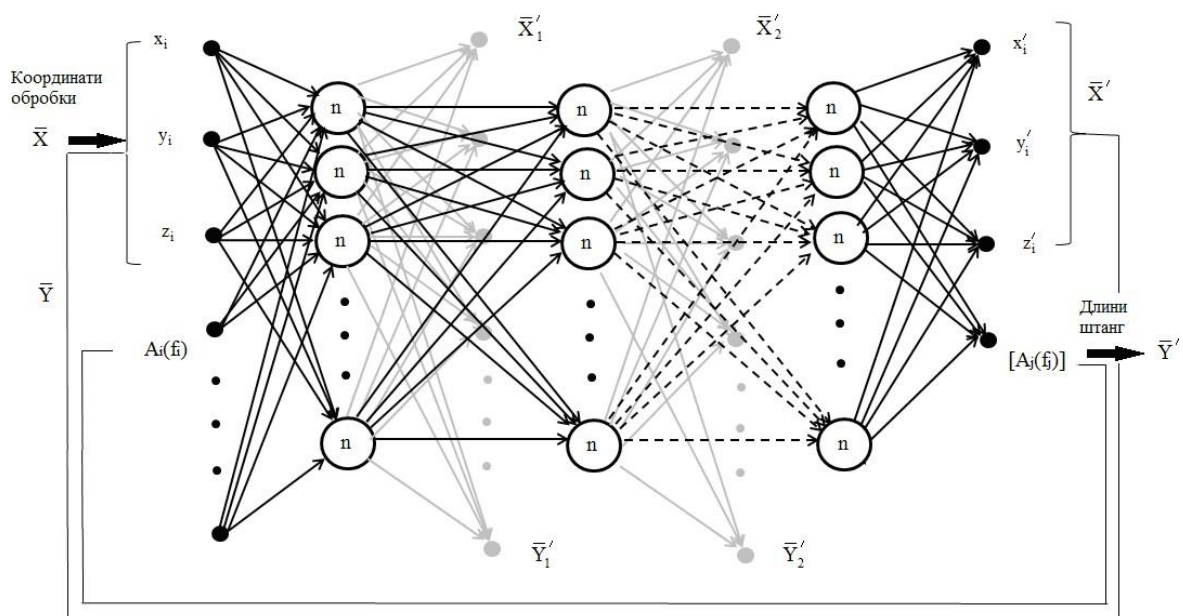


Рисунок 4.19 – Схема еталонної моделі на глибокій нейроподібній мережі

Адекватність моделей підтверджена багаторазовим перевищенням розрахункового значення критерію Фішера над його табличним значенням для заданої ймовірності помилки для моделей входів – частотних діапазонів акустичного спектру, побудованих на строк **кортежу** вихідних даних.

Отримані результати дослідження підтверджують положення, викладені в роботі [117], де авторами стверджується, що управління виконавчими рухами технологічних машин із МПС являє собою складну задачу,

вирішення якої може бути отримане на основі вирішення задач кінематики та динаміки виконавчих механізмів. У результаті можуть бути створені умови для точного позиціонування робочих органів виконавчих механізмів при оптимальних швидкостях і прискореннях їхніх рухів по заданій траєкторії. Для цих цілей системи управління повинні бути оснащені інформативними системами ідентифікації об'єктів. Для підтвердження цього пропонуються результати експериментальних досліджень, які дають підстави для створення систем діагностики кінематики й динаміки механізму, на базі якого авторами створюються мобільні верстати-роботи для застосування в реконфігурованих виробничих системах механічної обробки.

#### **4.5 Акустична діагностика розмірів і якості поверхонь деталей верстата**

Удосконаленню процесу автоматизованого контролю присвячено досить велику кількість наукових публікацій [114, 173]. Серед численних принципів і способів контролю особливе місце займають неруйнівні й безконтактні методи контролю. Однією з операцій технологічного процесу є операція контролю розмірів деталей. Важливість контрольних операцій у структурі технологічних процесів важко переоцінити, проте їхня трудомісткість часто є стримуючим фактором, що вимагає шукати альтернативні методи контролю якості деталей [188]. Автоматизація виробничих процесів передбачає проведення контрольних переходів на верстатах із ЧПУ, однак і цей етап супроводжується витратами часу, що так само впливає на продуктивність обробки.

Основною проблемою, пов'язаною з удосконаленням виготовлення виробів машинобудування, є проблема підвищення продуктивності випуску виробів за рахунок скорочення витрат часу й підвищення надійності контрольних операцій. Запропоновано універсальний метод вимірювання



комплексу геометричних параметрів деталі й характеристик їхньої якості. Рішення, на нашу думку, полягає в розробці способу діагностики розмірів деталей із достатньою точністю й достовірністю. Із цією метою в роботі сформульована гіпотеза про те, що нормований вплив на контрольовані деталі супроводжується їхніми відгуками, які мають специфічні характеристики, за поєднанням яких можна діагностувати величину й точність розмірів деталей та інших характеристик їхньої якості.

У якості впливу на контрольовану деталь пропонується використувати порушені в результаті подачі в контур збудження електромагнітного імпульсу, викликаного розрядом конденсатора на ланцюг індуктивності, розташований у безпосередній близькості від контрольованої деталі. **Оскільки порушення**, що в коливальному контурі R-L-C **ініціює** магнітоелектричні процеси в тілі деталі, то **вони** можуть фіксуватися у вигляді відбитих імпульсів різної частоти, що залежать від розмірів деталі й від середовища поширення цих сигналів – щільності металу, фазового складу й т. п.

Природа цього явища пов'язана з виникненням акустичної емісії в металах. Акустична емісія являє собою випромінювання пружних хвиль, що виникають у твердих тілах у результаті локальної динамічної перебудови їхньої структури. Безумовно, дослідження цього явища у світі формулювання гіпотези теоретичними методами є вкрай складними й у кінцевому підсумку мають суто локальний результат. Тому для вивчення ефекту акустичної емісії було прийнято рішення провести експериментальні дослідження.

Для експерименту була використана партія деталей, ескіз яких представлений на рис. 4.20.

Розміри деталей представлені в табл. 4.3.

Усі вхідні й вихідні поля описані математичними формулами, які необхідні для створення процесора обчислення параметрів деталей.

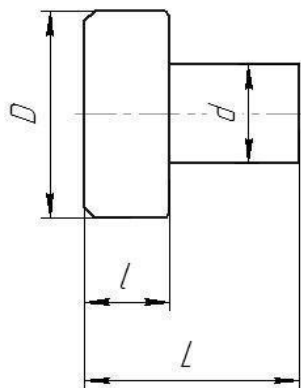


Рисунок 4.20 – Ескіз експериментального зразка

Таблиця 4.3 – Розміри партії деталей

№	D	d	l	L
1	49,729	29,974	19,970	50,251
4	50,006	29,956	19,979	49,924
5	49,897	29,999	20,046	49,918
7	49,863	29,869	19,821	50,267
9	50,074	30,105	20,083	50,152
11	49,867	29,851	19,985	49,94
13	49,740	30,072	20,154	50,326
15	50,088	30,099	19,987	50,038
16	49,971	30,017	19,702	49,745
17	49,973	30,147	19,960	49,552
18	49,860	30,064	20,040	49,808
21	50,070	29,897	19,910	49,981
22	49,633	30,018	19,962	49,913
24	50,090	29,835	19,953	49,965
26	49,934	29,938	19,935	49,818

Були отримані математичні моделі по одношаровій, двошаровій і тришаровій нейронних мережах. Установлено, що найменша кількість синапсів в одношаровій мережі, а, відповідно, і швидкість обробки даних, в одношаровій мережі. Похибка інформації про розміри деталі не перевищувала 1–2 %.

Отримана математична модель, яка дозволяє за двома входами-амплітудами з максимальною вагомістю визначати комплекс контрольованих параметрів деталей будь-якої конфігурації з високою точністю. Схема установки настільки проста, що дозволяє контролювати деталі в процесі обробки, також ця установка набагато нижча за вартістю в порівнянні з іншими контролюючими пристроями, що є її величезною перевагою.

Деталь збуджувалася за допомогою блоку порушення контролюючого сигналу – електромагнітного імпульсу, який супроводжується функцією відгуку у вигляді спектра амплітудно-частотних характеристик деталі. Амплітудно-частотні характеристики оброблялися в блоці процесора з виходом на розміри деталі, причому за один імпульс, що впливає, отримуються одночасно всі чотири розміри.

Таким чином, встановлено, що інформація, необхідна для визначення розмірів деталей на основі амплітудно-частотних характеристик сигналу відгуку при імпульсному впливі на матеріал деталі електромагнітного поля, дозволяє значно скоротити обсяг інформації на основі математичної моделі обробки даних про сигнал – із 20 фільтрів амплітудно-частотних характеристик використовувати 2–3, причому кожному розміру відповідає своє поєднання фільтрів. Збільшення кількості одночасно контрольованих розмірів не призводить до істотного збільшення складності моделі й числа елементів.

У роботі [195] підкреслено, що геометричні параметри деталей можна ідентифікувати на основі використання спектрів акустичних сигналів, отриманих у результаті **порушення** цих деталей ступінчастими ударними впливами. Це дозволило комплектувати групи пластин різальних інструментів для оснащення ними великогабаритних фрез, а також ідентифікувати абразивні круги [177, 178, 194, 244, 245, 246].

Припускаємо, що якщо є взаємозв'язок розмірів деталі зі спектром **порушених** у деталі резонансних коливань, то повинен існувати й взаємозв'язок розмірів деталей між собою. Тому дослідження можливості акустичної діагностики характеристик деталей включає два етапи:



Розмірний аналіз виконується за креслеником (конструктивом) деталі, де всі розміри розділені на дві групи: I – пов’язані між собою (X1, X2, X5, X6) і II – незв’язні явно між собою розміри (X3, X4, X7). Структурна схема такого функціонального ланцюга представлена на рис. 4.22.

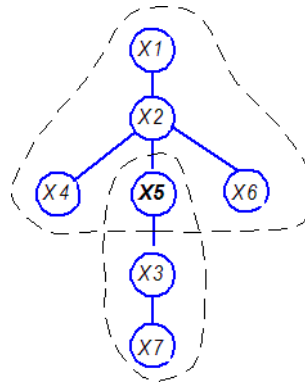


Рисунок 4.22 – Функціональний розмірний ланцюг

На основі аналізу функціонального розмірного ланцюга виділена ознака X5 зв’язує I і II групи розмірів і є найбільш інформативною.

Для побудови загальної моделі взаємозв’язку розмірів деталі побудовано 7 локальних ідентифікаційних моделей розмірів із зазначенням значущості входів (розмірів  $X_i$ ) для формування вихідних значень одиничних розмірів. Результати представлені в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Коефіцієнти значущості розмірів в нейромережевих моделях

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7
X1		0	0,84116	0	0	0,15898	0,28334
X2	1		0	1	1	1	0,78928
X3	0	0,53287		0,779	0	0,23535	1
X4	0	0	0		0	0,10524	0,39114
X5	0,25482	0,92257	1	0		0,24394	0
X6	0,25812	1	0,67046	0,26051	0,17101		0
X7	0,26366	0	0	0,52896	0,64566	0,16132	

За отриманими даними, з використанням відомого нейромережевого пакета NeuroPro-0.25, побудовано 7 моделей нейронних мереж для створення узагальненої моделі нейромережевого гомеостата розмірів оброблених деталей, показаний на рис. 4.23.

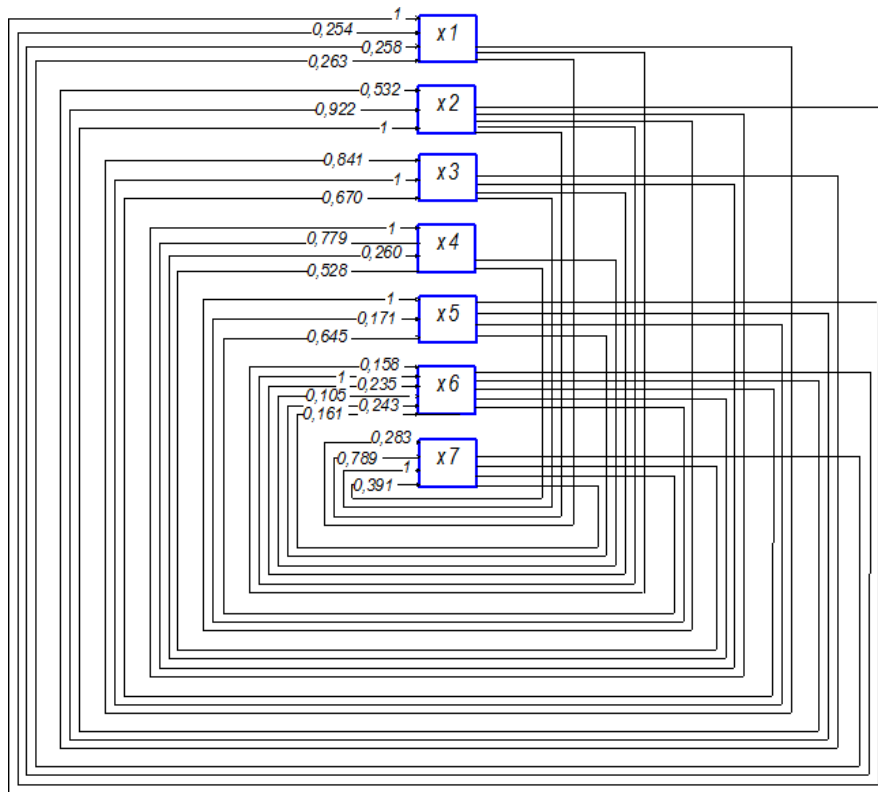


Рисунок 4.23 – Нейромережевий гомеостат взаємозв'язку розмірів оброблених деталей

Для побудови кореляційної моделі значення коефіцієнтів кореляції зведені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Коефіцієнти кореляції розмірів деталі оброблених деталей

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7
x1	1	0,578657	0,307873	0,010358	-0,00106	0,232449	-0,18852
x2	0,578657	1	0,133517	-0,09168	-0,26202	0,410269	-0,05862
x3	0,307873	0,133517	1	0,018081	-0,00047	0,125292	-0,1023
x4	0,010358	-0,09168	0,018081	1	0,103183	0,117343	-0,06554
x5	-0,00106	-0,26202	-0,00047	0,103183	1	0,661266	0,661266
x6	0,232449	0,410269	0,125292	0,117343	0,661266	1	-0,06685
x7	-0,18852	-0,05862	-0,1023	-0,06554	0,018047	-0,06685	1

За даними табл. 4.5 і 4.6 на рис. 4.24, а, б показані графи взаємозв'язку розмірів оброблених деталей, причому нейромережева модель відображає більш тісний взаємозв'язок, ніж кореляційний, що відрізняється слабкими зв'язками.

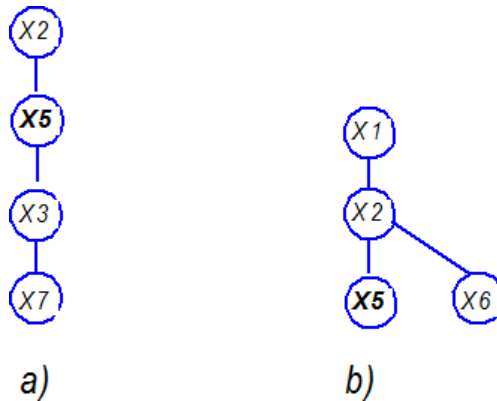


Рисунок 4.24– Моделі розмірних зв'язків: а – нейромережева; б – кореляційна

Результати спільного аналізу НС моделі й кореляційної моделі взаємозв'язку розмірів деталі показані на рис. 4.25.

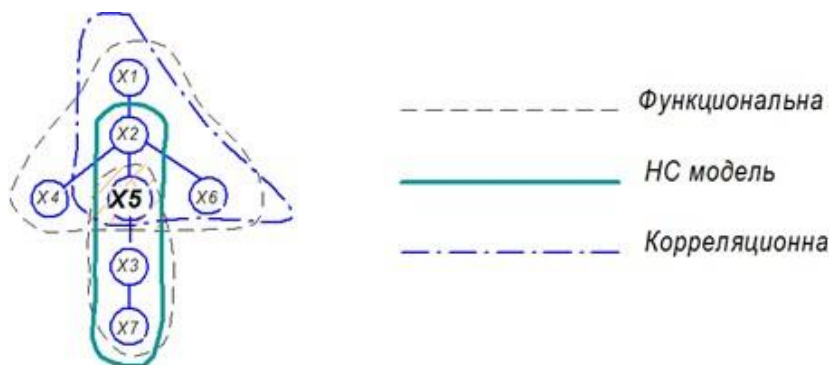


Рисунок 4.25 – Узагальнена модель взаємозв'язку розмірів оброблених деталей

Як впливає зі створеної схеми взаємозв'язків розмірів, загальним для всіх груп розмірів і таким, що одночасно зв'язує їх, є розмір X5. Його вимірювання дозволяє прогнозувати точність інших розмірів. Доведений взаємозв'язок розмірів деталі дозволяє також зробити висновок про принципову можливість комплексного (одночасного) контролю їхніх характеристик на основі значень амплітуд виявлених частот спектра резонансних коливань деталі.

Для проведення 2-го етапу дослідження використана та ж партія деталей у кількості 100 штук із параметрами, зазначеними в табл. 4.4, і створений експериментальний стенд (рис. 4.26), що включає: пристрій закріплення деталі з установленими п'єзоелектричним випромінювачем і п'єзоелектричним датчиком акустичних сигналів, генератор звукових сигналів і аналізатор спектру частот на базі звукової карти комп'ютера.

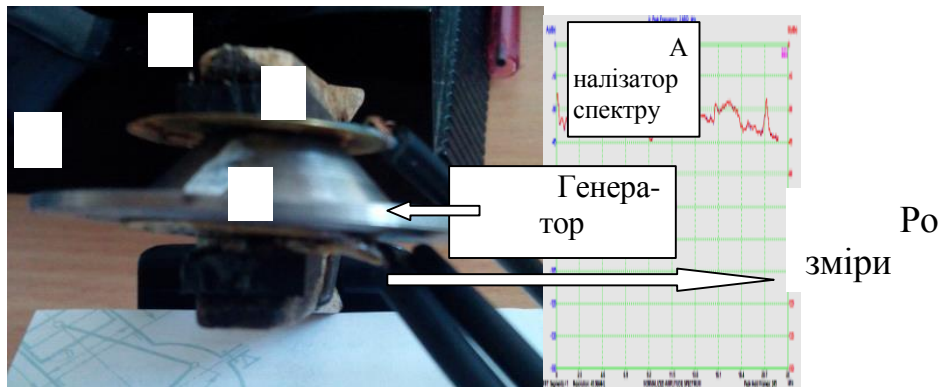


Рисунок 4.26 – Експериментальна установка для акустичного контролю

Отриманий оцифрований спектр частот з оптимізованими ступенями обраної шпаруватості являє собою частину **кортежу** даних входів, а характеристики деталей  $X_i$  і  $Y_i$  – решту **кортежу** даних зразків деталей. Таким чином, отримано навчальну множину для побудови нейромережевої моделі, представленої вербальним описом згаданого вище пакета NeuroPro 0,25. Навчальна множина представлена вибіркою з 80 **кортежів** даних. Решта 20 **кортежів** даних використані для тестової вибірки, за допомогою якої виконано аналіз точності створеної нейромережевої моделі. На рис. 4.27 представлений приклад спектра зразка.

За результатами визначення характеристик деталей за їхніми спектрами на резонансних частотах виконано порівняння похибки оцінки на основі порівняння реальних розмірів і їхніх передбачених значень на всій тестовій безлічі (рис. 4.28 і 4.29).



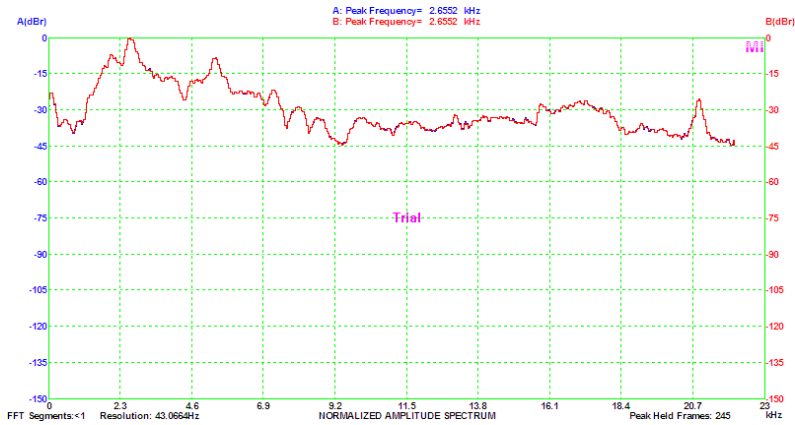


Рисунок 4.27 – Приклад спектра акустичного сигналу одного зразка деталі

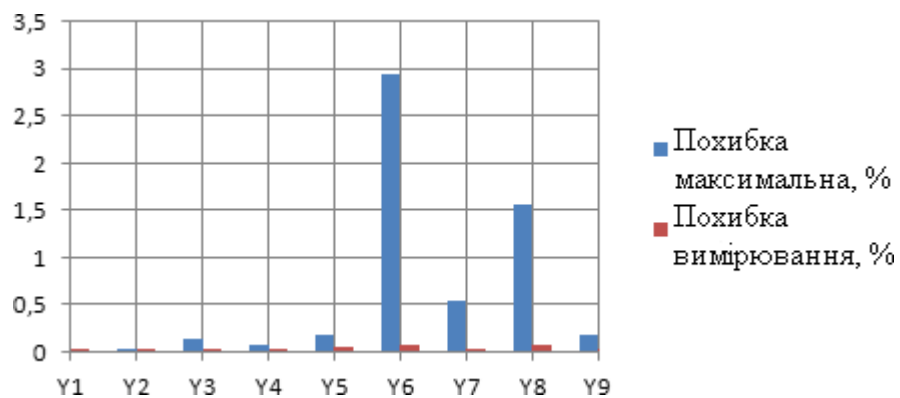


Рисунок 4.28 – Похибки оцінки на основі порівняння реальних розмірів і їхніх передбачених значень на всій тестовій безлічі для 1% -ї точності нейромережевої моделі

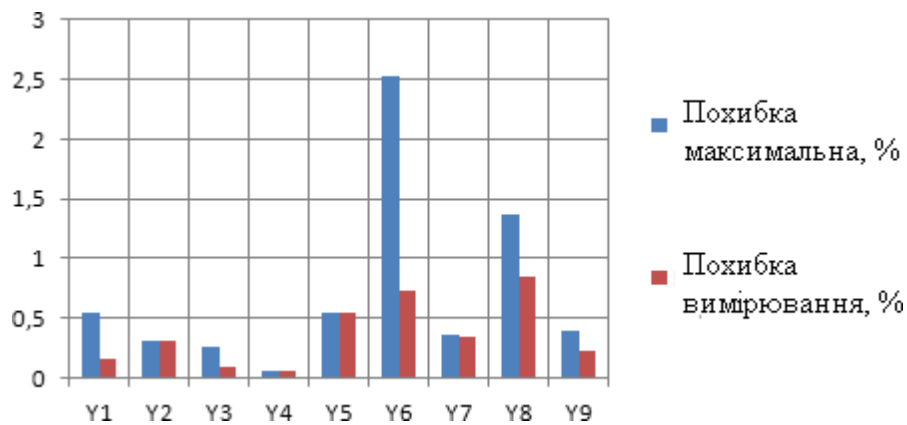


Рисунок 4.29 – Похибки оцінки на основі порівняння реальних розмірів і їхніх передбачених значень на всій тестовій безлічі для 10% -ї точності нейромережевої моделі

Таким чином, встановлено, що резонансні коливання деталей машин містять інформацію про їхні розмірні і якісні характеристики. Показано, що вилучення інформації про зміст резонансних коливань деталей слід виконувати на основі аналізу їхніх амплітудно-частотних спектрів. Запропоновано методику вимірювання числових значень амплітудно-частотних спектрів резонансних коливань деталей. Запропоновано та апробовано методику побудови нейромережевої математичної моделі, що відображає взаємозв'язок спектральних характеристик резонансних коливань деталей із розмірами й показниками якості поверхні. Встановлено, що для оцінки значень розмірів та показників якості поверхні деталей достатньо мати інформацію про відносні значення амплітуд тільки певних частотних діапазонів.

## РОЗДІЛ 5 ВИГОТОВЛЕННЯ Й ВИПРОБУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ЗРАЗКІВ ВЕРСТАТІВ-РОБОТІВ ІЗ МПС І ЗАСОБАМИ ДІАГНОСТИКИ

### 5.1 Об'єкти експериментальних досліджень

Як показує проведений структурний синтез, запропонована структура верстата з МПС дозволяє досягти більш високих показників точності позиціонування виконавчої ланки механізму, ніж традиційні гексаподи. Але більш ефективними можуть стати верстати з МПС у вигляді дельта-машини з елементами триглайда.

При розробці експериментальної дельта-машини з МПС були проаналізовані існуючі верстати, промислові роботи, дельта-механізми та інші машини з МПС. Були розглянуті їхні керуючі механічні елементи – усі ці машини використовують різні маніпулятори, що використовуються при переміщенні робочого органа (робочий інструмент). Спираючись на отримані дані, розробили конструкцію експериментальної дельта-машини з МПС (рис. 5.1)



*Рисунок 5.1 – Рама МПС типу «дельта»*

За розробленою конструкцією була створена рама дельта-машини на заводі ПрАТ «Бетонмаш».

Конструкція вагою 80 кг передбачає обробку деталей розміром до 600 мм у плані й висотою теж до 600 мм. Аналогічні деталі оброблюють на традиційних верстатах із ЧПК масою значно більше тони. Експериментальна конструкція має велику жорсткість, але при обробці деталей виникають великі сили різання. Ці сили можуть негативно впливати на точність, але призначення цього виробу як експериментального об'єкту дозволяє враховувати це як доцільні властивості для досліджень ефективності запропонованих пропозицій у конструюванні МПС і в управлінні ними. Така конфігурація також дозволяє забезпечити доступ до будь-якої сторони деталі, а також дає можливість установлювати плоскі елементи по нормалі до шпинделя, що дозволяє використовувати кінцеві або торцеві фрези для високошвидкісної обробки отворів або площин.

Складання конструкції мобільного верстата-робота на базі дельта-машини виконано в Проблемній лабораторії мобільних інтелектуальних технологічних машин, що створена на кафедрі технології машинобудування Донбаської державної машинобудівної академії при участі Інституту проблем штучного інтелекту НАН України і МОН України. Деякі елементи конструкції, а саме каретки для переміщення маніпуляторів по осі z, пальці для кулькової (опори) передачі, елементи кріплення з кареткою моторшпинделя експериментальної дельта-машини були спроектовані й роздруковані на 3д-принтері.

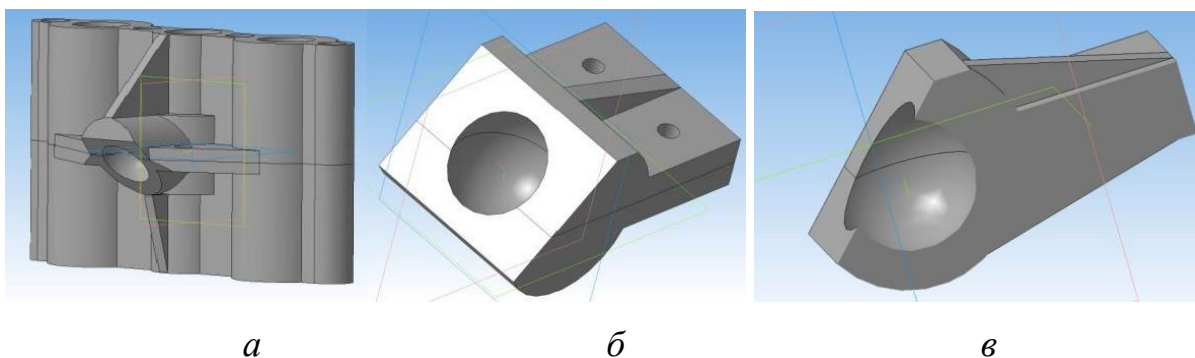
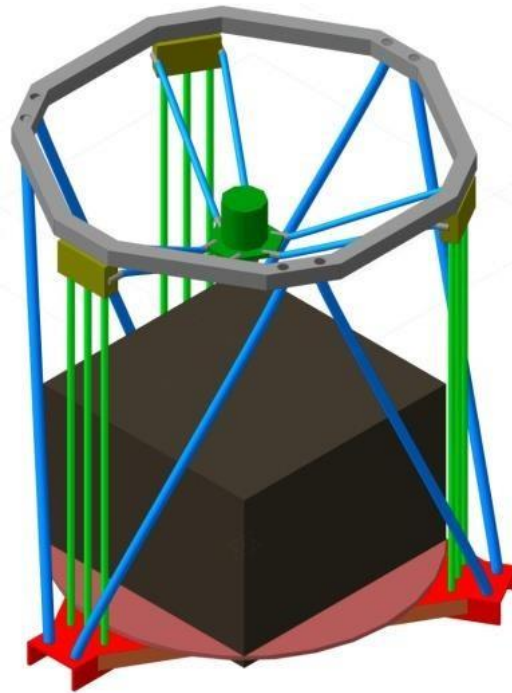


Рисунок 5.2 – 3д-моделі каретки (а) і елементів кріплення (б, в)

Конструкція експериментальної дельта-машини дозволяє обробляти деталі габаритами 600х600 мм. Розроблена дельта-машина дозволяє практично показати можливості й перспективи верстатів нового покоління.

На рис. 5.3 показана 3д-модель з областю в середині розробленої експериментальної дельта-машини. **Габаритні розміри області який показує можливу траєкторію** розробленої експериментальної дельта-машини 600х600 мм.



*Рисунок 5.3 – 3д-модель із можливою траєкторією обробки дельта-машини*

На габаритні розміри експериментальної дельта-машини й подібних дельта-машин із МПС впливають декілька основних аспектів конструкції:

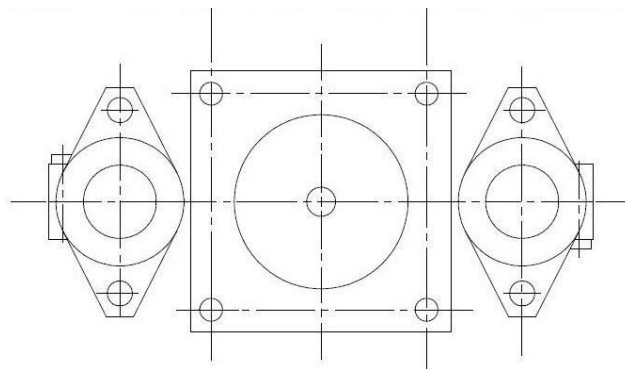
1. Діаметр стола дельта-машини
2. Висота рами дельта-машини
3. Відстань між боковими опорами рами дельта-машини
4. Довжина маніпуляторів мотор-шпинделя дельта-машини
5. Розміри закріпленого в патроні інструмента

У цій конструкції використовуються жорсткі маніпулятори, закріплені на кулькових опорах, які встановлюються в направляючу карету, яка

у свою чергу переміщується по осі Z. Другий кінець стрижня закріплюється також кульковою опорою на каретці з робочим органом верстата. Каретки здійснюють переміщення за допомогою шпильки, яка здійснює обертання за й проти годинникової стрілки за допомогою КГП. Таким чином, маніпулятори рухаються паралельно з різними координатами, що дозволяє переміщати робочий орган експериментальної дельта-машини по осях x, y, z.

За допомогою різноманітних програм моделювання для ПК можна розробити базу даних із номенклатурою елементів для збірки подібних дельта-машин. Наприклад, після одержання заказу для виготовлення продукції інженер технолог на підприємстві зможе швидко підібрати необхідну модель дельта-машини й розпочати монтаж лінії з вибраних дельта-машин.

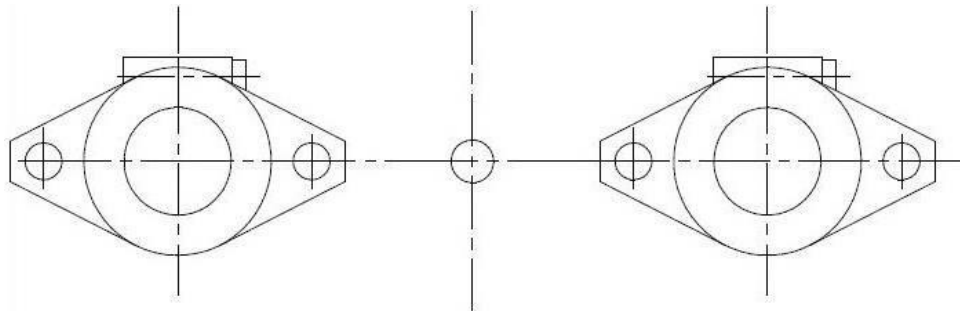
Складання експериментальної дельта-машини починається з установки направляючих осей каретки. Від їхньої паралельності відносно одна одної залежить подальша робота всієї системи переміщення кареток. Для їхньої установки були створені шаблони розміщення отворів під кріплення направляючих осей у нижній основі (рис. 5.4) і у верхній основі, міжцентрова відстань відносно одне одного (рис. 5.5). Також на рис. 5.6 указані кріпильні отвори для крокового двигуна.



*Рисунок 5.4 – Розміщення отворів для кріплення двигуна КГП і розміщення направляючих*

Свердління отворів проводилося ручним дрилем, свердління проходило в декілька проходів зі збільшенням діаметру свердла. Після установ-

ки й закріплення направляючих осей була заміряна міжцентрова відстань із допомогою цифрового ШЦ. Завдяки шаблонам була досягнута точність до 0,3мм міжцентрової відстані. Така мала погрішність допускається. Також на рис. 3.9 видно закріплений кроковий двигун.



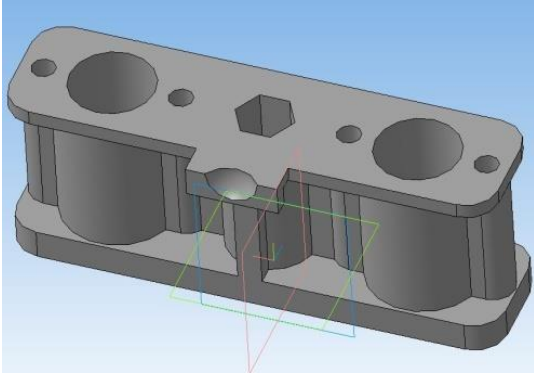
*Рисунок 5.5 – Розміщення отворів для кріплення й розміщення направляючих осей*



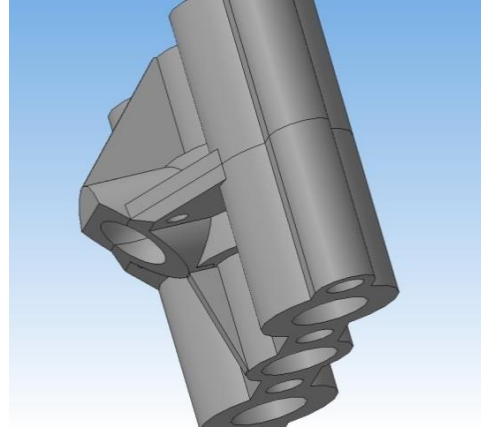
*Рисунок 5.6 – Закріплені направляючі осі*

Після установки і замірів була спроектована направляюча каретка з урахуванням похибки міжцентрової відстані направляючих і крокового двигуна (рис. 5.7, а, б).

Спроектвана каретка складається з двох частин, що скріплюються між собою гвинтами. Це дає змогу комфортно монтувати лінійні підшипники, гайку для передачі руху гвинт-гайка й помістити пальці для подальшого монтажу маніпуляторів каретки мотор-шпинделя.



*а*



*б*

*Рисунок 5.7 – 3д-модель каретки: а – направляючої, б – у стані складення*

Для переміщення каретки (рис. 5.7) по направляючих осях у каретку монтуються лінійні підшипники (рис. 5.8, *а*).



*а*



*б*



*в*

*г*



*д*

*а – лінійний підшипник LM 16 UU; б – кріплення крокового двигуна; в – перехідна муфта 6,35x8 мм; г – оброблені ходові гвинти;*



*д* – елементи каретки для монтажу на платформі МПС

**Рисунок 5.8 – Складові каретки**

Крокові двигуни (рис. 5.8, б) кріпляться на 4 гвинтах із гайками. На вал крокового двигуна закріплюється перехідна муфта. Діаметр вала крокового двигуна 6,35 мм, а вихідний діаметр перехідної муфти 8 мм (рис. 5.8, в). Для установки ходового гвинта **діаметром 12** були оброблені посадочні місця під муфту (рис. 5.8, г).

Для з'єднання направляючої каретки з платформою мотор-шпинделя використовуються маніпулятори. Маніпулятори складаються **зі стрижнів з'єднаної з кареткою і платформою мотор-шпинделя** з допомогою кулькових пальців.

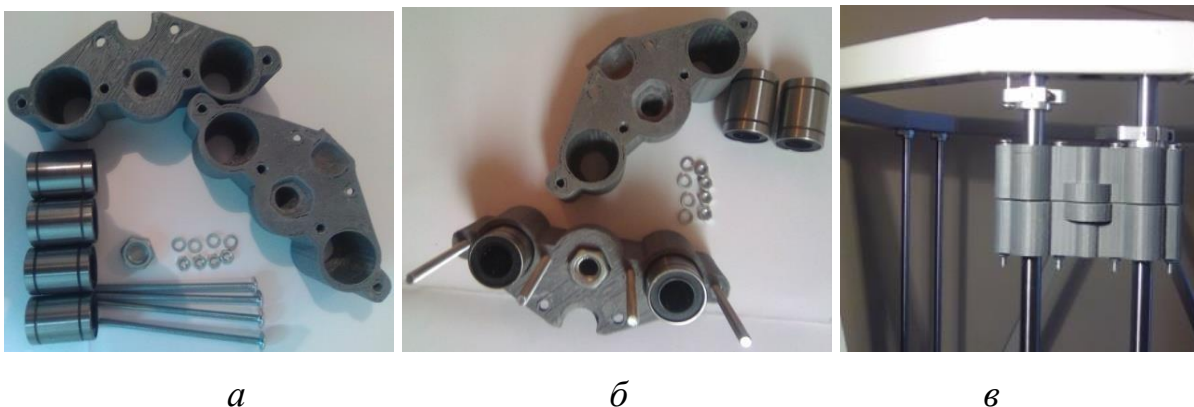
Маніпулятори закріплюються на платформі з каретками за допомогою шарнірів (рис. 5.8, д).

У центрі платформи (рис. 5.9) установлений мотор-шпиндель.



*Рисунок 5.9 – Платформа дельта-машини в зборі*

Після доводки **кареток їх здійснено монтаж** МПС (рис. 5.10, 5.11, 5.12).



*Рисунок 5.10 – Елементи направляючої каретки для монтажу (а, б),*

каретка в зборі з направляючими осями (в)



Рисунок 5.11 – Елементи закріплення:



Рисунок 5.12 – Монтаж ходового гвинта

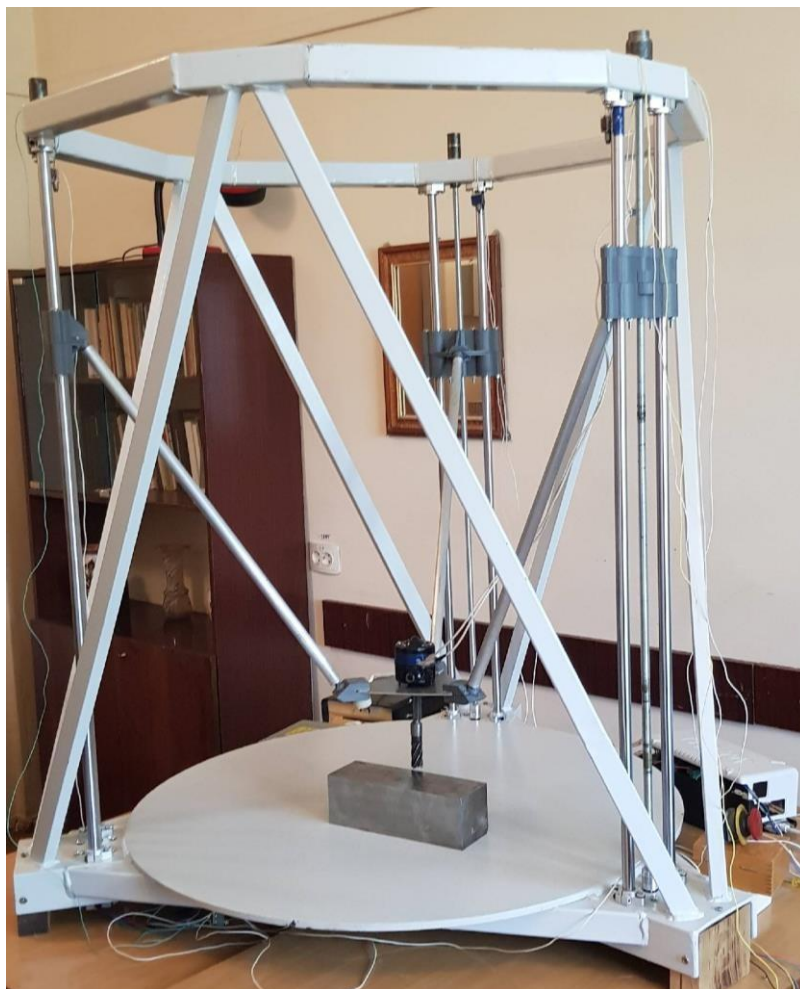
Ходовий гвинт загвинчується в направляючу каретку й закріплюється з кроковим двигуном через перехідну муфту (див. рис. 5.8, в).

Після монтажу направляючих кареток і ходового гвинта здійснено монтаж маніпуляторів. Маніпулятори з'єднані з направляючими каретками і виставляючи каретки на необхідну висоту маніпулятори з'єднані каретки з платформою (рис. 5.13).

Після складання конструкції дельта-машини виконане електронне оснащення комплектуючих і налагодження програмного забезпечення.

Для керування встановленими кроковими двигунами експериментальної дельта-машини використовується плата ЛПТ (рис. 5.14). Плата підключається до керуючого пристрою (ПК) із допомогою ЛПТ-порту. З її допомогою сигнали від керуючого пристрою передаються на драйвери крокових двигунів. У якості керуючого пристрою спеціально був зібраний ПК, і на нього встановлений пакет програм Mach3. Програма Mach3 спеціально

розроблена для керування багатоосьовими верстатами, оброблювальними центрами й т. д.



*Рисунок 5.13 – Експериментальний МПС за структурою «дельта»*

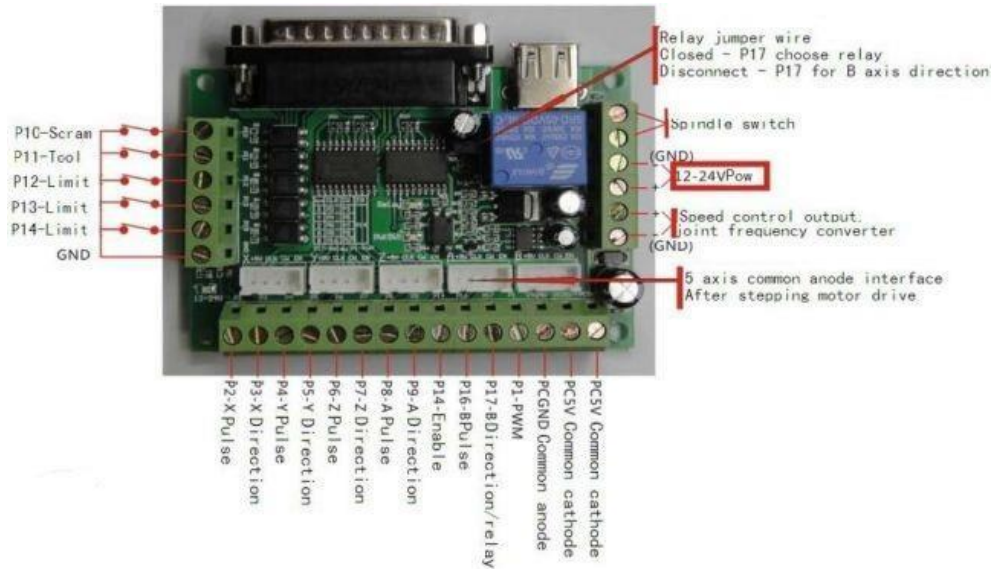


Рисунок 5.14 – Плата ЛПТ, схема підключення до портів плати

Електронна частина була розміщена у спеціально створеному боксі. Для захисту виходи за межі кареток, інструмента на раму дельта-машини встановлюються кінцеві датчики (рис. 5.15). Також вони використовуються для встановлення робочої зони програми. З їхньою допомогою програма робить налаштування координат робочого простору й встановлює нуль координат.



а



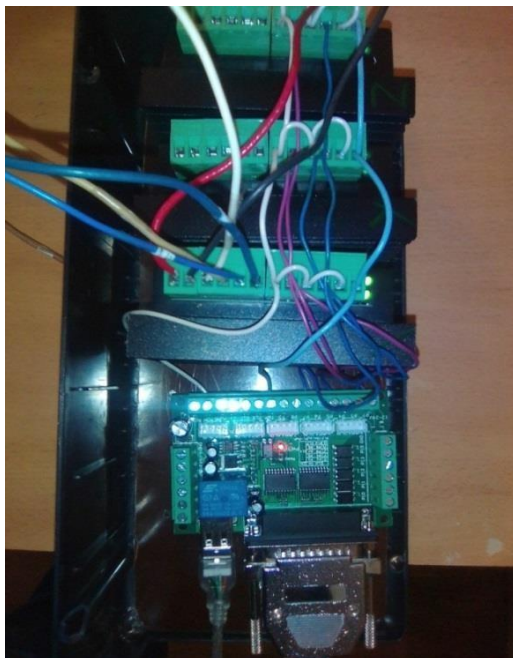
б

Рисунок 5.15 – Складові датчики дельта машини: а – драйвери крокових двигунів; б – кінцевий датчик

Кінцеві датчики також підключаються через плату ЛПТ.

На рис. 5.16 показаний монтаж драйверів для керування дельта-машиною. Сама плата ЛПТ живиться через кабель USB від ПК. Самі дви-

гуни живляться від блоку живлення, підключеного до драйверів крокових двигунів. Для зручності підключення проводів використовуються порти на 20 пінів.



*Рисунок 5.16 – Монтаж драйверів експериментального зразка*

Процес проектування й складання був проведений у конструкції мобільного верстата-робота, створеного в Проблемній лабораторії мобільних інтелектуальних технологічних машин Донбаської державної машинобудівної академії і Інституту проблем штучного інтелекту НАНУ. Складена експериментальна дельта-машина дозволила показати на практиці всі можливості подібних машин. Також це надало можливість проведення подальших експериментів для покращення й модернізації дельта-машин з елементами триглайда.

Мотор-шпиндель, або інакше званий електрошпиндель – це шпиндель, що має поєднану конструкцію вала й двигуна. Поєднаний із валом електродвигун історично вперше з'явився на внутрішньошліфувальних і свердлильних верстатах, де потрібні великі обороти при малих діаметрах інструмента.

Мотор-шпиндель являє собою корпус зі статором, усередину якого поміщений вал із пакетом ротора. На передній і задній частині вала встановлюються високошвидкісні радіально-упорні підшипники, для забезпечення жорсткості й точності, а також для прийняття осьових навантажень.

У електрошпинделях створюють преднатяг підшипників для збільшення жорсткості. Найчастіше передні підшипники являють собою дуплексні пари, іноді триплекси, у залежності від параметрів мотора й області його застосування, що впливає на величину й різноманітність навантажень, а оскільки більшу частину напруги сприймає саме передній підшипниковий вузол, його й підсилюють.

У торці, частіше із заводу стоять поодинокі кульково-радіальні підшипники під преднатягом пружин, за допомогою чого такий підшипник працює, як радіально-упорний і спроможний сприймати частини несильних осьових навантажень.

Узагалі мотор-шпинделі конструктивно схожі і, як правило, складаються з двох опор і власне електродвигуна (ротор і статор). Однак існує маса варіацій конструкції підшипникових вузлів, усе це залежить від призначення шпинделя.

Наприклад, швидкісні гравірувальні й внутрішньо шліфувальні мотор-шпинделі мають по одній опорі спереду й ззаду і преднатяг, заданий за допомогою пружин, а чисто фрезерні мотори, як правило, мають потужну передню опору за схемою DB, що сприймає всі навантаження, і дрібніший підшипник ззаду, що підтримує вал і сприймає частину радіального навантаження через важіль, утворений інструментом, опорою і валом.

Мотор-шпиндель підключається до частотного перетворювача, за допомогою якого асинхронний **двигун розкручує** до необхідної частоти і, відповідно, потрібних обертів вала.

Широке застосування мотор-шпинделів пов'язане саме з розвитком і здешевленням напівпровідникової перетворювальної техніки, до цього

моменту перетворювачі могли займати цілу шафу й мати вагу в десятки кілограмів.

Мотор-шпинделі бувають двох видів – з автоматичною і ручною зміною інструмента. Відмінності в цих двох видів електрошпинделів виражаються в особливостях їхньої конструкції.

Мотор-шпинделі з автоматичною зміною інструмента конструктивно являють собою корпус асинхронного електродвигуна з валом і пакетом ротора, а також усередині самого вала розташовується механізм захоплення інструментальної оправки.

У якості затискного елемента можуть виступати металеві кульки або ж металеві пелюстки.

Мотор-шпинделі з ручною зміною інструмента конструктивно легші, ніж з автозаміною. Для шпинделів із ручною зміною існує цілий ряд стандартів приєднання інструмента.

Наприклад, на фрезерних дуже популярний внутрішній конус **8 градусів** стандарту ER, є й інші варіанти внутрішнього конуса. На шліфувальниках поширене просте циліндричне кріплення з нарізним хвостовиком, на шліфувальних моторах з інструментами великого діаметра (диски) поширений зовнішній конус 1:5 або 1:10, оскільки в подібних електрошпинделях немає пружини, а замість самого захватного елемента виступає різь на валу, на яку накручується інструментальна гайка із цангою відповідного розміру.

Мотор-шпинделі мають 2 типи охолодження: рідинне (при рідинному охолодженні охолоджуюча рідина циркулює під тиском усередині корпусу по спеціально відведених каналах); повітряне (може бути реалізоване за допомогою охолоджуючого вентилятора на задній частині шпинделя або ж за допомогою повітряного потоку від пневматичної системи). Рідинне потрібне для ефективного відводу тепла з невеликого й високонавантаженого двигуна і там, де дуже багато агресивного пилу й бризок рідини.

Повітряне охолодження використовується там, де середовище не таке агресивне, наприклад деревообробка, до того ж це легше конструктивно і дешевше.

Такі мотор-шпинделі застосовуються при обробці різних типів матеріалів, починаючи від деревообробки та кольорових м'яких сплавів – і до обробки чорних металів.

Високошвидкісні електрошпинделі досить популярні в галузі деревообробки. З автоматичною зміною найчастіше встановлюються на деревообробних центрах, із ручною зміною – на верстатах, де обробка ведеться більшою частиною одним інструментом і не вимагає швидкої, постійної зміни.


Переваги мотор-шпинделів і їхні характеристики:

- Якість обробки поверхні, максимальна концентричність і висока динамічна жорсткість
- Короткий час прискорення й високі максимальні швидкості
- Компактна конструкція
- Гнучка адаптація до вимог користувачів **завдяки різним інструментам і заготовки системи затиску**
- Проста установка і введення в експлуатацію
- Проста установка з певними інтерфейсами для механіки, охолодження, електрики й гідравліки/пневматики.
- Підходить для використання з SINAMICS S120 і SIMODRIVE 611 приводними системами

Таблиця 5.1 – Мотор-шпинделі

???	Стандартний фрезерний шпиндель двигуна	Компактний фрезерний шпиндель двигуна	Мотор повороту шпинделів	Мотор повороту шпинделя для внутрішнього і круглого шліфування
-----	--	---------------------------------------	--------------------------	--



	синхронні й асинхронні версії	синхронні й асинхронні версії	асинхронні й синхронні версії	асинхронна версія
				
	2SP1 series	F series	D series	S series

Ім'я продукту	 Мотор-шпинделі 2СП120ES	 мотор-шпинделі 2SP125ECS
Стандартні функції		
Кожух	картридж із фланцевим кріпленням	картридж із фланцевим кріпленням
Позиція експлуатації	горизонтальна / вертикальна	горизонтальна / вертикальна
Інструментальна оправка	HSK A63	SK 40 для інструментів з асиметричними кільцями ущільнювачів
Пристрої для затиснення інструменту	- розчеплення за допомогою - пневматичного циліндра, 6 бар - зажим за допомогою блоку - чашоподібних пружин	- розчеплення за допомогою - пневматичного циліндра, 6 бар - зажим за допомогою блоку - чашоподібних пружин
Швидкість, макс.	15 000 об./хв	10 000 об./хв
Стандартний захист-контроль температури	- датчик температури двигуна КТУ 84-130 - РТС для повного термічного захисту - NTC РТ3-51F - NTC К227	- датчик температури двигуна КТУ 84-130 - РТС для повного термічного захисту - NTC РТ3-51F - NTC К227
Контроль стану затиснення	датчики (аналогові) - інструмент затиснутий зтяжний гвинт в позиції	- датчики (цифрові) - інструмент затиснутий

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- розчеплення</li> <li>- затиск без інструменту</li> <li>- датчики (цифрові)</li> <li>- позиція розчіплюючого клапана</li> </ul>	
--	---	--

Мотор-шпинделі серії ММ-140 призначені для фрезерування, свердління, розточування, шліфування деталей як із металевих, так і неметалевих матеріалів (рис. 5.17).

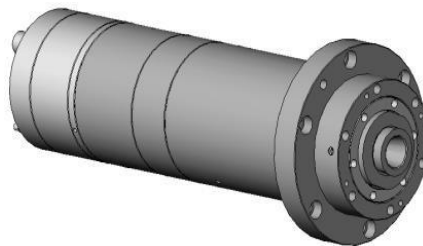


Рисунок 5.17 – Мотор-шпиндель серії ММ-140

Мастило підшипників залежно від типу мотор-шпинделя може бути пластичним або «масло-повітря». Пластичне мастило закладається в підшипники на весь термін їхньої служби.

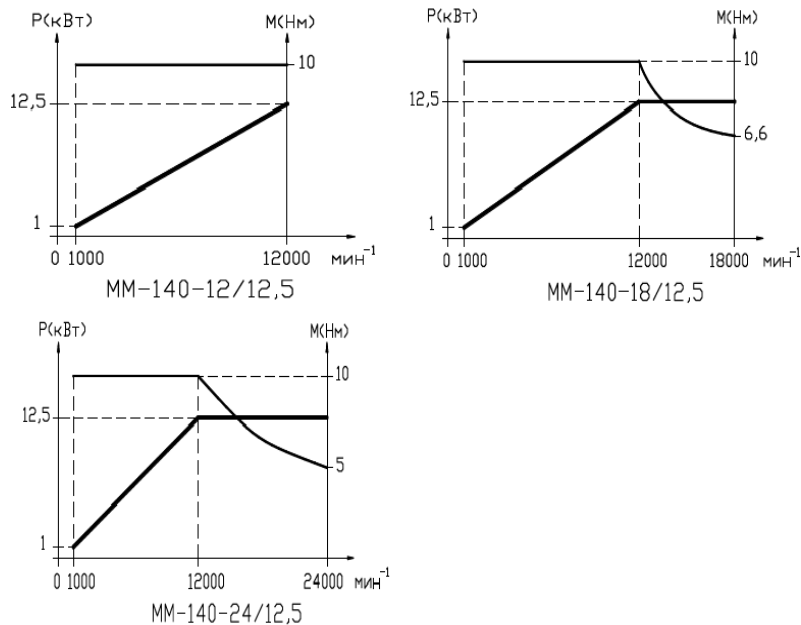
За спеціальним замовленням поставляються мотор-шпинделі з подачею МОР через вал.

Таблиця 5.2 – Технічні характеристики

Тип мотор-шпинделя	Ном. мощн., кВт*	Ном. момент, Нм*	Скорость вращения, мин <sup>-1</sup>	Ном. напряж., В	Частота питающего тока, Гц
ММ-140-12/12,5	12,5	10	1000÷12000	3×380	33÷400
ММ-140-18/12,5	12,5	10	1000÷18000	3×380	33÷600
ММ-140-24/12,5	12,5	10	1000÷24000	3×380	33÷800

\* – Номинальные мощность и момент приведены для режима S6 60% ГОСТ 183-66.

Тип мотор-шпинделя	Конус вала шпинделя	Смазка подшипников	Статическая жесткость, Н/мм <sup>3</sup>	
			Радиальная	Осевая
ММ-140-12/12,5	Конус 30, Конус 40	консистентная	140	90
ММ-140-18/12,5	Конус 30/HSK-F63	консистентная	140	90
ММ-140-24/12,5	HSK-F63	масло-воздух	140	90



**Рисунок 5.18** – Графіки потужності й моменту ММ-140

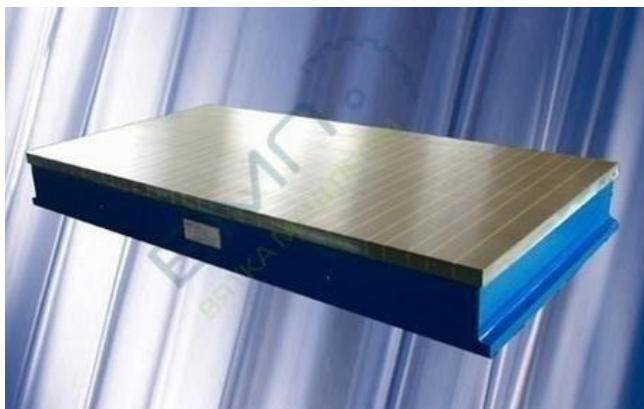
Таким чином визначені основні переваги мотор-шпинделів для використання в інтелектуальних технологічних машинах із МПС:

- Компактний шпиндель і «все включено» у стійку шпинделя
- Менша кількість компонентів у порівнянні з рішенням на базі ре-мінних приводів, завдяки вбудованим двигунам
- Вбудована сенсорна система для індексування та моніторингу при змінах у верстаті
- Група приводів із високим ступенем жорсткості
- Високий момент і швидкість, а, отже, і висока продуктивність завдяки високій ефективності різання й скороченню непродуктивного часу

– Більш висока швидкість і короткий час запуску в порівнянні з традиційними шпинделями з ремінним приводом

– Економічний механізм розтискування інструменту або як опція – швидкодіючий гідравлічний механізм розтискування інструменту

Електромагнітна плита X91 500x1000 – пристосування для швидкого й точного закріплення заготовок і деталей із феромагнітними властивостями на робочому столі (рис. 5.19). Дозволяє обходитися без тисів, кулачків та інших спеціальних притискних пристроїв. Деталь можна обробляти в горизонтальній і вертикальній площинах. Застосовується при виконанні операцій шліфування, фрезерування, гравірування. Можлива експлуатація при проведенні зварювальних робіт, у процесі розмічування заготовки, у інших варіантах використання



*Рисунок 5.19 – Плита електромагнітна плоска X91 500x1000*

Оснастити свої верстати плитою на електромагнітах вигідно великим і середнім підприємствам, що випускають масову продукцію. Із застосуванням плити істотно підвищується продуктивність праці за рахунок скорочення часу на фіксацію заготовки. У майстернях і цехах плита X91 реально знижує фізичні навантаження, полегшує роботу.

*Конструкція та особливості.* Плита X91 – це жорстка коробчата конструкція з імплантованими всередину електромагнітами постійного струму. Оптимально розставлені котушки електромагнітів створюють на поверхні плити рівномірно розподілене магнітне поле. У результаті на-

дійно встановити заготовку можна в будь-якій зручній для обробки точці плити або поставити кілька заготовок. Вологозахищеність конструкції досягається завдяки залитій усередину плити бітумній суміші. У нижній частині корпусу є виступи-полки для кріплення.

Використання електромагнітів має ряд можливостей, недоступних плитам із постійними магнітами:

- включення плити в ланцюжок автоматизованого або дистанційного керування;

- регулювання сили тяжіння:

- установлення додаткового блоку розмагнічування деталі після відключення живлення плити.

Відновлення горизонтальності настановної поверхні виконується шліфуванням. Завдяки багаторічній експлуатаційній надійності плита X91 відмінно зарекомендувала себе.

Для того щоб вибрати найбільш відповідний тип інструменту, необхідно дотримуватися наступних критеріїв:

- Обсяг робіт і їхня різноманітність

- Якість необхідної обробки (первинна або вторинна обробка)

- Якість металу (м'якість, товщина)

- Геометрична форма поверхні (отвори, пази, плоска плита)

- Задана точність розмірів

У процесі фрезерування в контакт з заготовкою, як правило, знаходиться кілька зубів, що знімають стружку змінної товщини. При цьому завдяки великій сумарно активній довжині різальних крайок забезпечується висока продуктивність процесу фрезерування. Підвищенню продуктивності також сприяє висока швидкість фрезерування, яка досягається за рахунок періодичного виходу зубів із зони різання, що забезпечує охолодження й зняття теплової напруженості в різальному клині.

Установка фрез здійснюється різними способами, однак у сучасному автоматичному виробництві існує ряд проблем, пов'язаних із визначенням

точного положення різальної кромки інструменту, після його зносу або переточки. Розглянуто варіанти установки інструменту, виділені основні принципи та властивості пристосувань для проєктування нової принципової схеми швидкозмінного інструментального блоку для верстата з МПС в умовах автоматичного виробництва.

Оскільки установка інструменту на верстатах із МПС має деякі особливості за умов безлюдного виробництва, то верстатне пристосування повинно відповідати таким критеріям (розташуємо їх за значимістю зверху вниз):

- габаритні розміри не повинні перевищувати  $280 \times 200 \times 200$  мм;
- забезпечувати точність установки 0,005 мм;
- надійно фіксувати інструмент під час обробки;
- мати можливість позиціонувати інструмент в осьовому напрямку;
- установка й закріплення інструмента має здійснюватися без участі людини;
- пристосування повинне бути збалансовано;
- пристосування повинне мати просте виготовлення;
- для виготовлення пристосування повинне бути витрачено мінімум ресурсів.

Для вибору конструкції верстатного пристосування для октопода були розглянуті різноманітні поєднання варіантів закріплення, базування інструмента й ступінь автоматизації пристосування.

Циліндрична поверхня є найбільш простим способом установки – безпосередня установка фрези на шпинделі із затискуванням її гайкою. Напрямок різі повинен бути протилежним напрямку обертання шпинделя. Цей спосіб найбільш простий у виготовленні, має високу надійність і точність. Але застосовується переважно для ручного способу установки інструмента. Також можна встановлювати фрези безпосередньо на шпиндель, при наявності конусного отвору або в тому випадку, коли вихідний вал має конічну поверхню. Відмінністю від першого способу є не тільки

різні базові поверхні. При посадці на конус немає необхідності в накидній гайці, проте необхідний пристрій для розкріплення інструмента. Використання криволінійної поверхні не так широко розповсюджене, тому що необхідний спеціальний інструмент і верстатне пристосування, однак надійно передає крутний момент.

Закріплення інструменту за допомогою штифта забезпечує більшу точність, а надійність кріплення буде залежати від розмірів і кількості штифтів. Безпосередня установка торцевої насадної фрези на шпindelю показана за допомогою гвинта або гайки – досить надійний спосіб кріплення, тому що надійність залежить від надійності затягування гайки, а також простий у виготовленні й установці інструменту, однак загвинчування гвинта або гайки здійснюється, найчастіше, робочим. Цанга використовується досить широко для закріплення осьового інструменту, оскільки має більшу точність позиціонування, можливість регулювання положення інструменту в пристосуванні в осьовому напрямку. Також із пристосуваннями такого типу досить просто використовувати механізовані приводи, що забезпечує високу швидкість закріплення й розкріплення інструмента, а в автоматичному виробництві скоротити кількість обслуговуючого персоналу до мінімуму. Байонетне закріплення дозволяє досить швидко виконувати закріплення й розкріплення інструмента. Має високу надійність і простоту виготовлення. Зазвичай установку здійснює робітник за допомогою ключа. Застосування відцентрової сили для закріплення інструмента використовується не так часто, однак при невеликих силах різання й великих оборотах надійно закріплює заготовку. Останній спосіб полягає в застосуванні гідропластових патронів. При тиску гвинта на гідропластмасу тонкостінна втулка рівномірно деформується, при цьому центруючий діаметр втулки збільшується. Спосіб простий у використанні, але має малу надійність [3].

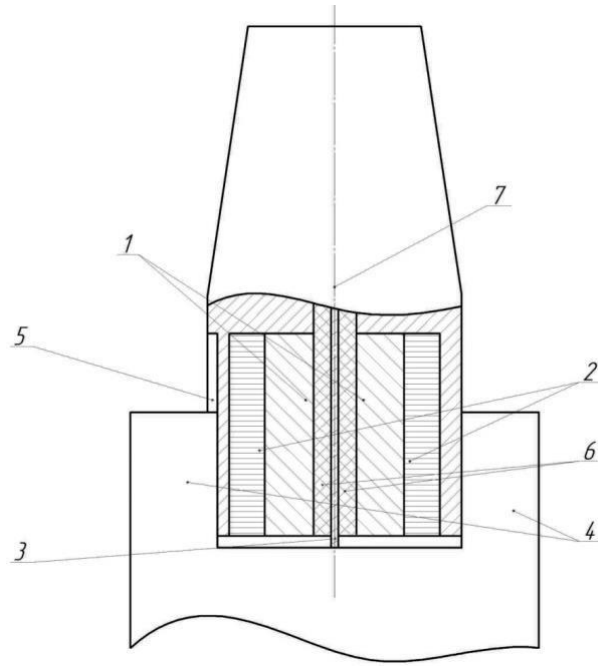
*Ручне закріплення* широко використовують на виробництві в одиночному й дрібносерійному виробництві, оскільки такі пристосування най-

простіші у виготовленні й експлуатації, при цьому закріплення здійснюється за допомогою м'язової сили робітника. Рівень механізації та автоматизації нульовий. *Механічне закріплення* відбувається з різного роду впливу людини. Рівень автоматизації і механізації може бути як великим, так і невисоким. Досить часто використовується в машинобудуванні. *Автоматизоване закріплення* здійснюється з невеликою участю людини, рівень механізації і автоматизації високий. *Автоматичне закріплення* здійснюється без участі людини, рівень механізації і автоматизації високий. Механізація здійснюється завдяки застосуванню гідро-, пневмо-, електроприводів, пружин.

Для комплексного аналізу був використаний принцип морфологічного ящика, варіанти поєднання закріплення, базування інструмента й ступеня автоматизації пристосування представлені в тривимірному просторі **3 4 6**. Обрана оптимальна конструкція інструментального модуля за результатами морфологічного аналізу та експертної оцінки. Найбільшу оцінку отримали автоматичні пристосування із циліндричною або фасонною базовою поверхнею, із гвинтовим або магнітним способом закріплення.

Пристрій працює наступним чином (рис. 5.20): при торканні інструментом поверхні інструментального магазину замикається електричний ланцюг, у який входять: струмопровідний стрижень 3, блок автоматики, інструмент 4, корпус інструментального магазину. Критичний блок автоматики подає електричний струм, який надходить на обмотку соленоїда 2, яка повністю концентрує весь створюваний нею магнітний потік, обсяг індукованого нею поперечного насиченого шару визначається тільки її габаритами, які можна варіювати в широких межах.





*1 – постійні магніти; 2 – обмотка соленоїда; 3 – ізольований контакт;  
4 – інструмент; 5 – шлицеве з'єднання; 6 – неметалічна пластина;  
7 – конічна поверхня*

*Рисунок 5.20 – Конструкція швидкозмінного інструментального вузла*

Корпус виконує роль охоплюваного сердечника. Інструмент 4 під дією сили тяжіння вільно зісковзує в осередок інструментального магазину. Верстат переходить у позицію завантаження наступного інструменту.

**При торканні струмопровідних стрижнем поверхні** інструменту знову замикається електричний ланцюг, критичний блок автоматики (на рисунку не показано) припиняє подачу електричного струму на обмотку соленоїда 2. Під дією магнітного потоку постійних магнітів 1 інструмент 4 надійно закріплюється в пристосуванні. Подача струму для розкріплення інструмента відновиться при наступному торканні блоком автоматики поверхні інструментального магазину для вивантаження інструменту. Таким чином, критичний блок автоматики послідовно при кожному наступному торканні припиняє і відновлює подачу електричного струму. Крутний момент передається завдяки шлицьовому з'єднанню 5 у корпусі 7.

Для автоматичних систем необхідно використовувати автоматичні швидкозмінні інструментальні блоки, які дозволили б автоматично змінювати технологічний і контрольний інструмент. Для оптимізації вибору конструкції ефективно використовувати морфологічний аналіз, спільно з експертною оцінкою. Надалі принципова схема інструментального блоку може бути модернізована й впроваджена у виробництво.

## 5.2 Оптимізація структури МПС на основі експертних оцінок

При вирішенні завдань проектування технічних, зокрема – технологічних систем, прояв інженерами необхідних компетенцій залежить від їхнього рівня знань та інженерного досвіду. Конкуренція на ринку машинобудівної продукції при створенні виробів і виробництв вимагає постійного оновлення й поліпшення значень критеріїв їхньої конкурентоспроможності. У цих умовах достовірні оцінки й прогнозування інноваційних технічних і технологічних рішень набувають особливого значення для нової галузі інженерної діяльності – інноватики [261].

Більшість інноваційних технічних рішень використовують методи й алгоритми функціонально-вартісного аналізу, експертних оцінок, морфологічних таблиць, генетичного прогнозування як засобів досягнення бажаного результату [207, 208, 269, 291]. Ці методи засновані на статистичному моделюванні предметної області й репрезентативних оцінках прецедентів, що залежать від неявно існуючих структурних зв'язків умовних «входів» і «виходів» моделей об'єктів.

Нехай  $j$ -й об'єкт ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) представлений безліччю  $i$  «входів» ( $i = 1, 2, \dots, n$ )  $\bar{X} \ni x_{11}, x_{21}, \dots, x_{12}, x_{22}, \dots, x_{ij} \dots x_{nm}$ , яким відповідає безліч експертних оцінок  $\bar{E} \ni e_1, e_2, \dots, e_j \dots e_m$ , тобто  $e_j \leftrightarrow \{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{nj}\}$ . Створена таблиця кортежів прецедентів і їхніх експертних оцінок (табл. 5.3).

Таблиця 5.3 – Вихідні дані для створення моделі експертних оцінок

№	$\bar{X}$						$\bar{E}$
1	$x_{11}$	$x_{21}$	...	$x_{i1}$	...	$x_{n1}$	$e_1$
2	$x_{12}$	$x_{22}$	...	$x_{i2}$	...	$x_{n2}$	$e_2$
...	...	...	...	...	...	...	...
j	$x_{1j}$	$x_{2j}$	...	$x_{ij}$	...	$x_{nj}$	$e_j$
...	...	...	...	...	...	...	...
m	$x_{1m}$	$x_{2m}$	...	$x_{im}$	...	$x_{nm}$	$e_m$

Інструментом створення моделі експертних оцінок є математична однорідна мережа на нейроподібних елементах. Особливістю такої моделі є здатність до багатовимірної апроксимації даних, представлених у табл.5.3. Причому, прагнення зменшити кількість нейроподібних елементів веде до втрати точності відтворення даних таблиці кортежів, але на межі максимально допустимої похибки моделі спостерігається максимальне «згладжування» сплайнів у  $n$ -вимірному просторі. Таким чином, може бути створена нейромережева модель будь-якого об'єкта, навіть при слабкій формалізації завдання його експертних оцінок.

Найбільш яскраво розкриваються можливості й переваги використання математичних моделей на базі однорідних мереж для розв'язання обернених задач в оптимізаційній постановці. Основною метою вирішення таких задач є пошук таких векторів  $\{x_{1opt}, x_{2opt}, \dots, x_{iopt}, \dots, x_{nopt}\}$ , при яких експертна оцінка  $e_{opt}$  досягає свого оптимального значення.

Математичний опис оптимізаційної постановки задачі можна представити в наступному вигляді.

Цільова функція

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = e_{opt} \rightarrow \max$$

при обмеженнях:

$$\begin{aligned}
& x_{1 \min} \leq x_1 \leq x_{1 \max} , \\
& x_{2 \min} \leq x_2 \leq x_{2 \max} , \\
& \dots \quad \dots \quad \dots , \\
& x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max} , \\
& \dots \quad \dots \quad \dots , \\
& x_{n \min} \leq x_n \leq x_{n \max} .
\end{aligned}
\tag{5.1}$$

Приведена система обмежень (5.1) може бути представлена в більш жорсткому вигляді, проте за суттю своєю постановка оптимізаційної задачі не змінюється.

Викладений підхід був реалізований для оцінок структури інноваційного технологічного устаткування для механоскладального виробництва верстатів-роботів із механізмами паралельної структури. У якості вихідної інформації про об'єкт прийнята фасетна класифікація структур механізмів паралельної структури (МПС).

Фасетний метод класифікації стосовно верстатів-роботів дає можливість описати безліч можливих рішень для аналізу й вибору їхньої структури. Тоді безліч вихідних даних представляється у вигляді

$$x_{11}, x_{21}, \dots, x_{12}, x_{22}, \dots, x_{ij} \dots x_{nm},$$

де  $i$  – порядковий номер елемента структури МПС;

$j$  – порядковий номер варіанта-прецеденту МПС, який оцінюється експертною оцінкою  $e_j$ .

Для забезпечення достовірності експертних оцінок, використаних для створення моделі, яка б дозволила обґрунтувати оптимальну структуру МПС на безлічі задаються обмежень, була проведена оцінка достовірності розподілів експертних оцінок по кожному з прецедентів шляхом ранжирування показників і з використанням вербально-числової шкали Харрінгтона [297].

Результати цієї оцінки показали якісний збіг з рівнями значущості елементів структури МПС на безлічі прецедентів, підданих експертними оцінками. Це дозволило зробити висновок про можливість використання створеної моделі експертних оцінок структур МПС для оптимізації їх структури, яка полягала в тому, щоб знайти таке поєднання складових фазетного опису, яке б могло сформулювати максимальну оцінку  $e_j$ .

### **5.3 Дослідження похибки гвинтової передачі експериментального верстата-робота**

Точність переміщення кареток уздовж напрямних прямо впливає на точність позиціонування платформи з робочим органом дельта-верстата. На точність виготовлення деталі впливає похибка, утворена передачею гвинт-гайка яка використовується для переміщення кареток.

Область застосування передач гвинт-гайка досить обширна – від точних вимірювальних приладів (механізми ділильних пристроїв) до важконавантажених натискних пристроїв прокатних станів. Гвинтові передачі використовуються у гвинтових домкратах і пресах, знімачах, різного типу стяжках, натяжних і притискних пристосуваннях, затискних пристроях, механізмах подачі верстатів і т. п.

Передача гвинт-гайка в основному призначена для перетворення обертального руху в поступальний. Для перетворення поступального руху в обертальний силові передачі практично не використовується через низький ККД.

За схемою виконання та конструктивними рішеннями передачі гвинт-гайка вельми різноманітні. У переважній більшості конструкцій гайка нерухома, а гвинт здійснює обертальний і поступальний рух, але зустрічаються гвинтові передачі, у яких обертається гайка, а гвинт робить лише

поступальний рух (деякі домкрати й притискачі, механізми зміни вильоту кранів та ін.). Перевагами передачі гвинт-гайка є: можливість отримання повільного поступального руху при відносно великих частотах обертання; значний вигреш у силі; висока точність переміщення; простота конструкції; малі габарити; можливість забезпечення гальмування. До недоліків передачі ковзання відносяться великі втрати на тертя і, відповідно, порівняно низький ККД. Передачі кочення не мають цього недоліку, але їхня конструкція складніша, а вартість вища.

Для позиціонування платформи робочого органа дельта-машини дуже важливо вибрати високу точність передачі.

Оскільки точність переміщення кареток уздовж напрямних залежить від похибки передачі гвинт-гайка, необхідно дослідити залежність зміни похибки положення каретки на ходовому гвинті при використанні двох гайок із різними міжгайковими відстанями.

При проєктуванні дельта-машин відносно великих розмірів для обробки, складання деталей можуть використовуватися дві гайки для переміщення кареток. Дослідження необхідно провести з різними міжгайковими відстанями, щоб зрозуміти, при яких міжгайкових відстанях похибка буде мінімальною. Після проведення дослідження буде можливо ще на стадії проєктування дельта-машини звести ці похибки до мінімуму лише за допомогою правильно розробленої конструкції. Похибки, що залишаться, можна буде довести майже до нуля з допомогою програмного забезпечення дельта-машини.

Методика проведення експерименту [202]:

1. Визначення й вибір розміру робочої поверхні гвинта.
2. Визначення й вибір міжгайкової відстані з урахуванням мінімального й максимального розміру проєктованої каретки.
3. Прогін гайок без навантаження (у вільному закріпленні) на обраних міжгайкових відстанях по робочій поверхні.

4. Прогін гайок із заданим закріпленням (закріплення аналогічне закріпленню в проєктованій) каретки на обраних міжгайкових відстанях по робочій поверхні.

5. Прогін гайок із заданим закріпленням і під навантаженням пружини (закріплення аналогічне закріпленню в проєктованій, пружина діє на розтяг) каретки на обраних міжгайкових відстанях по робочій поверхні.

6. Отримання й обробка отриманих результатів дослідження.

Проведення експерименту:

1. Розмір гвинта дорівнює 1000 мм, робочою зоною переміщення з урахуванням мінімального можливого переміщення направляючих кареток 100 мм, а максимально можливе переміщення 950 мм.

2. З урахуванням робочої ходової зони кареток на гвинті були обрані: максимально допустимий міжгайковий розмір на гвинт із робочою ходовою зоною від 100 до 950 мм 70,10 мм, мінімальний допустимий розмір 35,06, також були обрані середні відповідні розміри 45,16, 57 для більш докладного отримання даних.

Отримані результати наведені в графічному вигляді (рис. 5.21).

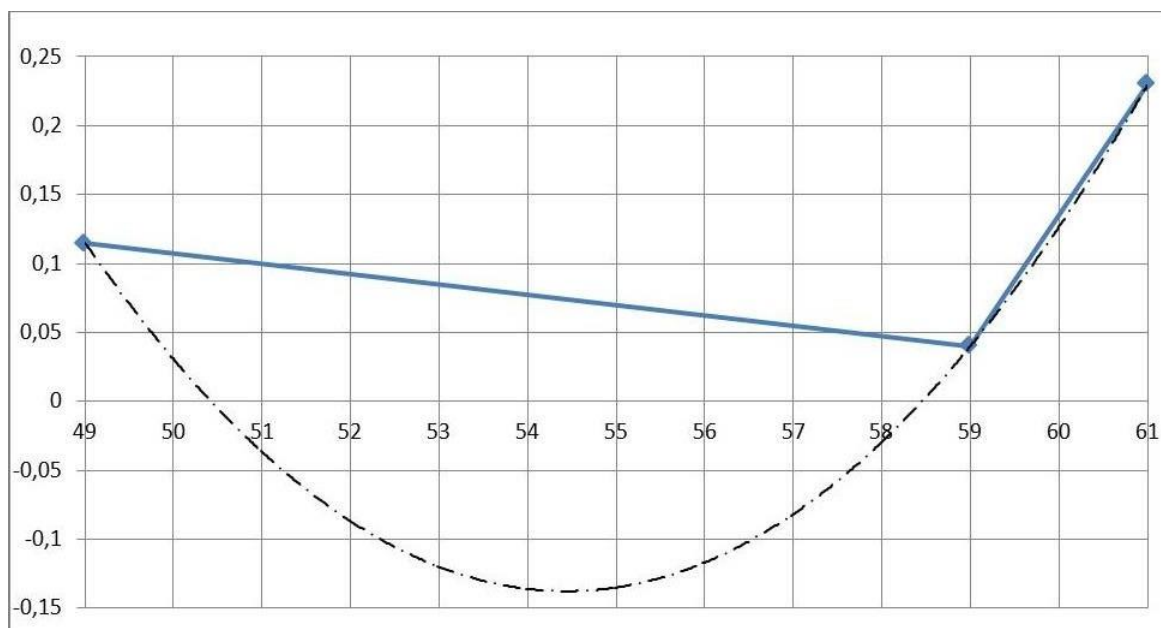


Рисунок 5.21 – Графік оброблених даних

За можна вибирати оптимальні міжгайкові відстані, при яких похибка переміщення буде мінімальною (59 мм). Надалі дельта-машини виконуватимуться різних типорозмірів, для обробки великих деталей будуть необхідні великі дельта-машини, у яких ходові гвинти можуть досягати більше 3000 мм довжини. При таких габаритах при неправильному виборі міжгайкової відстані в каретках можуть з'являтися великі похибки при переміщенні. За допомогою цієї методики можна досягти мінімальних похибок при проектуванні ходових кареток дельта-верстата. Також можливо, ураховуючі отримані похибки, вносити в еталону модель керуючої програми дельта-машини. Ураховуючи ці дані, можна побудувати еталону модель і звести похибки верстата до нуля.

#### 5.4 Випробування виготовлення експериментальних зразків

Планом експериментів передбачалося дослідження залежності між параметрами спектра акустичного сигналу із заданою дискретністю, порушеною збудженим впливом у вигляді «білого шуму». Висунуто припущення про можливість діагностики характеристик досліджуваних об'єктів, інваріантної стосовно похибок, що вносяться апаратною частиною системи діагностики.

Кожне вимірювання мало максимально можливий захист від випадкових флуктуацій сигналу. Це досягалося тим, що при кожній реалізації елементів плану експерименту вимірювання усереднюють у циклі зі 100 послідовних сканувань спектра з дискретністю спектра в 178,3 від 0 до 20 000 Гц. Повнофакторний експеримент із рандомізацією сполучень факторів дозволив сформувати базу даних, де факторами були координати позиціонування виконавчого механізму експериментального стенду  $(X_i, Y_i, Z_i)$ . Приклад фрагмента такої бази для експериментальних позицій представлений у табл. 5.4.



Таблиця 5.4 – Амплітуди акустичного спектру по його дискретний

№	Входи: координати позиціонування, мм			Виходи: амплітуди акустичного спектру, дБ, по його дискретний, Гц					
	X, мм	Y, мм	Z, мм	172,3	344,6	516,9	...	21882,1	22054,4
1	-52	-30	5	-29,9	-29,76	-46,87	...	-73,68	-81,32
2	52	-30	5	-32,3	-31,94	-46,98	...	-75,34	-83,49
3	0	-60	5	-34,49	-33,72	-45,56	...	-75,61	-83,99
4	0	0	5	-36,68	-36,11	-48,39	...	-76,12	-84,93
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
n-3	-52	-30	250	-54,24	-48,78	-49,53	...	-75,75	-83,77
n-2	52	-30	250	-53,57	-48,33	-48,57	...	-76,55	-84,44
n-1	0	-60	250	-55,13	-48,41	-48,71	...	-76,27	-84,16
n	0	0	250	-54,31	-49,35	-50,21	...	-75,86	-84,02

Приклад акустичного спектру діагностичного сигналу ідентифікації позиціонування виконавчого механізму експериментального стенду представлений на рис. 5.22.

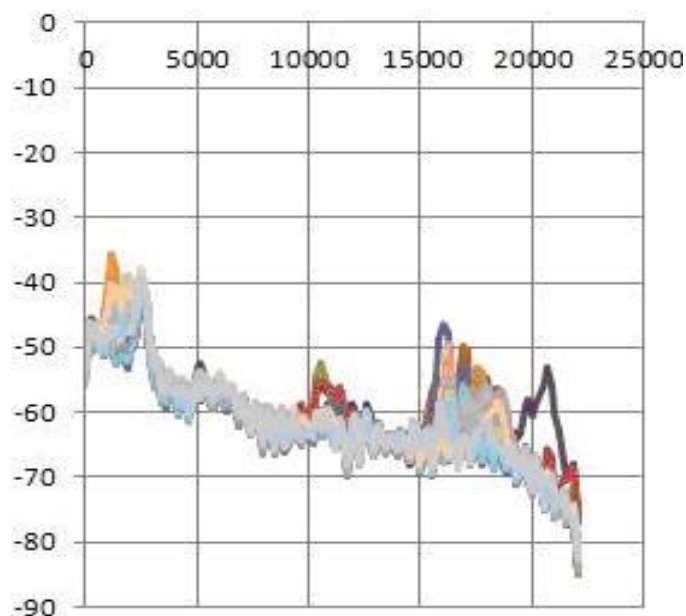


Рисунок 5.22 – Спектри акустичних сигналів для координат позиціонування виконавчого механізму експериментального стенду

За створеною експериментальною базою були побудовані нейромережеві моделі діагностики:

- конфігурації механізму;
- геометричних параметрів механізму при працюючому мотор-шпинделі;
- динаміки переміщення вузлів механізму експериментального стенду зі змінною швидкістю й навантаженням на привід;
- зміни температури об'єкта.

## **5.5 Засоби автоматизації діагностики технологічних систем і процесів**

Мета автоматизації діагностики на основі АЧХ об'єкту полягає в підвищенні якості управління процесами руху й активного контролю стану об'єкту, підвищенні продуктивності, достовірності й зниженні вартості контролю.

Основні завдання автоматизації діагностики:

- створення автоматичних засобів сканування, подачі й сортування об'єкта діагностики;
- розробка методів і засобів автоматичного керування процесами діагностики, включаючи процеси обробки одержуваної інформації та прийняття рішень про стан об'єкту;
- розробка систем впливу на механічні процеси виробництва продукції за результатами діагностики.

Для вирішення зазначених завдань автоматизації діагностики застосовують комп'ютери різного ступеня складності й різної обчислювальної потужності, яка визначається швидкодією і об'ємом оперативної пам'яті.

За допомогою персональних комп'ютерів для діагностики створюються інтелектуальні прилади, які виконують певну частину функцій оператора з вибору режиму контролю, налаштування, калібрування, оброблювання отриманої інформації (рис. 5.23).



Рисунок 5.23 – Структурна схема контролера на основі мікрокомп'ютера

Запропоновано розробку інтелектуальних приладів діагностики на основі застосування спеціалізованих процесорів, що включають нормований генератор «білого шуму», широкосмуговий ЦАП-АЦП (цифро-аналоговий перетворювач – аналого-цифровий перетворювач), систему випромінювачів і датчиків, візуалізаційні пристрої.

Комп'ютеризовані засоби діагностики різноманітні й визначаються конкретним видом застосовуваного обладнання, методом обробки інформації, призначення та умов застосування засобів діагностики та іншими факторами.

Загальні елементи структури інтелектуальних приладів НК наведені на рис. 5.24.

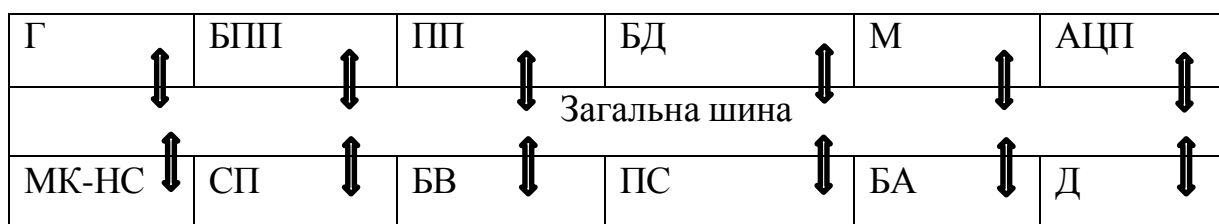


Рисунок 5.24 – Структура інтелектуальних приладів НК

Генератор (Г), блок первинних перетворювачів (БПП), багатоканальний попередній підсилювач (ПП), блок детекторів (БД) (може не бути) і мультиплексор (М) утворюють аналогову частину приладу. З виходу (АЦП) інформація надходить на загальну шину, яка пов'язує між собою мікрокомп'ютер з емулятором нейронної мережі (МК–НС), спеціалізований

процесор (СП) (може не бути), блок виведення інформації (БВ), датчики (Д), блок автоматики (БА) і пристрій сканування (ПС). МК має один або кілька каналів послідовного обміну інформацією для зв'язку із зовнішніми пристроями. Команди МК установлюють амплітуду. Частоту й форму кривої напруги генератора, коефіцієнта посилення підсилювача, вибирають первинний перетворювач або їх групу. Спеціалізований процесор зазвичай виконує перетворення Фур'є або інші, що вимагають великого обсягу обчислень функції.

Сигнали управління через загальну шину надходять на скануючий пристрій, який забезпечує «огляд» об'єкта контролю первинним перетворювачем. Щоб за командами мікрокомп'ютера управляти генератором, підсилювачем та іншими аналоговими блоками, необхідно виконати їх програмно-керованими.

Схема програмно-керованого генератора, або синтезатора частоти, представлена на рис. 5.25. Генератор працює у два цикли: у першому циклі в ОЗУ записується, що вводиться від МК дані про амплітуду і тимчасове положення елементарних імпульсів – одиночних прямокутних імпульсів. У другому циклі відбувається послідовне зчитування даних, записаних в ОЗУ. У ЦАП кодові комбінації перетворюються в поступово змінюється напруга, апроксимує задану форму кривої. За допомогою фільтра нижніх частот (Ф) ступінчаста крива перетвориться на гладку. На виході підсилювача потужності (ПП) отримують напругу необхідної форми, наприклад для збудження вихорострумових первинних перетворювачів.

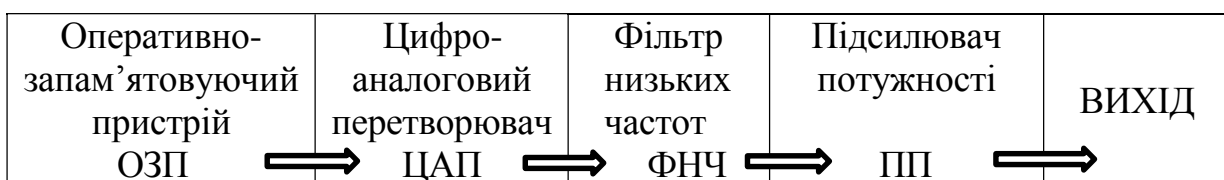


Рисунок 5.25 – Схема програмно-керованого генератора

Деякі поняття теорії надійності, які мають безпосереднє відношення до автоматизованих засобів контролю (АЗК).

Оскільки під об'єктом розуміються системи та їхні елементи, що підлягають вивченню (дослідженню), вважаємо, що об'єкт знаходиться у двох взаємовиключних станах: працездатності та відмови.

Працездатність – стан об'єкта, при якому він здатний виконувати задані функції, зберігаючи значення заданих параметрів у межах, установлених нормативно-технічною документацією. Відповідно, під *відмовою* розуміють порушення працездатності об'єкта. У певному сенсі це поняття умовне й має бути тісно пов'язане з особливостями побудови й функціонування досліджуваного об'єкта.

Положення теорії надійності про те, що надійність закладається при проектуванні, забезпечується у виробництві й підтримується в експлуатації, повністю відноситься й до систем автоматичного управління (САУ). На практиці застосовують різні методи підвищення надійності – створення надійних елементів, забезпечення сприятливого режиму їхньої експлуатації, резервування окремих вузлів і підсистем, створення схем з обмеженими наслідками відмов та ін.

Один з ефективних напрямків підвищення надійності САУ пов'язаний із розробкою і застосуванням спеціальних пристроїв і засобів контролю, що забезпечують можливість виявлення й усунення відмов і викликаних ними несприятливих наслідків, як на етапі виготовлення, так і в процесі експлуатації апаратури.

Під контролем далі будемо розуміти сукупність деяких вимірювальних, обчислювальних і логічних операцій, за результатами виконання яких можна судити про фактичний стан контрольованого об'єкта і, відповідно, вживати необхідних заходів з управління. Найбільш повно функції контролю реалізуються за допомогою АЗК, до постійних переваг якої слід віднести можливість охоплення контролем практично будь-якої кількості вузлів і пристроїв, розширення складу контрольно-вимірювальних операцій, високу швидкодію, підвищення точності й т. п. Ототожнюючи мету конт-

ролю з кінцевими результатами, на досягнення яких спрямоване застосування АЗК, можна сформулювати їх наступним чином:

1. Для відновлюваних об'єктів основними цілями автоматичного контролю є:

- об'єктивна перевірка відповідності характеристик об'єкта пропонованим вимогам;
- зменшення часу відновлення об'єкта за рахунок зниження питомої ваги часу на виявлення та індикацію елемента, що відмовив;
- підвищення ремонтпридатності за рахунок більш раціонального вибору структури об'єкта і, зокрема, шляхом оптимального розчленування його на відновлювані елементи, відмова яких фіксується за допомогою АЗК;
- зниження загальних витрат на контроль і відновлення, скорочення чисельності обслуговуючого персоналу з одночасним зниженням вимог до його кваліфікації.

2. У тому випадку, коли пряме відновлення об'єкта неприпустиме (повна відмова вузла або пристрою), обслуговування елемента, що відмовив, зводиться лише до його простої заміни. У цьому випадку застосування АЗК забезпечує виконання наступних цілей:

- перевірку правильності виконання об'єктом своїх основних функцій;
- своєчасне виявлення факту й місця відмови;
- прийняття ефективних рішень з управління об'єктом у разі виникнення відмови;
- прогнозування можливих відмов і вибір необхідних заходів щодо їхнього запобігання.

Аналізуючи склад і характер функцій, що реалізуються за допомогою АЗК, можна говорити про основні завдання автоматичного контролю.

Натепер до таких завдань прийнято відносити наступні:

- визначення технічного стану об'єкта контролю в поточний момент часу;
- визначення місця й причини виникнення відмови (завдання технічної діагностики);

– усунення несправностей (у загальному випадку – прийняття рішення про необхідність резервування, ремонту, регулювання та інших заходів з обслуговування об'єкта);

– визначення технічного стану об'єкта в майбутній момент часу (прогнозування відмов);

– накопичення й обробка статистичних даних про вплив умов експлуатації, конструкції і технології виробництва на технічні характеристики об'єкта.

З рис. 5.26 випливає, що отримання вихідної інформації про стан об'єкта контролю забезпечується за допомогою блоку вимірювальних пристроїв. Це датчики вхідних і вихідних сигналів об'єкта, а також вторинні вимірювальні перетворювачі, що здійснюють посилення й нормування сигналів, приведення їх до вигляду, зручнішого для подальшої обробки (безперервний сигнал або цифровий код), компенсацію похибок датчиків і попередню фільтрацію перешкод, обчислення ряду контрольованих параметрів.



Рисунок 5.26 – Узагальнена функціональна схема АСУ

В обчислювальному пристрої проводиться порівняння контрольованих параметрів з їх гранично допустимими значеннями (межами поля допуску), формування зазначених допусків відповідно до зміни зовнішніх умов і режимів роботи об'єкта, екстраполяції значень окремих параметрів, прийняття рішення про працездатність об'єкта в поточний або майбутній момент часу.

Блок формування зондувальних сигналів забезпечує подачу на входи об'єкта деякої сукупності управляючих дій, що визначають той чи інший характерний режим його роботи. Цей блок управляється за допомогою

блоку управління, який за командами з обчислювального пристрою вніс зміни виду рівня зондуючих сигналів, включення й підготовку до роботи контрольованого об'єкта, послідовне підключення вимірювачів до відповідних його виходів і т. д. За цими ж командами проводиться й управління роботою блоку виконавчих пристроїв, які виконують відновлювальні функції по відношенню до даного об'єкту. Інформація про фактичний стан об'єкта контролю, отримана за допомогою вимірювальних пристроїв і оброблена відповідно до певних алгоритмів в обчислювальному пристрої, надходить далі в блок відображення вихідної інформації, де вона перетворюється у форму, зручну для сприйняття її людиною (оператором) або реєстрації на відповідних кінцевих пристроях, що входять до складу АЗК. Оператор може впливати на роботу АЗК, сприяти прийняттю правильних рішень у складних і непередбачуваних ситуаціях, дозволяє оперативно змінювати програму контролю відповідно до обстановки.

У загальному вигляді можна користуватися класифікаційною схемою АЗК САУ (рис. 5.27).

Автоматизовані системи діагностики		
Спеціалізовані		Комплексні універсальні
Контролюючі	Діагностуючі	Прогнозуючі
Зовнішні (аналогові)		Внутрішні (вбудовані)
Аналогові	Аналого-цифрові	Цифрові

Рисунок 5.27 – Класифікація АЗК САУ

У залежності від ступеня універсальності й повноти контролю АЗК можна позділити:

– на спеціалізовані, які призначені для контролю працездатності невеликого числа найбільш відповідальних підсистем (вузлів), що входять до складу конкретної САУ;

– комплексні, які мають на меті охопити контролем максимальну кількість параметрів, які найбільш повно й об'єктивно характеризують технічний стан багатоконтурних САУ.



За характером вирішуваних завдань АЗК поділяються:

– на контролюючі, які дають однозначну відповідь тільки на питання про технічний стан об'єкта контролю в цілому;

– діагностують, які дозволяє конкретизувати стан відмови об'єкта досліджуваної САУ, звівши його до стану окремих елементів; установити причину виникнення відмови;

– системи прогнозуючого контролю, які призначені для оцінки майбутнього стану об'єкта на підставі тих тенденцій, які визначають його поведінку в минулому.

Розподіл АЗК за типом конструктивної реалізації:

– зовнішні, що реалізуються за допомогою самостійного зовнішнього обладнання, пов'язаного з встановленими на об'єкті датчиками контрольованих параметрів через відповідні лінії зв'язку;

– внутрішні, що є складовою частиною контрольованого об'єкта і, як правило, мають більш просту структуру, забезпечуючи оперативний контроль найбільш відповідальних функцій об'єкта безпосередньо в ході його експлуатації.

Розподіл АЗК за формою сигналів, за допомогою яких здійснюється передача, зберігання й обробка інформації:

– аналогові, які забезпечують більш високу швидкодію і надійність, малі маси й габаритні розміри; застосовуються у випадках, коли стан контрольованого об'єкта визначається невеликою кількістю параметрів, а контроль його параметрів зводиться до простого порівняння цих параметрів із межами поля допуску;

– цифрові, основу яких становить, як правило, обчислювальний пристрій із жорсткою структурою або спеціалізованою ЕОМ. Тут забезпечується висока точність і стабільність характеристик, практично необмежені можливості ЕОМ;

– аналого-цифрові, що складають проміжну групу, засновані, головним чином, на частковому поданні вхідної інформації і реалізуються на базі засобів як цифрової, так і аналогової техніки. Робочі сигнали – це комбінації з дискретних (цифрових) і аналогових величин. Переваги – простота, стійкість, можливість використання точних і надійних датчиків із приватним виходом для вимірювання багатьох фізичних величин.

## РОЗДІЛ 6

# РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЇ З ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕКОНФІГУРАЦІЇ НА БАЗІ МПС

### 6.1 Концепція реконфігурованого виробництва на базі мобільних інтелектуальних технологічних машин

Виробничі потужності, що створені на машинобудівних і переробних підприємствах, відрізняються значною різноманітністю – від універсального до високоавтоматизованого обладнання й автоматизованих комплексів із програмним керуванням (ЧПК).

Висока вартість **гнучких виробничих комплексів (ГВС)** – одна з головних причин для низького рівня прийняття або задоволення. На відміну від спеціалізованих систем, **машини ЧПК не проєктовані навколо частини**. Скоріше верстати з ЧПК загального призначення побудовані раніше, ніж виробник вибирає машини, і раніше, ніж планування процесу буде почато, щоб верстат і процес пристосувати до деталі. Гнучкі системи та машини створені з усіма можливими функціональними можливостями, бо виробник верстатів заздалегідь не знає область використання обробляючого центру, чим створює основні витрати, тим самим забезпечуючи загальне припущення, що ГВС спроможний виробити будь-який виріб (у межах заданого сімейства), у будь-якому поєднанні деталей і у будь-якій послідовності. Цей підхід збільшує вартість, тому що це вимагає паралельної системної структури для ГВС, що використовує потужні обробні центри загального призначення з дуже великим журналом інструментів і багаторазових наборів інструментів, що є дуже дорогим рішенням.

Удосконалення виробничо-технологічних систем є найважливішою складовою освоєння випуску нової продукції, здатної конкурувати на машинобудівному ринку тривалий період часу. Проблеми, пов'язані з вико-

ристанням обладнання, що сформувало ці виробничі потужності, представляються нам спільними й викликані тим, що традиційні технологічні системи обробки матеріалів наблизилися до своєї технологічної межі й практично повністю вичерпали свої ресурси й можливості для значного підвищення техніко-економічних показників.

До числа цих проблем належить забезпечення технологічної гнучкості устаткування в умовах багатомономенклатурних виробництв із широким діапазоном параметрів продукції, а одним із шляхів вирішення цієї проблеми є концепція основного обладнання, що реконфігурується [58, 293, 203, 18, 104]. Особливі перспективи поновлення верстатного парку механоскладальних цехів відкривають мобільні верстати-роботи на основі МПС [190].

Реконфігуруючі виробничі системи (РВС) – це новий виробничий підхід, що не тільки комбінує високу пропускну здатність спеціалізованих ліній із гнучкістю ГВС, але також може реагувати на зміни швидко й ефективно. Це досягнуто через дизайн системи і її машин, що пристосовує структури, які допускають системну масштабованість, у відповідь на запити ринку та системну адаптованість до нових продуктів. Структура може бути відкоригована на системному й машинному рівнях (зміна машинних апаратних засобів і програмного забезпечення керування; наприклад, додаючи шпинделі або змінний магазин інструментів) [203, 293].

Функціональні можливості й вартість визначають розходження між виробничими системами, що реконфігуруються, традиційними автоматичними лініями і ГВС. У той час як автоматичні лінії та ГВС установлені в повних функціональних можливостях, реконфігуруючі виробничі системи змінюють здатності та функціональні можливості протягом довгого часу, оскільки система реагує на ринкові обставини, що змінюються.

Таким чином, системи, що реконфігуруються, відрізняються від існуючих систем своєю здатністю до змін. Головною перевагою є можливість мати саме задану гнучкість під продукцію, що виготовляється.

Для виробників також дуже вигідним є і той факт, що при своїй здатності до гнучкості, РВС значно дешевші, ніж існуючі гнучкі системи. Це пов'язане з використанням більш дешевого обладнання.

Формування прогресивного способу механоскладального цеху вимагає конкретизації його особливостей аналогічно схемі запропонованих причинно-наслідкових зв'язків (рис. 6.1).

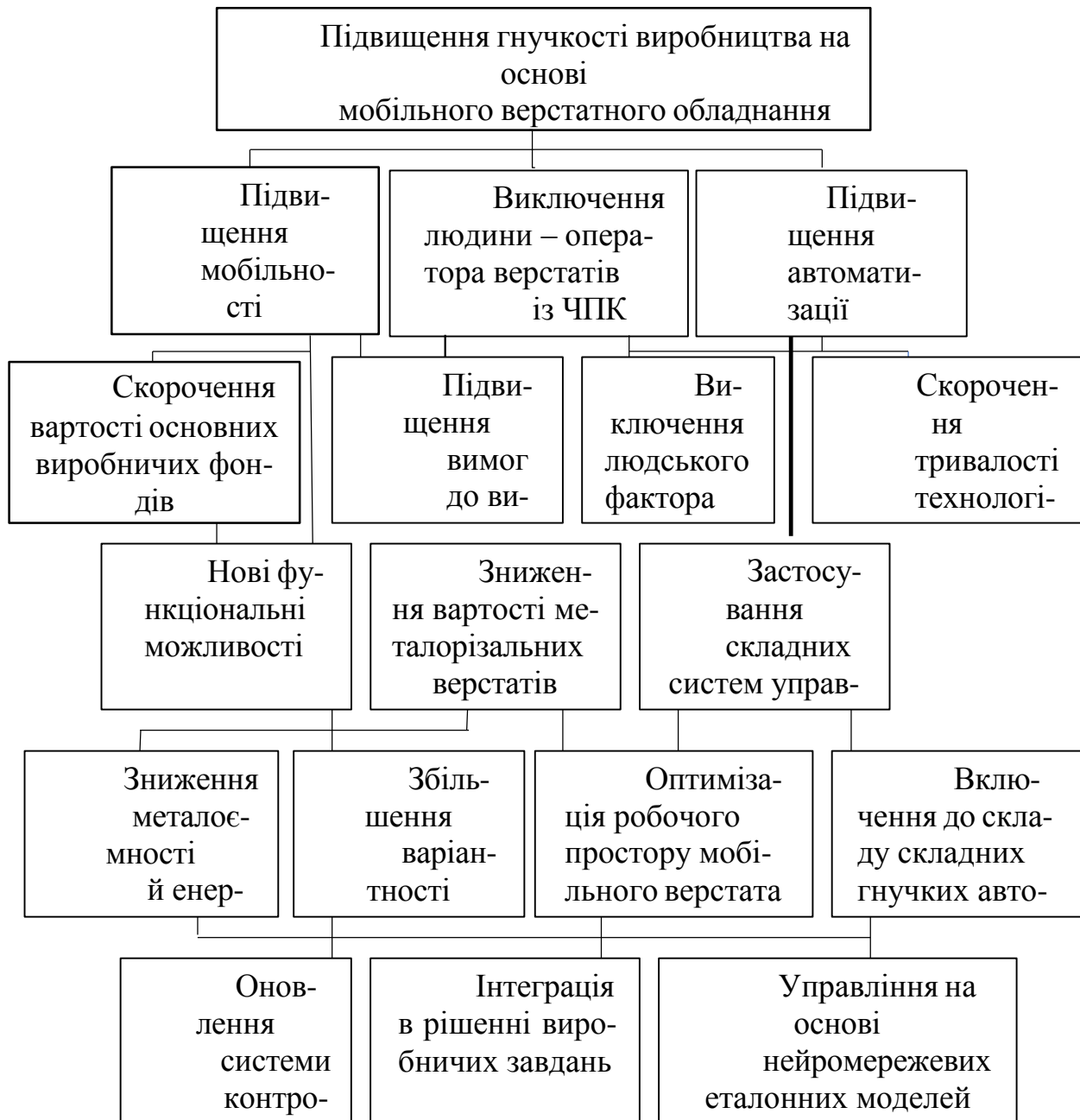


Рисунок 6.1 – Взаємозв'язок ознак виробництва на базі мобільних верстатів із МПС

Як показано на схемі, застосування мобільних верстатів із використанням механізмів вимагає забезпечення складного характеру управління їхніми виконавчими ланками, які базуються на принципово нових методах і способах контролю та діагностики нового обладнання, технологічних процесів і продукції. А впровадження мобільних верстатів забезпечує:

- зміну структури виробничого середовища за рахунок зміни компонування обладнання, організації робочого простору, транспортування;
- зміну властивостей компонентів довкілля;
- зниження інформаційної ентропії середовища;
- зміну енергетичної насиченості середовища;
- зміну інформаційної насиченості середовища;
- зміну інтелектуальних властивостей середовища.

Цей перелік базується на розробці операцій технологічного, енергетичного, інформаційного та комунікаційного забезпечення виробництва.

На відміну від мобільних роботів, тут під робочим середовищем слід розуміти середовище оброблюваної деталі або виробу, що збирається. Як відомо, для процесів обробки заготовок деталей і складання машин потрібна точність рухів виконавчого механізму. Еталонна модель також вимагає високої точності реалізації (у межах 1...2 мкм). У цьому полягає відмінність робіт із досліджень мобільних адаптивних роботів і робіт із досліджень у сфері створення мобільних інтелектуальних верстатів-роботів. Звичайно, такий рівень автономності мобільних верстатів є найвищим.

У роботах [263] наведені обґрунтування необхідності оптимізації управління складними механізмами технологічних машин, а також представлені моделі процесів ефективного, за критеріями витрат енергії, управління обладнанням із МПС із використанням їхніх динамічної та статичної моделей. Показано, що в незаданому діапазоні швидкостей робочого органа при реалізації такого управління можна не враховувати маси та інерційні параметри елементів такого обладнання. Однак основні переваги обладнання з МПС найбільш яскраво проявляються в умовах великих швидкостей

переміщення виконавчих механізмів при заданій точності траєкторії переміщення інструмента та його позиціонування.

Авторами розроблено метод ідентифікації положення, кінематичних і динамічних параметрів МПС, із яких складаються мобільні верстатироботи.

За показниками створеної експериментальної бази побудовані нейромережеві моделі діагностики:

- конфігурації механізму;
- геометричних параметрів механізму при працюючому моторшпинделі;
- динаміки переміщення вузлів механізму експериментального стенда зі змінною швидкістю й навантаженням на привод;
- зміни температури об'єкта.

Це дозволило вирішувати такі завдання управління об'єктами:

- підвищення точності позиціонування виконавчого механізму об'єкта;
- забезпечення динамічного настроювання виконавчого механізму;
- оптимізація траєкторій переміщень робочого органа.

Для створення інтелектуальної системи управління основними складовими елементами виробництва, що реконфігурується, розроблено методику акустичної діагностики для механізмів технологічних машин (верстатів-роботів), що дозволяють діагностувати різні їхні стани в різних умовах. Показана можливість використання запропонованого підходу до управління складними технологічними машинами, такими як верстати з механізмами на основі МПС для підвищення точності позиціонування виконавчих механізмів, забезпечення їхньої динамічної настройки й оптимізації траєкторій переміщень робочих органів обладнання (у тому числі – різального інструмента). Усе це дозволяє розширити діапазон можливостей підвищення точності й продуктивності їхньої роботи.

Концепція впровадження запропонованого підходу передбачає наявність у механоскладальному цеху таких підрозділів, як:

- заготівельна ділянка на основі машини безперервного лиття заготовок у поєднанні з деталепрокатним станом;
- механічна ділянка, що являє собою майданчик для монтажу мобільних верстатів із системою інтелектуального управління;
- ділянка складання-розбирання мобільних верстатів із МПС,
- ділянка складання основної продукції.

На основі представлених розробок сформована концепція багатоменклатурного реконфігуруючого виробництва, заснованого на принципово новому підході до компонування, зокрема механоскладального цеху конкурентоспроможного виробництва із застосуванням мобільних інтелектуальних верстатів із МПС.

Пошук складних траєкторій зі змінними координатами й похідними першого й другого порядку від траєкторії переміщення дозволяють визначати й прогнозувати стан об'єкта в будь-який момент часу. Тим самим створюються умови для управління станом робочого органа мобільного верстата-робота з урахуванням поточних умов роботи верстата-робота (добре й слабо формалізованих змінних факторах).

#### *Рекомендації з подальших перспективних розробок МІТМ*

Для створення перспективного обладнання, виконаного з МПС, необхідне:

1. Теоретичне обґрунтування множин структурних, виконавчих і керуючих вузлів мобільних інтелектуальних технологічних машин (МІТМ)
2. Розробка технічних завдань на проєктування базуючих, позиціонуючих та виконавчих систем МІТМ
3. Розробка перспективних технологічних процесів із застосуванням МІТМ
4. Проєктування вузлів виконавчих механізмів МІТМ
5. Розробка алгоритмів інтелектуального управління вузлами й механізмами МІТМ

6. Проєктування керуючих систем МІТМ
  7. Проєктування систем технологічних інструментів МІТМ
  8. Створення дослідних зразків елементів МІТМ (виготовлення, комплектація, складання, налагодження)
  9. Випробування дослідних зразків МІТМ
  10. Дослідження ринку споживачів МІТМ
  11. Організація і супровід виготовлення промислових зразків МІТМ
  12. Забезпечення рекламно-виставкової діяльності
  13. Ведення наукового розділу профільного періодичного видання (журналу), присвяченого МІТМ
  14. Проведення тематичних семінарів і конференцій за тематикою теорії, створення та експлуатації МІТМ
  15. Розробка технологічних процесів виготовлення та ремонту виробів в умовах застосування систем МІТМ
  16. Кадровий супровід створення, впровадження та експлуатації МІТМ:
    - розробка та впровадження магістерських програм за тематикою МІТМ
    - розробка та впровадження структурованих докторських програм;
    - підвищення кваліфікації інженерних кадрів підприємств за тематикою МІТМ.
- Перелік розробок щодо створення МІТМ дозволив визначити:
- класифікацію структур, виконавчих і керуючих вузлів і частин МІТМ;
  - перелік технічних вимог до систем МІТМ;
  - перспективні технологічні процеси основних процесів формоутворення, відновлення деталей і складання машин;
  - типові елементи й вузли виконавчих механізмів із робочими пристроями МІТМ;



- принципи створення алгоритмів інтелектуального управління вузлами й механізмами МІТМ і типові алгоритми;
- вимоги до апаратних складових керуючих систем, створення комбінованих аналого-цифрових еталонних моделей керуючих систем;
- типові компонування й склад обробних інструментальних систем МІТМ;
- дослідні зразки елементів МІТМ для проведення випробувань і доопрацювання;
- програму випробувань та обробки результатів;
- особливості сегмента ринку МІТМ.

## **6.2 Формування реконфігурованої структури ділянок механоскладальних цехах на основі мобільних верстатів-роботів**

Проблема підвищення гнучкості механоскладального виробництва при одночасному підвищенні продуктивності та якості виготовлення продукції не тільки залишається актуальною, але й відрізняється тенденцією потреби в постійному зростанні інвестицій у виробничі фонди, період оновлення яких неухильно скорочується через необхідність забезпечення конкурентоспроможності продукції, що випускається.

Перспективна стратегія завантаження виробничих потужностей сучасного підприємства базується на концепції гнучкого виробництва, здатного швидко переналагоджуватися на випуск дрібносерійної продукції з продуктивністю, що наближається до показників багатосерійного й масового. Але формування номенклатури виробів для завантаження наявних у підприємства потужностей визначається не тільки потребами ринку, а й можливостями підприємства. Традиційні шляхи оновлення технологічного обладнання передбачають проходження ним життєвого циклу – від установки на фундамент до утилізації. У цьому випадку показники гнучкості

обладнання залишаються незмінними й частково можуть бути змінені тільки при черговій модернізації.

З'являється необхідність **забезпечити гнучкість виробництва не тільки швидкої переналагодження наявного і підприємства обладнання і оснастки** за рахунок багатоопераційних верстатів з ЧПУ (оброблювальних центрів). Таке обладнання має високі показники гнучкості й технологічних можливостей, які досягаються **за рахунок автоматизації та матеріаломісткості, що супроводжує його складність і характеристики точності, вібростійкості, габарити робочої зони і т. п.**

Великі перспективи в побудові реконфігурованих виробництв відкриваються у зв'язку із застосуванням металообробних верстатів на основі МПС [73, 190]. Їхні конструкції відрізняються жорсткістю, низькою металоємністю в порівнянні з традиційними верстатами аналогічного робочого простору; здатністю до великих навантажень через **фермені елементів**; точністю переміщень виконавчих механізмів і їхнього позиціонування; можливістю масштабування конструкцій у розмірному ряду; простотою елементів верстата і їхнього остаточного складання.

Однак механічна частина й система приводів виконавчих механізмів мобільного верстата не матиме необхідних показників точності й продуктивності без системи інтелектуального керування траєкторією. Численні дослідження у сфері точності позиціонування, кінематики та динаміки верстатів на базі МПС підтверджують тезу про складний характер управління ланками механізму навіть для виконання прямолінійних переміщень різального інструменту [271, 270, 269].

Багатоваріантність компоновок мобільних верстатів для різних варіантів завантаження реконфігурованих ділянок механічної обробки й складність керування виконавчими рухами робочого інструмента вимагають постійного контролю його положень у робочому просторі і їхньої корекції відповідно до еталонної моделі. У роботах [289, 144, 199] показано особливості динаміки гексапода як представника МПС. Зокрема, авторами цих

робіт підтверджується складний характер коливань механічної системи. Ці дослідження проводилися при вимушених коливаннях фіксованої частоти, що дорівнює 10, 50, 100, 150 Гц. Амплітуда коливань по осях X, Y має різний характер: при частоті 10 Гц зі збільшенням жорсткості різко зменшується, а при частотах 100, 150 Гц амплітуда мінімальна й змінюється незначно. Амплітуди крутильних коливань щодо осей X, Y, Z мають залежності, аналогічні лінійним. На підставі цих досліджень автори роблять висновок про те, що коливання по осях X, Y і крутильні коливання вимагають ретельного розрахунку конструкторсько-технологічних параметрів. Цей висновок підтверджує необхідність пошуку альтернативного рішення для забезпечення точності й продуктивності обладнання різних компоновальних схем.

У зв'язку із цим пропонується підхід, при якому формування складу й обсягу основного та допоміжного обладнання в механоскладальному виробництві визначається не сформованими традиціями й можливостями його поновлення, а тією номенклатурою виробів, яка на певний момент часу є актуальною і найбільш затребуваною. Такий підхід дозволить адаптувати можливості виробництва до випуску різних виробів.

Метою роботи є аналіз та дослідження можливості формування реконфігурованого виробництва в механоскладальних цехах на основі мобільних верстатів-роботів.

Основні вимоги до реконфігурованих виробництва:

- високий рівень автоматизації основного й допоміжного обладнання;
- раціональне використання робочого простору при обробці як великогабаритних, так і малорозмірних деталей;
- використання принципу «на виробничих площах – тільки обладнання, що активно використовується»;
- можливість постійного оновлення морально й фізично застарілого обладнання в умовах край обмежених ресурсів.

Особливості верстатів на базі МПС дозволяють прогнозувати еволюцію механоскладального виробництва в напрямку подальшого збільшення гнучкості виробництва за рахунок реконфігурації ділянок механічної обробки шляхом оснащення їх верстатами-роботами з нормалізованих елементів із широкодіпазонним розмірним рядом.

Замінюючи перспективу оснащення заводів сучасними металорізальними верстатами, обробними центрами, гнучкими автоматизованими модулями, гнучкими виробничими ділянками й цехами на постійне безперервне комплектування ділянок і цехів мобільними верстатами-роботами, можна на порядки знизити витрати на основні фонди. Особливістю такого розвитку виробничої потужності підприємства є:

- формування структури замовлень на продукцію високого попиту (критерієм відбору є вигода від її виготовлення);

- розробка технологічних процесів із використанням безлічі можливих варіантів конфігурації мобільних верстатів-роботів;

- вибір оптимальних варіантів компонування мобільних інтелектуальних верстатів-роботів;

- проектування оптимальної конфігурації кожного верстата з МПС і допоміжного обладнання;

- розробка завдань на складання мобільних верстатів-роботів із нормалізованих елементів і керуючих програм для виготовлення виробів із застосуванням реконфігурованого металообробного обладнання – мобільних верстатів-роботів;

- складання й установка мобільних верстатів-роботів на ділянці механообробки в призначених позиціях;

- створення еталонних моделей робочого простору кожного мобільного верстата-робота для реалізації ідеальних керуючих програм управління МПС на основі безперервної діагностики верстатних систем;

– виготовлення заданої програми випуску виробів у механоскладальному виробництві (операції складання включаються до переліку робіт із забезпечення виробничої діяльності ділянки, цеху й т. п.);

– демонтаж (при необхідності) раніше реконфігурованого обладнання, складування нормалізованих елементів, комплектування раніше звільненої ділянки обладнанням відповідно до нового виробничого завдання.

Дотримання наведеного алгоритму дозволить підприємству розширити спеціалізацію, що диктується раніше придбаним обладнанням і незмінну в межах терміну його окупності. Практично, така спеціалізація перетворюється в адаптацію до забезпечення умов найбільшої вигоди.

Якщо прийняти тривалість складання мобільного верстата-робота з нормалізованих елементів, то тривалість складання устаткування виробничої ділянки буде дорівнювати

$$T = \sum_k t_i + \frac{1}{r} \sum_r t_j, \quad (6.1)$$

де  $k$  – кількість послідовно зібраних мобільних верстатів-роботів;  $t_i$  – витрати часу на складання  $i$ -го верстата;  $r$  – кількість мобільних верстатів-роботів, що збираються паралельно;  $t_j$  – витрати часу на складання  $j$ -го верстата-робота.

Оскільки продуктивність  $P$  є функцією складності продукції  $S$ , що виготовляється, і технологічних можливостей  $TV$  обладнання, то

$$P = \frac{TV}{S}. \quad (6.2)$$

У реконфігурованому виробництві величина буде визначатися тим, наскільки швидко буде «збирати заново» мобільні верстати, але за тривалий період експлуатації такої виробничої системи величина буде завжди найбільшою з можливих. У результаті комплектування виробничої програми

за пріоритетами створюються умови для максимального значення швидкості формування кінцевого показника ефективності виробництва. Формалізований опис функції вкрай утруднений, тому її дослідження й застосування повинно бути засноване на математичному апараті імітаційного моделювання з подальшим коректуванням моделі за результатами спостережень практичної діяльності реконфігурованих ділянок (цеху).

Структура механоскладального цеху для умов реконфігурованого виробництва включає:

- виробничий майданчик для монтажу мобільних верстатів відповідно до технологічного процесу з установкою мобільних верстатів на віброопорах;

- склад нормалізованих елементів мобільних верстатів зі щільним складуванням з якісним урахуванням приймання, зберігання й видачі необхідних комплектів на складання мобільних верстатів (найкращим чином із такою функцією може впоратися автоматизований склад);

- ділянку складання мобільних верстатів-роботів, що оснащуються автоматизованою системою управління;

- систему розподіленого управління автоматизованим обладнанням.

Викладений підхід дозволить не тільки скоротити виробничі площі **на величину**. Таким чином, найбільшу вигоду (в абсолютному вираженні) можуть отримувати великі підприємства, паралельно оптимізуючи структуру допоміжного виробництва, зокрема, як у роботах [53, 62].

Одним із перспективних напрямів в економії матеріальних і енергетичних ресурсів є створення менш енергоємних технологічних процесів за рахунок прогресивних та перспективних технологій.

Схематичне зображення підходу в питанні досягнення економічного ефекту (рис. 6.2) представлено у вигляді областей: прецеденту (вихідної заготовки, технологічного процесу механічної обробки й складання для деталей черв'як, зубчасте колесо, корпус, кришка) і інновації, яка полягає в застосуванні верстатів із МПС. У порівнянні з вихідним технологічним

процесом, заготовка не потребує розмітки під подальшу обробку на верстатах із МПС. Механічна обробка в інноваційному технологічному процесі відрізняється тим, що швидкість переміщення інструмента в таких верстатах підвищується, час обробки скорочується, забезпечується інтенсифікація режимів різання, підвищується економічна точність операційних розмірів. На операції складання зникає необхідність ручного доведення, зняття задирок та інших додаткових робіт.

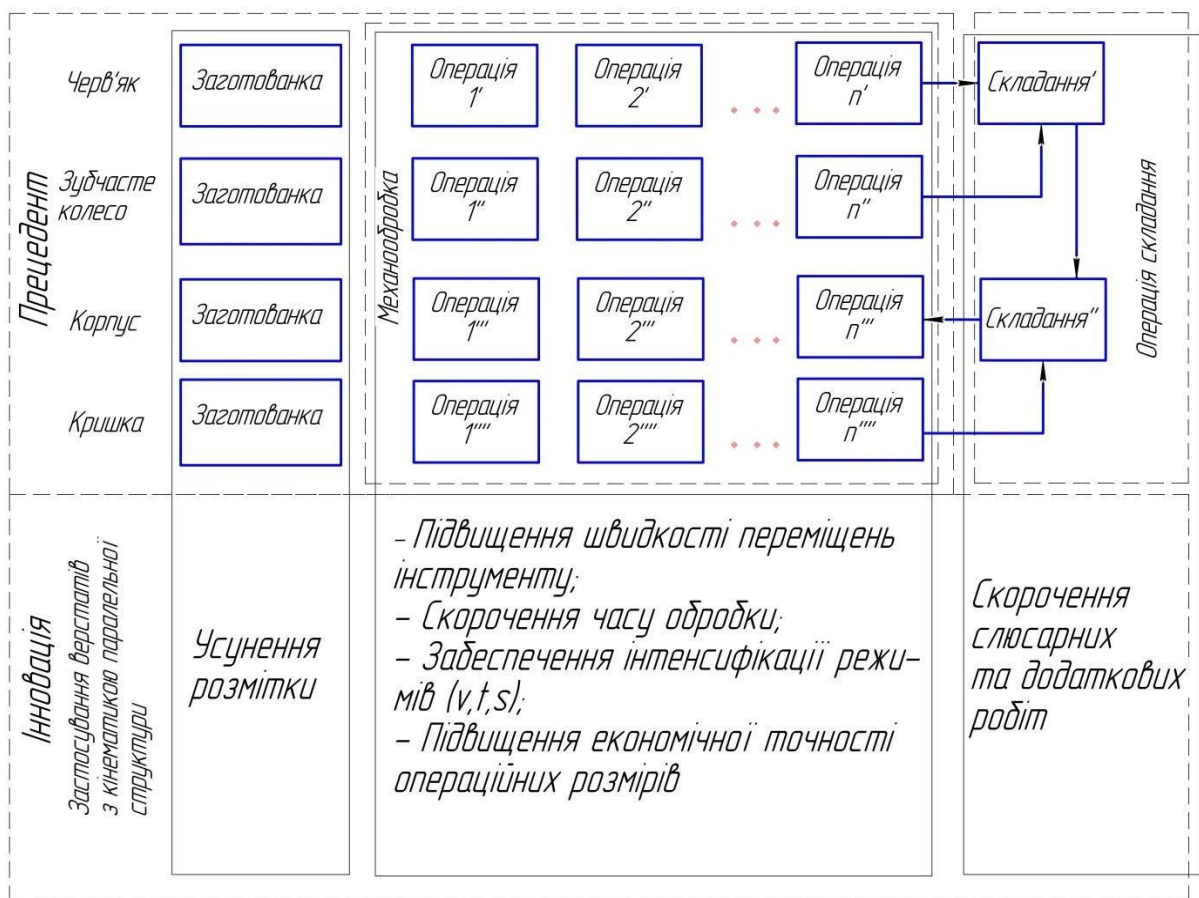


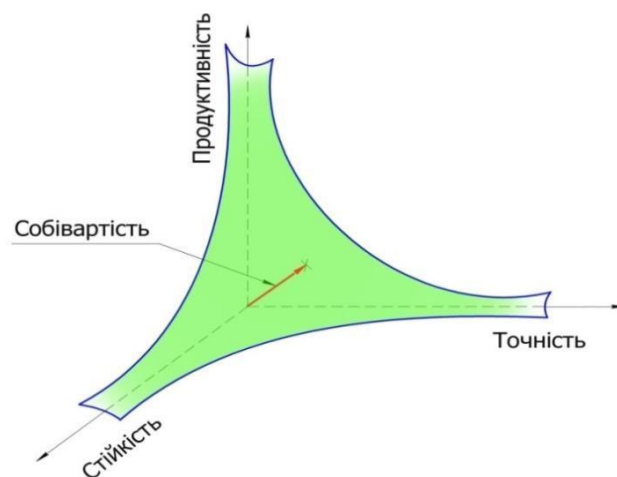
Рисунок 6.2 – Схематичне зображення особливостей інноваційного підходу

Схематичне зображення рис. 6.3 представляє логічну послідовність, яка показує, що схема формоутворення, яка сприяє підвищенню економічної точності досягнення операційних розмірів, відрізняється високошвидкісною обробкою і інтенсифікацією процесу, веде до зниження кількості операцій. Зниження кількості операцій веде до скорочення чисельності

обладнання, скорочення необхідної під верстат площі, кількості технологічного оснащення і до скорочення кількості робочих місць. У результаті скорочуються витрати на обслуговування обладнання й приміщень, підвищується продуктивність обробки, скорочується обсяг незавершеного виробництва, знижуються енергетичні витрати. У кінцевому підсумку скорочується собівартість продукції і забезпечується конкурентоспроможна ціна на ринку продукції (див. рис. 6.3, 6.4).



*Рисунок 6.3 – Економічний і виробничий ефект використання верстатів із МПС*



*Рисунок 6.4 – Схема взаємозалежних показників інструменту, зміцненого високовольтним розрядом*

Разом із цим, у проєкті досліджено новий енергозберігаючий метод зміцнення технологічного інструмента шляхом впливу на його робочі поверхні високовольтних розрядів електричного струму. Застосування цього



методу дозволяє підвищити міцність різальних інструментів за короткий проміжок часу, використовуючи нескладне обладнання, підвищуючи продуктивність та знижуючи енергетичні витрати [19].

Так можна сформувавши вигляд процесу підвищення стійкості, залежно від розглянутих факторів, у вигляді взаємозалежних показників, таких як стійкість, точність, продуктивність, собівартість. З підвищенням стійкості зростає продуктивність процесу, а собівартість зменшується (див. рис. 6.4).

### **6.3 Приклади щодо реконструкції механоскладального цеху машинобудівного підприємства**

У результаті аналізу «життєвого циклу» існуючих виробничих систем була складена схема (рис. 6.5), яка відображає зміну стану реконфігурованої виробничої системи (РВС) протягом певного відрізка часу, у порівнянні з традиційним виробництвом та гнучкою виробничою системою (ГВС).

Реконфігуровані виробничі системи якісно відрізняються від систем, створених до цього, вони змінюються протягом часу, у залежності від зміни кон'юнктури ринку, та не обмежені річною програмою випуску продукції, що дозволяє частково задовільнити принципи «бережного виробництва». Це дозволяє позбутися зайвих витрат та виробляти продукцію за заявками. Також це впливає на зменшення незакінченого виробництва (пролежування деталей на складах), крім того, знімає проблему реалізації продукції та обмеження підприємства в номенклатурі деталей, що випускаються.

Ефективність РВС у більшій мірі залежить від використовуваного технологічного обладнання механообробки. Для нього повинні застосовуватися принципи модульності та масштабованості.

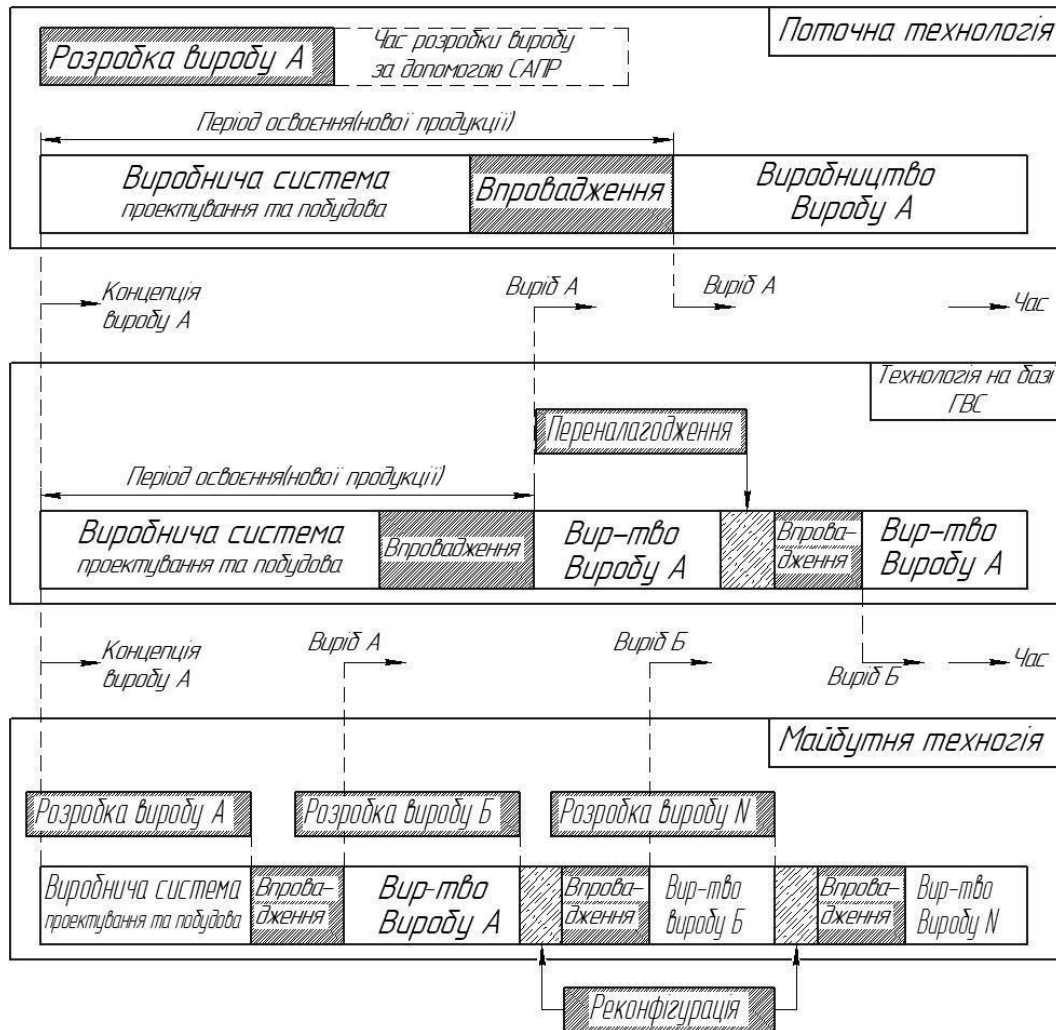


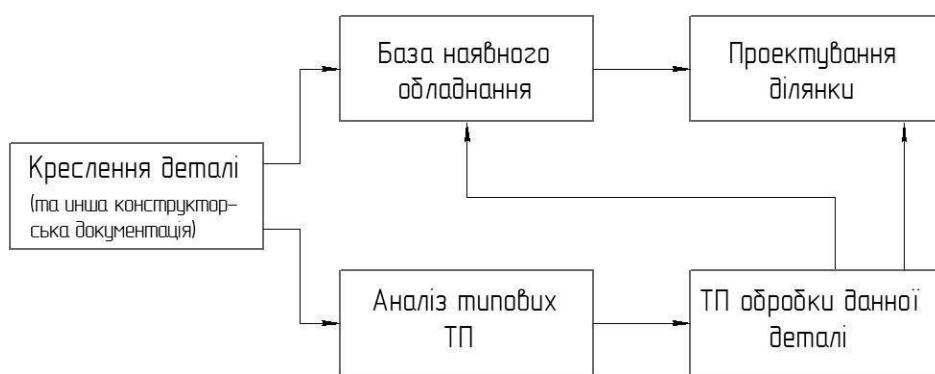
Рисунок 6.5 – Змінення стану PBC

Принцип модульності забезпечується створенням спеціалізованих взаємозамінних та сумісних модулів, з яких потім за необхідністю будуть компонуватися роботизовані інтелектуальні технологічні машини (PITM). Це допоможе скоротити витрати на технологічне обладнання та задовольнити розширення номенклатури деталей. Крім того, це дає можливість обробляти деталі, що схожі за типорозміром або потребують різних типів обробки на одному робочому місці. Дотримання цього принципу забезпечить невеликий час, який буде витрачено на компонування ділянок із PITM.

У свою чергу принцип масштабованості вимагає створення стандартизованої номенклатури складових частин, у залежності від типорозмірів

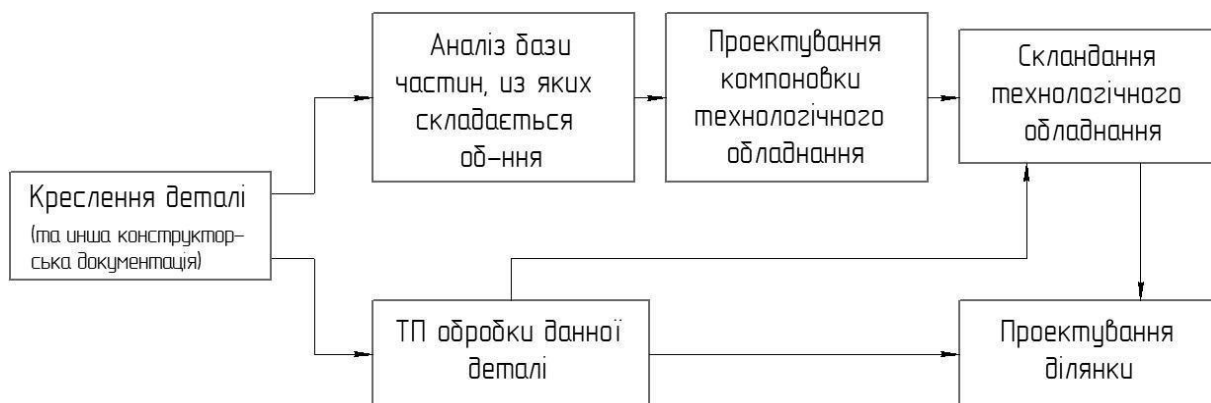
оброблюваних деталей. Це дає змогу розширити номенклатуру типорозмірів деталей.

Однією з проблем сучасного машинобудування є те що, виробнику доводиться підбирати номенклатуру деталей під існуючий парк технологічного обладнання, яке в основному є постійним із плином часу, що накладає обмеження на номенклатуру продукції та позбавляє деякої частини прибутку. Порядок проєктування ділянки та створення технологічних процесів в умовах традиційного виробництва представлено на рис. 6.6.



*Рисунок 6.6 – Порядок проєктування ТП на базовому підприємстві*

В умовах реконфігурованого виробництва, навпаки, є змога створювати виробничі ділянки або технологічні комплекси, орієнтуючись на особливості обробки тієї чи іншої деталі (рис. 6.7).



*Рисунок 6.7 – Порядок проєктування ТП*

Оптимізація реконфігурованого технологічного комплексу полягає в забезпеченні мінімальної кількості технологічного обладнання (мінімальних капіталовкладень) та мінімально можливого часу виготовлення замовленого вузла.

Насамперед час від заказу до відвантаження продукції залежить від часу, витраченого на механообробку та складання. Проте час складання та момент надходження деталей є основою для проєктування ділянки механообробки та визначення кількості робочих місць. Для наглядного представлення процесу складання (потребу в деталях вузла) необхідно сформулювати циклограми процесу складання.

Після аналізу циклограми дається замовлення на механообробку деталей для складання та формується план механообробки, який є основою для конфігурації ділянки.

У простому варіанті кількість верстатів з однотипними технологічними можливостями буде дорівнювати

$$n = \frac{T_d}{T_{з-с}}, \quad (6.3)$$

де  $T_d$  – трудомісткість виготовлення типової деталі;

$T_{з-с}$  – період часу від завершення механообробки до складання.

Проте в деяких випадках деталі можуть виготовлятися комплектами (однотипні деталі), тоді формула 4 матиме вигляд

$$n_{ст} = \frac{T_{дi} n_i}{T_{з-сi}}, \quad (6.4)$$

де  $T_{дi}$  – трудомісткість виготовлення  $i$ -ї деталі;

$T_{з-сi}$  – період часу від завершення механообробки до складання;

$n_i$  – кількість деталей у комплекті.

Та буде справедливою рівність

$$n_{\text{ст}} T_{\text{з-с}_i} = T_{\text{д}_i} n_i. \quad (6.5)$$

На рис. 6.8 представлено приклад циклограми механообробки, суміщеної із циклограмою складання.

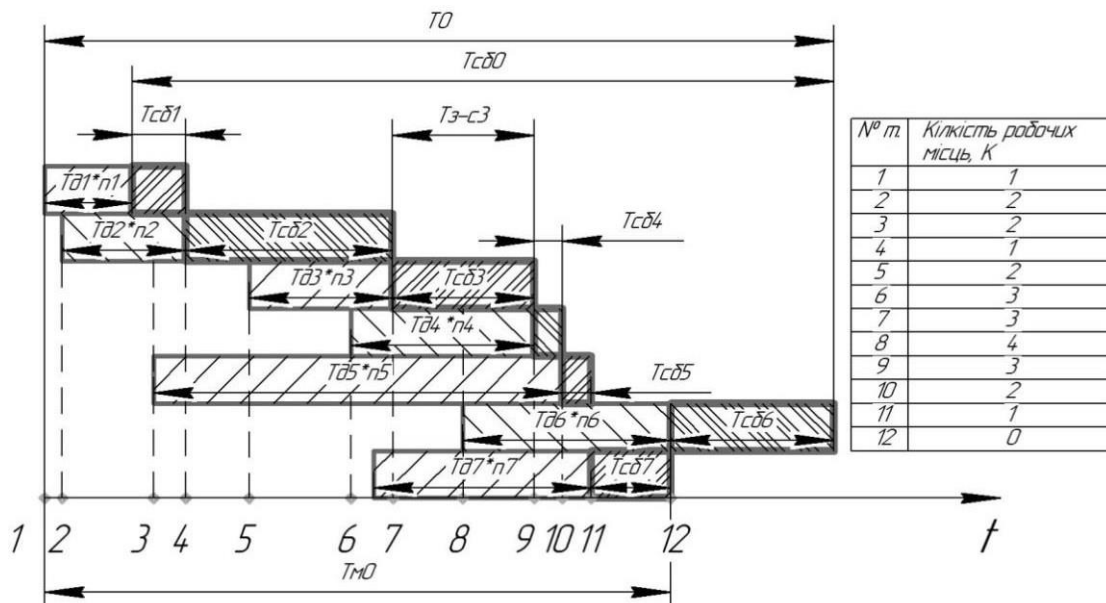


Рисунок 6.8 – Циклограма виготовлення

Виходячи із циклограми можна зробити висновок, що в кожен момент часу кількість верстатів різна, тому було сформульовано цільову оптимізаційну функцію, яка повинна наближатися до мінімуму:

$$F = K_j \sum_{i=1}^{K_j} n_{\text{ст}_i} \rightarrow \min, \quad (6.6)$$

де  $K$  – кількість функціонуючих робочих місць у певний момент часу;

$i$  – початок роботи над деталлю;

$j$  – кінець роботи над деталлю;

$F$  – мінімальна кількість верстатів, що задані на реконфігурацію.

Ураховуючи всі умови та аналіз циклограми, можна сформулювати два обмеження:

- обмеження 1:

$$n_{ст} = \frac{T_{дi} n_i}{T_{з-сi}} ;$$

- обмеження 2:

$$T_{д1} n_1 + \sum T_{сб.} = T_0 \quad (6.7)$$

де  $T_0$  – час виконання загального замовлення на виготовлення 1-го вузла.

Змінюючи  $T_{з-с0}$ , можна збільшувати чи зменшувати кількість потрібних верстатів, що також вплине на загальний час виконання замовлення на один вузол. У цьому випадку час на складання буде постійним, а час на механічну обробку буде змінюватися.

Відповідальним етапом проєктування РВС є синтез оптимальної структури й компоновання. Під структурою розуміють виробничо-технологічну організацію реконфігурованої системи. Вона реалізується набором різних елементів: технологічного устаткування, транспортних засобів, засобів керування та іншим, що забезпечує працездатність РВС у цілому. Ці елементи об'єднані між собою рядом функцій, які забезпечують виконання виробничого завдання [280].

Паралельно із синтезом структури розробляється компоновання РВС. Воно визначає реальне розміщення устаткування в цеху. Синтез структури й розробка компоновання нерозривні між собою, тому цей етап проєктування часто називають структурно-компоновальним. Структурно-компоновальна побудова визначається організаційно-технологічними вимогами [251, 278].

Для синтезу варіантів структури й компоновання використовують моделі. Вони розподіляються на аналітичні й натурні. Із класу аналітичних моделей дуже поширені імітаційні моделі, викладені в роботах [278, 283].

Імітаційними моделями є математичні об'єкти, які схематизують елементи РВС, що проектується. За їхньою допомогою вирішуються основні завдання організаційно-технологічного проектування. У лабораторній роботі за допомогою імітаційного моделювання, крім структури РВС, визначаються: 1) кількість технологічного транспортного та іншого устаткування; 2) коефіцієнти завантаження; 3) тривалість виробничого циклу, обсяг незавершеного виробництва й час знаходження деталі в черзі; 4) організація вхідного й вихідного потоків оброблюваних деталей. Імітаційні моделі близькі за побудовою до раніше вивчених циклограм процесу обробки деталі. Їхньою відмінністю є можливість імітації технологічного процесу в динаміці. Алгоритм моделювання структури й розрахунку технологічних параметрів ГВС наведений на рисунку 6.9 [283].

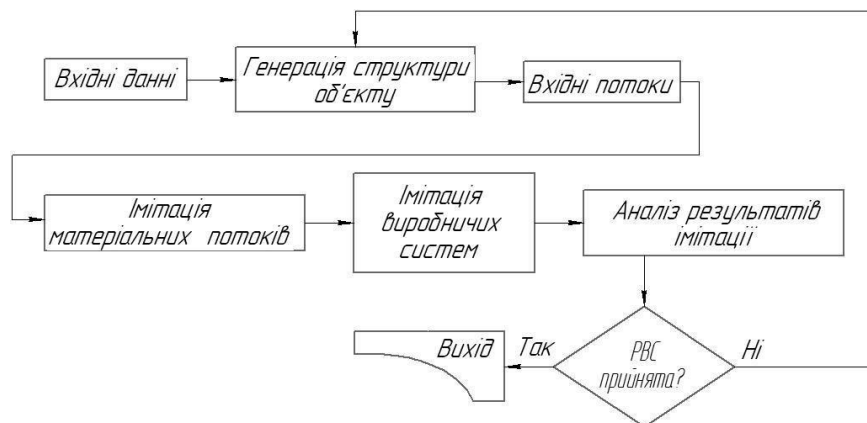


Рисунок 6.9 – Алгоритм імітаційного моделювання [283]

Імітаційне модулювання дає змогу описати поведінку складної виробничо-економічної системи впродовж заданого періоду часу при умовах [120]:

- якщо ще немає закінченої постановки задачі дослідження та модель є засобом вивчення явища;
- коли реальний об'єкт недоступний для спостереження і імітація – єдиний спосіб дослідження й перевірки стратегії поведінки.

Воно дає можливість:

– прискорити протікання процесів у моделі в порівнянні з реальними умовами й за короткий час «програти» безліч варіантів;

– перевірити різні варіанти порядку запуску партій деталей, величини партій, кількості партій, виробничу структуру ділянок, пріоритетність обробки, проведення операцій технічного контролю.

Для підтвердження адекватності оптимізаційної функції була розроблена методика імітаційного моделювання, яке дає можливість спостерігати за функціонуванням реконфігурованої системи в динаміці та проаналізувати завантаження робочих місць, у тому числі необхідну їх кількість. Для цього було розроблено компонування технологічного обладнання на базі МПС, а також створена поєднана циклограма складання та механообробки.

Вузол «вал приводний» складається з наступних деталей:

- корпус: 890x1780x420 мм; вага: 1050 кг;
- вал-шестерня: ф574,19x1975; вага: 1865 кг;
- дві кришки: 400x780x265; вага: 165 кг.

Підготовка до імітаційного моделювання проводилася в чотири етапи:

1-й етап. Створення компонування технологічного обладнання на базі МПС

2-й етап. Створення циклограм складання та механообробки та вибір кількості обладнання за допомогою цільової функції

3-й етап. Визначення особливостей імітаційного моделювання в умовах реконфігурованого виробництва

4-й етап. Аналіз результатів та формування компонувального рішення для ділянки механообробки

На першому етапі спочатку був спроектований вузол, що буде забезпечувати обробку і виконаний на принципах меншої металоємкості та високої жорсткості (рис. 6.10).

На рисунку 6.10 вказано ферменну конструкцію (поз.1) для різних значень робочої поверхні та виконаних зі стандартизованих стрижнів,



із метою забезпечення уніфікації та взаємозамінності складових технологічного обладнання.

На позиції 2 вказано ланки, які забезпечують переміщення основного органа та жорсткість його положення. Вони приводяться до руху каретками, які у свою чергу рухаються за допомогою механізму на основі лінійного крокового приводу (рис. 6.11). У лінійному приводі дискретність переміщення забезпечується постійністю міжзубцевої відстані та досягає 0,1 мм.

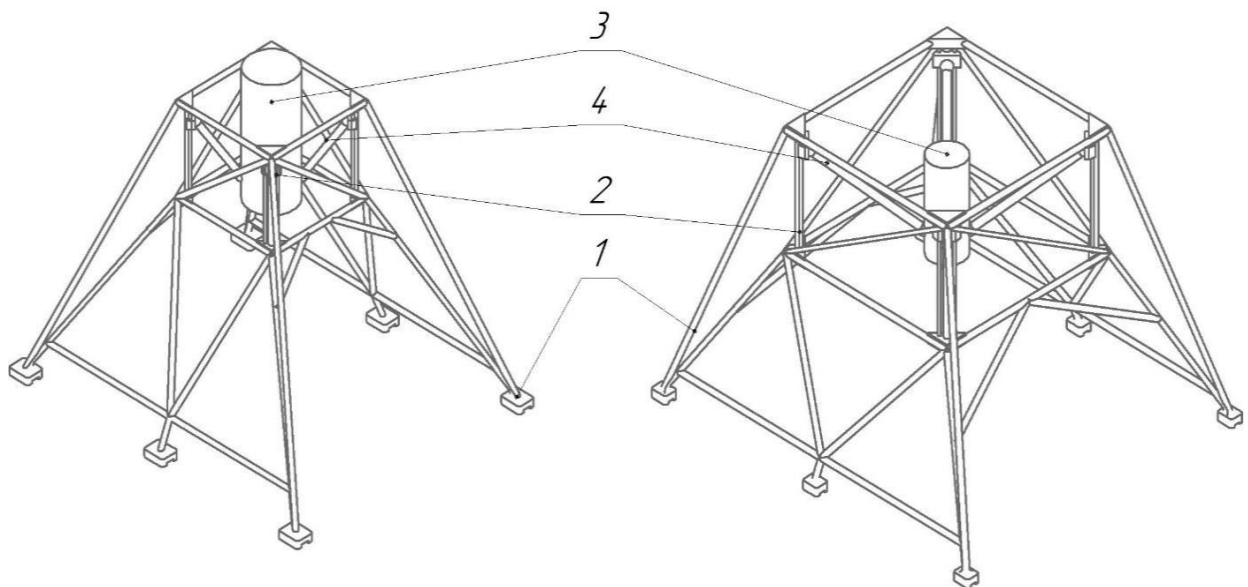


Рисунок 6.10 – Ферменні конструкції основного виконавчого вузла:  
*а* – із робочою поверхнею 480x480; *б* – з робочою поверхнею 1000x1000

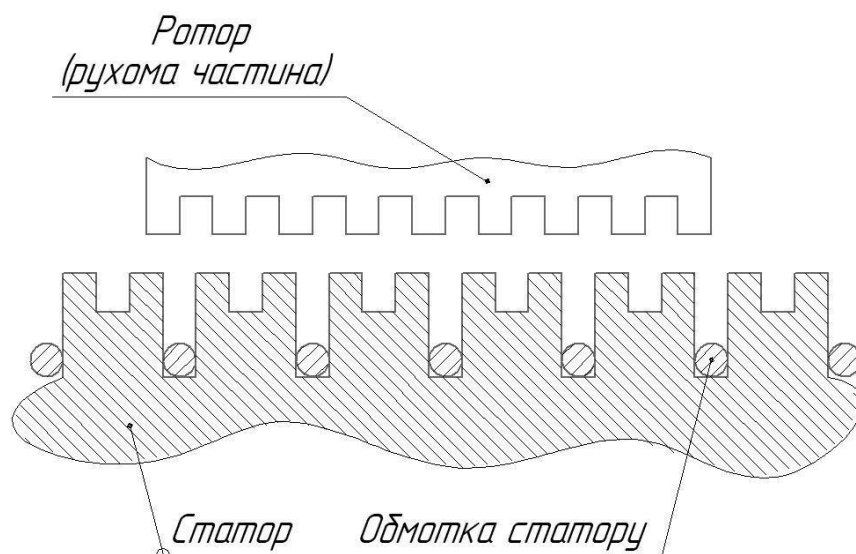
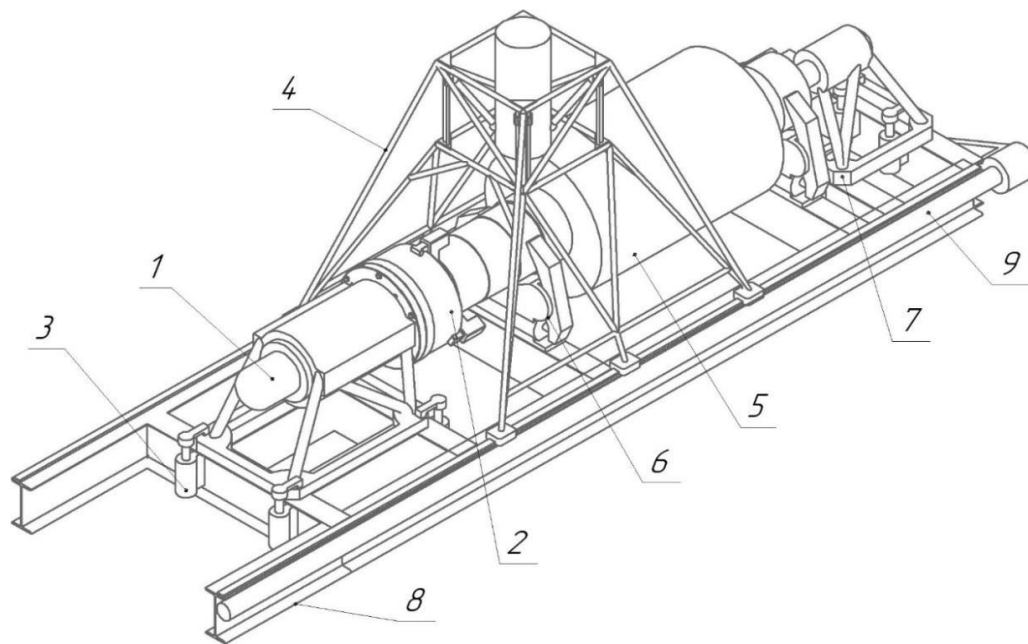


Рисунок 6.11 – Схема принципу дії лінійного приводу

Установочні елементи для закріплення деталі – патрон (див. рис. 6.11), центр та призматичний затискач (рис. 6.12, поз. 2, 6, 7) мають стандартну конструкцію для уніфікації оснащення.



*Рисунок 6.12 – Технологічна машина для обробки тіл обертання: 1 – привод повороту заготовки; 2 – патрон; 3 – гідрозатискачі; 4 – основний орган; 5 – заготовка; 6 – призматичний затискач; 7 – центр; 8 – основа; 9 – привод повздовжнього руху*

Для виконання двох різних типів операцій запропоновано виконувати часткову реконфігурацію в процесі обробки деталі. Це забезпечується шляхом виконання передньої та задньої бабки знімними. Для забезпечення точності взаєморозташування в конструкції цих вузлів будуть присутні конічні отвори, а в основі – конічні штифти (рис. 6.12, поз 8). Затискання буде відбуватися за допомогою чотирьох гідравлічних затискачів із поворотним прихоплювачем (рис. 6.12, поз 3).

Переміщення у повздовжньому напрямку буде відбуватися за допомогою черв'ячної передачі та крокового високомоментного приводу (рис. 6.12, поз 9).

Технологічна машина для обробки корпусних деталей була побудована за тими ж принципами та представлена на рис. 6.13. Особливістю цієї конструкції є те, що вона передбачає обробку на одному робочому місці за два установи без переналагодження установочного устаткування.

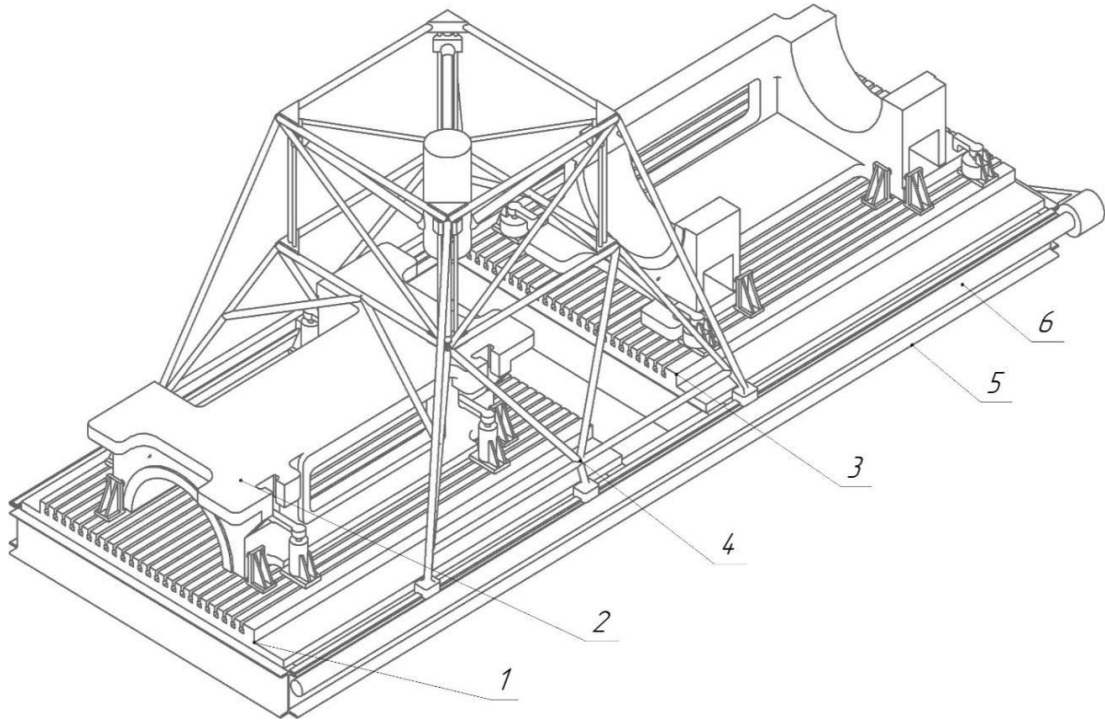


Рисунок 6.13 – Технологічна машина для обробки корпусних деталей:  
 1 – установочне оснащення (установ А); 2 – заготовка (установ А);  
 3 – установочне оснащення (установ Б); 4 – основний орган; 5 – основа;  
 6 – привод повздовжнього руху

На другому етапі виконується загальна циклограма складання та механообробки (рис. 6.14). Особливістю є те що циклограма механообробки будується на основі циклограми складання, тобто порядок прибуття деталей на складання задає порядок їхньої механообробки. Та в залежності від часу складання та умов замовника розраховується необхідна кількість технологічного обладнання.

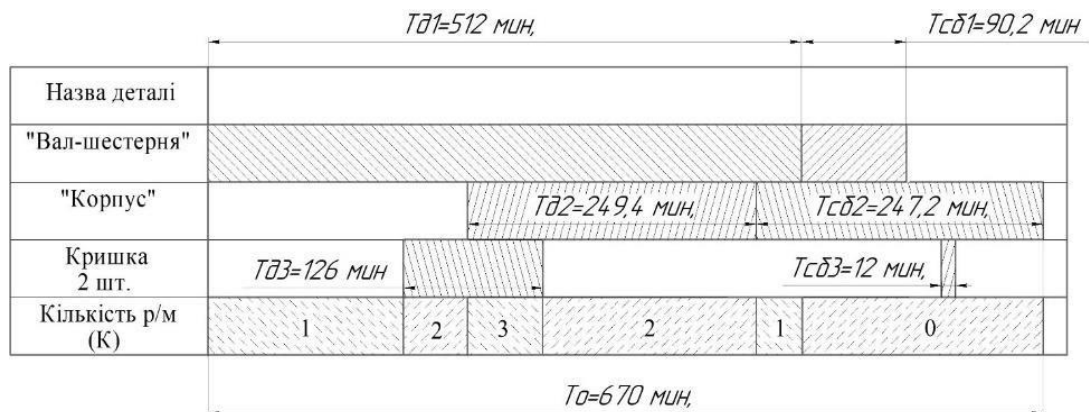


Рисунок 6.14 – Загальна циклограма

Для забезпечення поточного виробництва розраховано необхідну кількість технологічного обладнання:

- для обробки деталі «Вал-шестерня»:

$$n_{\text{ст}} = \frac{T_{\text{дi}} n_i}{T_{\text{з-сi}}} = \frac{512}{247} = 2,07 ;$$

- для обробки деталі «Корпус»:

$$n_{\text{ст}} = \frac{T_{\text{дi}} n_i}{T_{\text{з-сi}}} = \frac{249,4}{247} = 1,01 ;$$

- для обробки деталей «Кришка»:

$$n_{\text{ст}} = \frac{T_{\text{дi}} n_i}{T_{\text{з-сi}}} = \frac{63 \cdot 2}{342} = 0,36 .$$

Отже, для забезпечення умов  $F \rightarrow \min$ ,  $T_0 \rightarrow \min$  та безперервної роботи ділянки необхідно три робочих місця та чотири технологічні машини.

На третьому етапі проводиться імітаційне моделювання функціонування технологічних комплексів різної конфігурації для визначення адекватності цільової функції.

Були проаналізовані особливості багатомноменклатурних матеріальних потоків в умовах РВС, а також структурний склад цього виду виробничої системи, у результаті якого був синтезований алгоритм імітаційного моделювання РВС (рис. 6.15), який ураховує імітацію всіх ланок виробничого процесу.

А також сформована таблиця (табл. 6.1), яка є основою для моделювання та дасть змогу спостерігати за динамічними процесами, які протікають у технологічній системі.

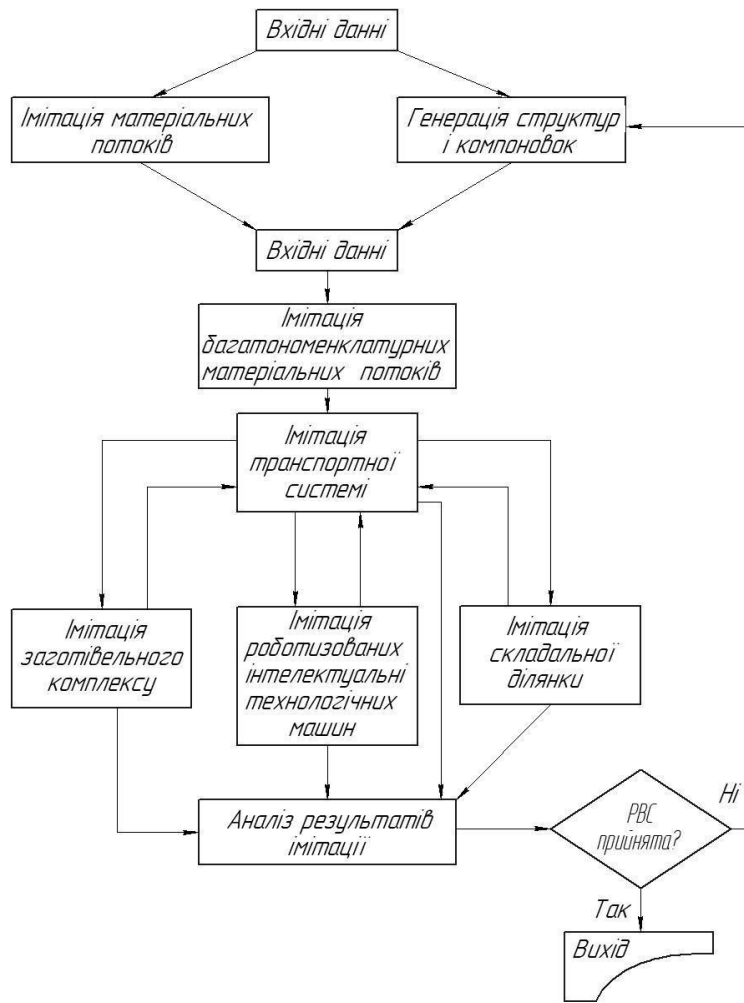


Рисунок 6.15 – Алгоритм імітаційного моделювання PBC

Таблиця 6.1 – Основа для імітаційної моделі

T	1	2	...	m
Y0				
W0				
Xn				
...				
X2				
X1				
V0				
Z0				

Для моделювання вхідного потоку необхідно побудувати вісь часу «Т». Вона обмежується періодом моделювання й ділиться на відрізки, які дорівнюють одиниці періоду моделювання.

На осі «Y0» моделюється порядок надходження деталей із заготівельної ділянки до транспортної системи комплексу.

Час знаходження та порядок виходу з транспортної системи до реконфігурованого інтелектуального технологічного модуля моделюється на осі «W0».

На осях «X1, X2... Xn» моделюється процес обробки деталі на роботизованій інтелектуальній технологічній машині, що є робочим місцем.

Далі деталь передається на ділянку складання, процес якого моделюється на осі «V0».

Вихідний потік «Z0» формується аналогічно вхідному. Ця вісь розташовується після сіток, що моделюють технологічне устаткування.

На четвертому етапі визначається склад механоскладального комплексу. На основі представленої інформації була сформована базова компоновка реконфігурованого багатоміністерського виробництва, заснованого на принципово новому підході до компонування, зокрема механоскладального цеху, конкурентоспроможного виробництва із застосуванням мобільних інтелектуальних верстатів із МПС.

У передпроектному вигляді ця компоновка передбачає наявність у механоскладальному цеху таких підрозділів, як:

- заготівельна ділянка;
- механообробна ділянка, що являє собою майданчик для монтажу мобільних верстатів із системою інтелектуального управління;
- дільниця складання-розбирання мобільних верстатів із МПС,
- дільниця складання основної продукції.

З процесу моделювання було виключено імітацію роботи заготівельної ділянки у зв'язку з відсутністю інформації про норми виконання заготовок.

Моделювання, для порівняння (визначення адекватності цільової функції), було виконане для трьох варіантів складу технологічного обладнання (ТМ):

1) ТМ для «вал-шестерні» – 1; ТМ для «корпусу» – 1; ТМ для «кришок» – 1; ділянка вузлового складання – 1; ділянка загального складання – 1;

2) ТМ для «вал-шестерні» – 2; ТМ для «корпусу» – 1; ТМ для «кришок» – 1; ділянка вузлового складання – 1; ділянка загального складання – 1;

3) ТМ для «вал-шестерні» – 2; ТМ для «корпусу» – 2; ТМ для «кришок» – 1; ділянка вузлового складання – 2; ділянка загального складання – 2 (у цьому варіанті випуск вузлів відбувається паралельно).

На осі «Y0» указано рекомендації для порядку надходження заготовок на ділянку механообробки («V1» – вал-шестерня; «V2» – корпус; «V3» – кришки).

На осі «X» указана робота технологічних машин:

– для 1-го варіанту: «X1» – для вал-шестерні; «X2» – для корпусу; «X3» – для кришок.

– для 2-го варіанту: «X1, X2» – для вал-шестерні; «X3» – для корпусу; «X4» – для кришок.

– для 3-го варіанту: «X1, X2» – для вал-шестерні; «X3, X4» – для корпусу; «X5» – для кришок.

На осі Z указана робота складальник ділянок:

– для 1-го та 2-го варіанту: «Z1» – вузлове складання для вал-шестерні; «Z2» – ділянка загального складання;

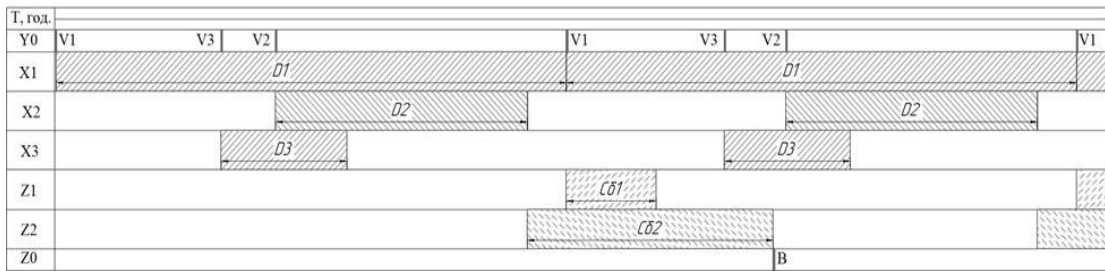
– для 3-го варіанту: «Z1, Z2» – вузлове складання для вал-шестерні; «Z3, Z4» – ділянка загального складання.

На осі «Z0» показано частоту випуску готової продукції.

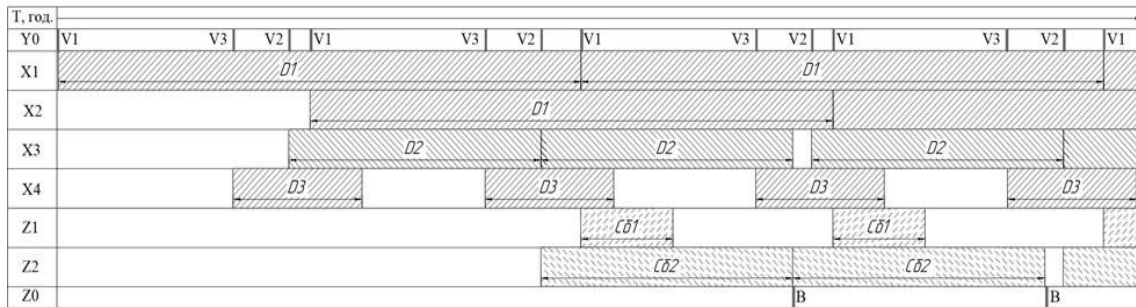
Значення D1, D2, D3 відповідають трудомісткості вал-шестерні, корпусу та кришок відповідно; Сб1 та Сб2 відповідають трудомісткості вузлового та загального складання. D1 = 512 хв., D2 = 249 хв., D3 = 126 хв. ; Сб1 = 90,2 хв. та Сб2 = 247 хв. Період моделювання T = 1100 хв. = 18,33 год.

Результати моделювання приведено на рис. 6.16.

### Варіант 1



### Варіант 2



### Варіант 3

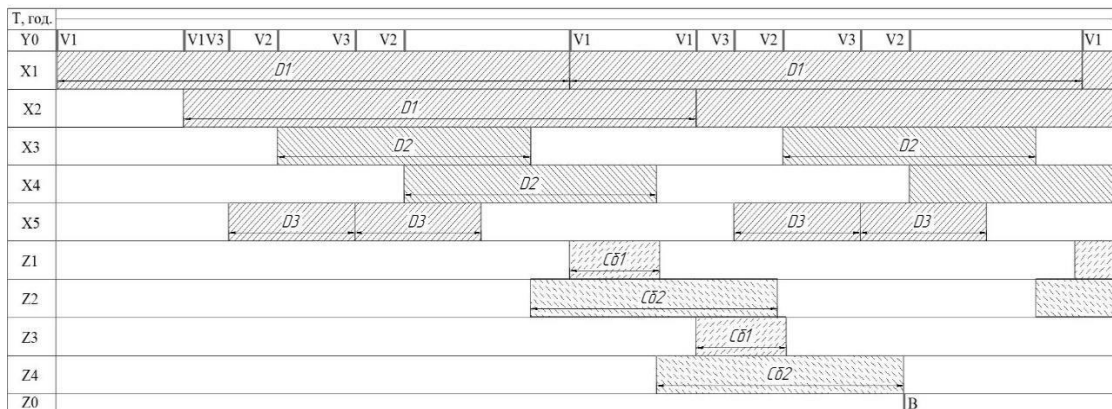


Рисунок 6.16 – Таблиця ІМ для варіантів

Для аналізу результатів було розраховано загальну трудомісткість для партії вузлів за умови, що партія складає 82 вузли:

- для 1-го варіанту:

$$T_{\text{п}} = T_{\text{Д}_1} \cdot 82 + T_{\text{скл}}, \quad (6.8)$$

де  $T_{\text{п}}$  – загальна трудомісткість партії вузлів;

$T_{\text{скл}} = 247 - 30 = 217$  хв. – трудомісткість складання вузла;

$T_{\text{Д}_1} = 512$  хв. – трудомісткість вал-шестерні.



$$T_{\pi} = 512 \cdot 82 + 217 = 42\,201 \text{ хв.} = 703,35 \text{ год};$$

- для 2-го варіанту:

$$T_{\pi} = T_{д_1} + T_{скл_1} + T_{скл} \cdot 81 + \frac{T_{пр}}{2} \cdot 80, \quad (6.9)$$

де  $T_{скл} = 247$  хв. – трудомісткість складання вузла;

$T_{скл_1} = 247 - 30 = 217$  хв. – трудомісткість складання вузла без підгото-

вки корпусу;

$T_{д_1} = 512$  хв. – трудомісткість вал-шестерні;

$T_{пр} = 15$  хв. – час простою ділянки загального складання (ділимо на 2,

бо простої з'являються лише на кожній другій операції).

$$T_{\pi} = 512 + 217 + 247 \cdot 81 + \frac{15}{2} \cdot 80 = 21336 \text{ хв.} = 355,61 \text{ год};$$

- для 3-го варіанту:

$$T_{\pi} = \frac{T_{д_1} \cdot 82}{2} + T_{скл_1} + T_{д_в}, \quad (6.10)$$

де  $T_{скл} = 247 - 30 = 217$  хв. – трудомісткість складання вузла;

$T_{д_1} = 512$  хв. – трудомісткість вал-шестерні.

$$T_{\pi} = \frac{512 \cdot 82}{2} + 217 + 126 = 21\,335 \text{ хв.} = 355,6 \text{ год.}$$

Отже, у порівнянні з базовим варіантом (вар. № 1), зниження трудомісткості та простоїв технологічного обладнання не менше ніж у два рази.

Крім того, підтверджується адекватність цільової функції, бо розрахований варіант (вар. № 2) забезпечує рівну продуктивність, у порівнянні з варіантом № 3, де використовується більше технологічного обладнання.

Тож для варіанту № 2 виконуються умови  $F \rightarrow \min$ ,  $T_0 \rightarrow \min$  та безперервна робота ділянки з не суттєвими простоями.

Після отримання результатів моделювання було розроблено проектну схему ділянки реконфігурованого комплексу (указана на листі графічної частини) та розраховано значення коефіцієнта закріплення операцій, який дорівнює 1,43.

#### **6.4 Підвищення різальних властивостей непереточуваних пластин для реконфігурованих виробництв**

Застосування технологій обробки виробів на основі використання електричних розрядів широко розповсюджується для технологічних цілей в умовах машинобудівного виробництва.

Інтенсивно розвиваються інтегровані технології модифікації властивостей поверхневого шару за рахунок послідовного здійснення різних за своєю фізичною сутністю методів впливу на поверхню виробу. Великий інтерес представляють технології підвищення міцності виробів разом зі збільшенням зносостійкості різальних інструментів у поєднанні з висковольтною розрядною обробкою традиційними джерелами енергії. Використовуючи різні фізичні явища й процеси, дослідженню питань у цій галузі присвятили свої роботи технічні наукові школи.

Технологічна система складається з підсистем деталі, інструмента, пристосування, верстата. Таким чином, у залежності від оброблюваної заготовки, матеріалу, форми, твердості, шорсткості, вибирається інструмент, режими його зміцнення, у залежності від напруги, тривалості впливу, відстані від електрода до інструмента, наявності середовища. Вибір інструмента обумовлений можливостями технологічного обладнання, його характеристиками та типом і залежить від режимів різання. Відповідно до цього

вибирається технологічне оснащення, яке характеризується точністю й зусиллям закріплення.

Основна ідея – вплив на технологічну систему насамперед за рахунок зміцнення технологічного інструмента. У результаті: підвищення стійкості й зниження зносу інструмента, підвищення економічної точності досягнення операційних розмірів, підвищення швидкості обробки, інтенсифікація процесу, зменшення витрат на придбання нового інструмента, підвищення продуктивності процесу разом зі зниженням енергетичних витрат, скорочення собівартості готової продукції, конкурентоспроможна ціна на ринку.

Інтегровані технології сприяють підвищенню якості інструменту, однак у цьому напрямку є значні резерви вдосконалення, особливий інтерес у яких представляють способи енергетичного впливу на робочі поверхні виробів. Процес підвищення зносостійкості технологічного інструменту веде до підвищення продуктивності, точності, інтенсифікації процесів і зниження собівартості, як наслідок – конкурентоспроможна ціна на ринку продукції. Необхідним є подальше вдосконалення процесів на основі підвищення стійкості технологічного інструменту за рахунок зменшення зносу, що виникає внаслідок термічного та силового впливу на матеріал інструмента на етапах операції зміни форми й розмірів заготовок.

Тому задача вирішення проблеми підвищення зносостійкості робочої поверхні технологічного інструменту шляхом його зміцнення на основі впливу високовольтних електричних розрядів є актуальною.

Вирішення завдання пошуку додаткових ресурсів із метою підвищення стійкості різальних інструментів для металообробки залишається актуальним, незважаючи на значні успіхи в цьому напрямку [95, 110, 28 та ін.]. Також, з'являються нові металеві матеріали, обробка яких вимагає оптимізації на змінених граничних умовах. Інтенсивно розвиваються інтегровані технології модифікації властивостей різальних пластин за рахунок послідовного здійснення різних за своєю фізичною сутністю методів впливу

на їхню робочу поверхню [64, 68, 10]. Вони теж потребують розширення спектру дієвих енергетичних джерел різної природи [10, 55, 106, 26, 113]. Тому завданням цієї роботи є визначення можливості використання для впливу на схильність до зміни величини зносу робочої частини пластин розрядами високої напруги.

Метою представленої роботи є створення й дослідження методу зменшення зносу різального інструмента на основі використання ефекту впливу високовольтного електричного розряду на його робочу поверхню.

Для досягнення поставленої мети були виконані такі завдання:

– обґрунтувати й експериментально підтвердити існування взаємозв'язку зношування різальних багатогранних непереточуваних пластин (у подальшому – пластин) та акустичних спектрів їхніх власних коливань;

– розробити експериментальний пристрій для забезпечення ефекту впливу високовольтного електричного розряду на пластини металорізального інструмента;

– розробити рекомендації щодо застосування розробленого методу для підвищення ефективності технологічних процесів обробки різанням.

Об'єктом дослідження є експериментальні зразки, представлені комплектом змінних різальних пластин фірми Pramet ADMX 070202SR-M, ADMX 070204SR-M, ADMX 070208SR-M, ADMX 070220SR-M у кількості 30 шт. Оцінка акустичних спектрів, що виникають у пластинах завдяки впливу «білого шуму», відбувається за їхніми амплітудно-частотними характеристиками сигналу (АЧХ). Джерелом «білого шуму» є п'єзоелектричний випромінювач, що збуджується широкосмуговим генератором із нормованим сигналом. Дослідження впливу високовольтних розрядів відбувається на основі оцінки взаємозв'язків амплітуд частотних ступенів спектрів амплітудно-частотних характеристик і ознак змін різальних пластин за допомогою пакетів прикладних програм: Frequency analyzer, Wavetool, Visual analyzer. Для оцінки ознак зносу використовуємо піксельне представлення, при цьому світловий діапазон розподілу кольорів

перетворюємо за допомогою карт Кохонена в пакеті програми Photoshop CS Extended.

Підтвердження існування взаємозв'язку змін властивостей різальних пластин і впливу на них високовольтного розряду з акустичними спектрами їхніх же власних коливань полягало в застосуванні вимірювань АЧХ до и після розрядної обробки різальних частин пластин та обробки даних із використанням кластерного аналізу. Це дозволило проводити ранжування зіставлення ознак зносу пластин на постійній довжині шляху різання зразків до й після розрядної обробки з прогнозованими за даними АЧХ ознаками їхнього зношування.

Підготовка до експериментального дослідження проводилася в чотирьох етапах:

1-й етап – створення експериментального стенду для обробки високовольтними розрядами електричного струму різальних частин пластин різального інструмента;

2-й етап – створення експериментального стенду для генерування «білого шуму» і вимірювань амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) збуджених ним власних коливань необроблених і оброблених різальних пластин та комп'ютеризованого мікроскопу Conrad Microscope-camera 1.3 Mega Pixel;

3-й етап – підготовка та налагодження токарного верстата 1K625;

4-й етап – підготовка заготовок шляхом попереднього зняття матеріалу.

На першому етапі був виготовлений експериментальний стенд, його зображення представлено на рис. 6.17.

Експериментальний стенд складається з блоку живлення, високовольтного перетворювача «Розряд 1» та пристосування для фіксації електрода на змінюваній висоті та встановлення різальних пластин.

Виконаний монтаж електричної схеми генерування «білого шуму» надав можливість здійснити попереднє вимірювання амплітудно-частотних характеристик власних коливань різальних пластин.



*Рисунок 6.17 – Експериментальний стенд генерування високовольтних розрядів*

Вимірювання здійснювалися наступним чином.

За допомогою програмного продукту Visual Analyzer, що встановлений на ПЕОМ, сигнал у вигляді «білого шуму» подається на збудливий п'єзовипромінювач. Цей сигнал перетворюється в механічні коливання, які сприймаються п'єзодатчиком, що встановлений на протилежній стороні зразка. За допомогою програмного пакету Visual Analyzer для кожної різальної пластини фіксуються оцифровані амплітудно-частотні характеристики їхніх власних коливань.

Підготовка до проведення експериментальних досліджень виконувалася шляхом підготовки циліндричної поверхні попереднім обточуванням (рис. 6.18).



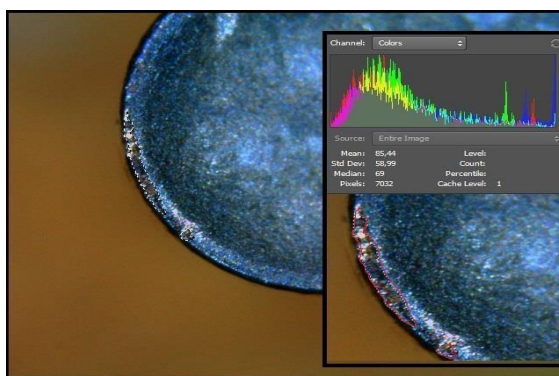
*Рисунок 6.18 – Підготовка заготовки шляхом попереднього обточування*

Послідовно, згідно з рандомізацією, оброблено заготовку різальними пластинами вихідних властивостей при однакових режимах різання:  $t = 0,2$  мм;  $s = 0,2$  мм/об.;  $n = 1260$  об./хв при довжині різання  $l = 285$  мм. Та визначено ознаки зношування для кожної пластини.

Оскільки площа зношування різальних пластин має вкрай невеликі розміри, то дослідження зорієнтовано на фіксування ознак зношування. Тому прийнято рішення визначати ознаку зношування різальних пластин за кількістю пікселів (рх), що приходяться на зону зношування, представлену на зображенні із загальною кількістю пікселів 327 680 рх. Умови фіксації зображень для всіх досліджених пластин однакові.

Програмне забезпечення дозволяє отримати гістограму розподілу кольорів на поверхні зношування та визначати кількість пікселів на визначених контурних ділянках.

Реалізовано новий підхід у порівнянні зношування різального інструмента методом піксельного представлення ознак зношування (рис. 6.19). Світловий діапазон розподілу кольорів визначається за допомогою карт Кохонена в пакеті програми Photoshop CS Extended.



*Рисунок 6.19 – Визначення ознак зношування за наступним піксельним вимірюванням*

Різальні пластини оброблялися високовольтним розрядом шляхом наведення на різальні поверхні інструменту високовольтного розряду струму з напругою 25 кВ. Між електродом і інструментом, при досягненні пробійної відстані, збуджується електричний розряд. У результаті відбувається розігрів і зміна властивостей поверхні зміцнюваних виробів.

Вплив високовольтним розрядом здійснюється на необроблену поверхню експериментального зразка (різальної пластини) упродовж 3, 5 і 7 хвилин. Електрод встановлено на відстані  $\Delta = 5, 7$  і  $10$  мм від поверхні пластини. Джерело високої напруги діє в межах  $25$  кВ.

Найбільший ефект досягається при найбільшій відстані електрода від робочої поверхні інструмента або поверхні іншого зміцнюваного виробу, при якій електричний розряд залишається стабільним.

Послідовно для кожної різальної пластини, зміцненої високовольтним розрядом, визначено амплітудно-частотні характеристики [196, 193, 60].

На кінцеві результати експерименту впливають змінні фактори: напруга струму високої частоти та тривалість їхнього впливу на експериментальні зразки.

Для забезпечення однорідності плану та врахування факторів проведення експерименту виконана рандомізація послідовності виконання досліджень та визначено коефіцієнт, враховуючий фактор зміни швидкості різання за рахунок зміни діаметру заготовки (6.11):

$$k = \frac{D_b}{D_n}, \quad (6.11)$$

де  $D_b$  – вихідний діаметр заготовки, а  $D_n$  – діаметр, відповідний заготовці згідно з номером оброблюваної пластини. Таким чином, ознака зношування дорівнюватиме

$$h = h_b \cdot k, \quad (6.12)$$

де  $h_b$  – визначена ознака зношування.

Оброблено заготовку різальними пластинами, зміцненими високовольтним розрядом, при режимах різання:  $t = 0,2$  мм;  $s = 0,2$  мм/об.;  $n = 1260$  об./хв,  $l = 285$  мм, у послідовності згідно з рандомізацією.

Визначено прояви ознак зношування в піксельному вимірюванні для кожної пластини, що піддавалася впливу високовольтного розряду.



За даними експериментальної частини сформовано таблицю результатів (табл. 6.2). У таблиці наведено номер платини N, діаметр обробленої заготовки D<sub>з</sub>, коефіцієнт рандомізації k, ознаки зношування в піксельному вимірюванні h.

Таблиця 6.2 – Результати експериментів

Пластини вихідних властивостей					Пластини, піддані впливу високовольтного розряду				
№	N	D <sub>з</sub> , мм	k	h	№	N	D <sub>з</sub> , мм	k	h
1	11	48	1	36960	1	1	48	1	22134
2	21	47,7	1,006	4 707,1	2	25	47,88	1,01	4 758,1
3	12	47,5	1,011	6 329,9	3	10	47,42	1,01	8 692,1
4	15	47,3	1,015	606,9	4	18	46,88	1,02	5 178,5
5	16	47,02	1,021	76 582,1	5	9	46,38	1,03	5 400,3
6	13	46,9	1,023	3366,7	6	8	46,22	1,03	14 203,7
7	2	46,7	1,028	9 966,5	7	5	46,04	1,04	6 881,7
8	29	46,5	1,032	9 411,8	8	20	45,45	1,05	3 891,3
9	20	45,95	1,045	6 578,3	9	17	45,34	1,06	4 679,9
10	7	45,7	1,50	1 5543	10	14	45,12	1,06	6 898,5
11	25	45,4	1,057	5 853,7	11	13	44,90	1,06	4 092,7
12	5	45,37	1,058	12 831,4	12	15	44,58	1,07	7 105,9
13	27	44,97	1,067	9 939,1	13	7	44,40	1,08	7 866,7
14	3	44,79	1,072	10 238,7	14	16	44,28	1,08	6777
15	6	44,5	1,078	11 875,2	15	22	44,17	1,08	4 408,6
16	24	44,13	1,088	12 341,2	16	19	43,90	1,09	2 272,6
17	26	43,95	1,092	13 354,1	17	30	43,71	1,09	3 566,5
18	10	43,71	1,098	9 928,1	18	23	43,46	1,10	2 946,9
19	17	43,51	1,103	7 665,9	19	27	43,13	1,11	2 751,7
20	8	43,31	1,108	11 734,8	20	6	42,84	1,12	624,9
21	22	43,13	1,113	7 937,916	21	2	42,39	1,13	2 802,4
22	1	42,90	1,119	12 693,9	22	29	42,26	1,13	2 562,8
23	28	42,70	1,124	13 422,8	23	24	41,91	1,14	3 806,5
24	4	42,40	1,132	13 070,1	24	28	41,71	1,15	3 361,5
25	19	42,21	1,137	16 769,6	25	4	41,27	1,16	5 445,1
26	9	42,13	1,139	10 425,3	26	26	41,01	1,17	8 207,5
27	14	41,84	1,147	5 964,4	27	12	40,62	1,18	2 089,8
28	30	41,64	1,153	11 018,1	28	11	40,31	1,19	6 965,1
29	18	41,44	1,158	12 360,5	29	21	40,20	1,19	2 059,9
30	23	41,20	1,165	11 997,2	30	3	40,08	1,19	3 832,9

Результати представлено у вигляді графіка зміни величини ознак зношування  $h$  для різальних пластин фірми Pramet (рис. 6.20, 6.21). На цих даних виконано кластерний аналіз.

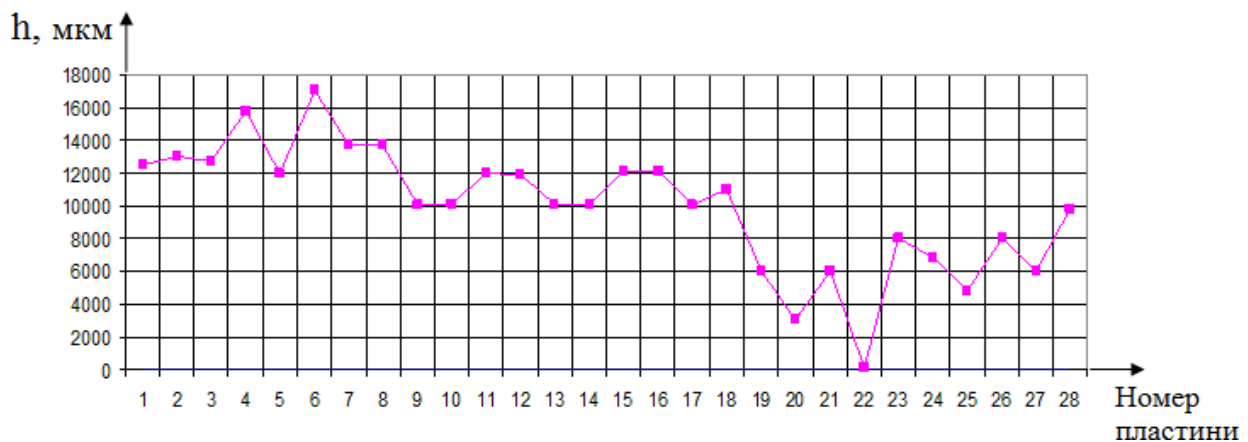


Рисунок 6.20 – Графік зміни величини зношування для пластин вихідних властивостей

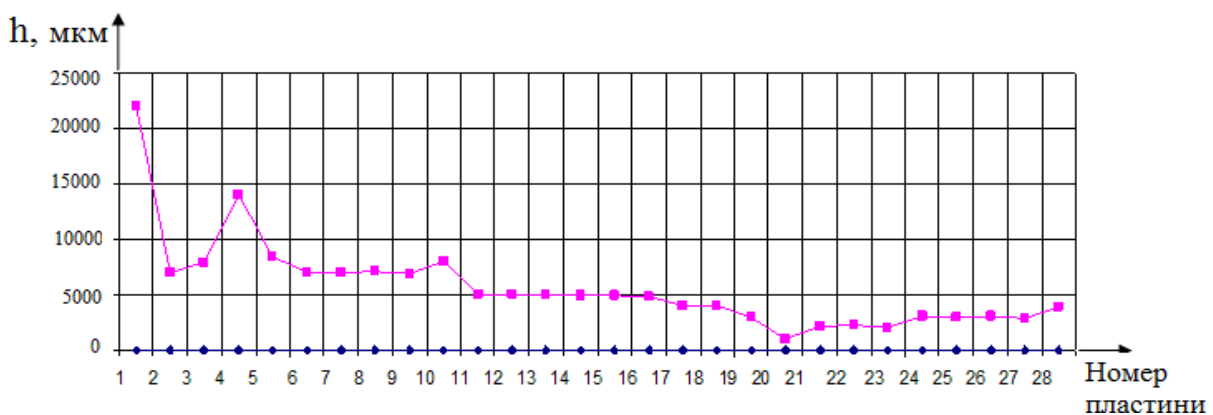


Рисунок 6.21 – Графік зміни величини ознак зношування для оброблених пластин

Для пластин вихідних властивостей створено кластери за їхніми порядковими номерами:

1-й кластер – 1, 4, 5, 7, 11, 16, 18, 19, 26, 28;

2-й кластер – 2, 3, 6, 8, 9, 10, 23, 24, 27, 30;

3-й кластер – 12, 13, 14, 15, 17, 20, 21, 22, 25, 29.

Після зміцнення пластин:

1-й кластер – 1, 5, 7, 8, 10, 11, 14, 15, 16, 26;

2-й кластер – 4, 9, 18, 25, 17, 22, 13, 20, 3, 24;

3-й кластер – 2, 6, 12, 19, 21, 23, 27, 28, 29, 30.

Для розрахунку середніх значень показників зносу та довірчого інтервалу було використано дані, що представлені у табл. 6.3 та 6.4.

Таблиця 6.3 – Вихідні дані для розрахунку показників розподілу ознак зношування пластин

	1-й кластер	2-й кластер	3-й кластер
Вихідні властивості пластин	a = 9751 $\sigma = 36620$ P = 0,95 $\Phi(t) = 0,475$ t = 0,63 n = 13	a = 17586 $\sigma = 22615$ P = 0,95 $\Phi(t) = 0,475$ t = 0,63 n = 8	a=13421 $\sigma = 9015$ P=0,95 $\Phi(t)=0,475$ t=0,63 n=9
Після зміцнення	a = 5312 $\sigma = 5163$ P = 0,95 $\Phi(t) = 0,475$ t = 0,63 n = 13	a = 6387 $\sigma = 3513$ P = 0,95 $\Phi(t) = 0,475$ t = 0,63 n = 8	a = 5346 $\sigma = 2406$ P = 0,95 $\Phi(t) = 0,475$ t = 0,63 n = 9

У таблиці наведені позначення: a – кількість пікселів (ознак зношування пластин);  $\sigma$  – середнє квадратичне розподілу ознак зношування пластин у кластері; P – рівень вірогідності,  $\Phi(t)$  – інтеграл вірогідності (інтеграл Лапласа); t – критерій Стьюдента; n – кількість пластин у кластері.

Таблиця 6.4 – Межі довірчого інтервалу

Вихідні властивості пластин	1-й кластер	2-й кластер	3-й кластер
	$9\ 118 < \alpha < 10\ 384$	$5\ 605 < \alpha < 12\ 549$	$11\ 528 < \alpha < 15\ 314$
Після зміцнення	$4\ 410 < \alpha < 10\ 384$	$5\ 605 < \alpha < 7\ 169$	$4\ 841 < \alpha < 5\ 851$

Таким чином, виконано кластерне групування різальних пластин за трьома показниками (ознака зношування, розподіл кольору пікселів, амплітудно-частотні характеристики).

Вихідні властивості пластин	1 кластер	2 кластер	3 кластер
	$9118 < \alpha < 10384$	$5605 < \alpha < 12549$	$11528 < \alpha < 15314$
Після зміцнення	$4410 < \alpha < 10384$	$5605 < \alpha < 7169$	$4841 < \alpha < 5851$

Кластерний аналіз дозволяє виявити в межах партії змінних багатогранних пластин найбільш схожі за властивостями виробу, що дає можливість формувати їх в окремі групи (комплекти), при цьому з більшою точністю гарантуючи однаковість умов обробки.

Підвищення стійкості різальних пластин для кожного з кластерів склало: 1-й кластер – у 1,8 раза; 2-й кластер – у 2,75 раза; 3-й кластер – у 2,51 раза. Загальне – 1,8 раза.

Метод впливу високовольтним розрядом на робочі поверхні різальних пластин не тільки дозволяє підвищити стійкість інструменту, але й забезпечує збільшення подібності властивостей різальних пластин одного комплекту.

Проведемо оцінку якості технологічного інструмента на основі ранжування за прогнозованим ступенем ознак їхнього зношування в піксельному вимірюванні.

Спосіб реалізації полягає в нейрмережевому моделюванні в програмному продукту NeuroPro 0.25 (рис. 6.22), а потім, для порівняння результатів, у Matlab R2011b (рис. 6.23). Створена нейронна мережа піддана навчанню на основі експериментально отриманих амплітудно-частотних характеристик (вхідні дані) та ознак зносу різальних пластин після обточування (вихідні дані).

За допомогою команди `sim(net,[..(амплітудно-частотні характеристики)])` у діалоговому вікні програми отримано прогнозоване значення ознак зношування пластини. Результати підтверджено роботою моделі у двох програмних продуктах.

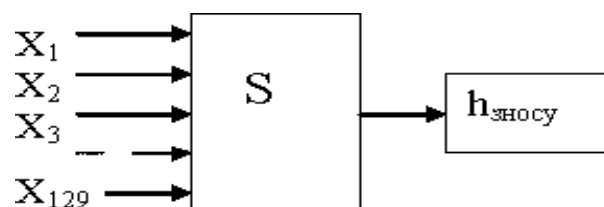


Рисунок 6.22 – Схематичне зображення моделі нейронної мережі для навчання в пакеті NeuroPro 0.25

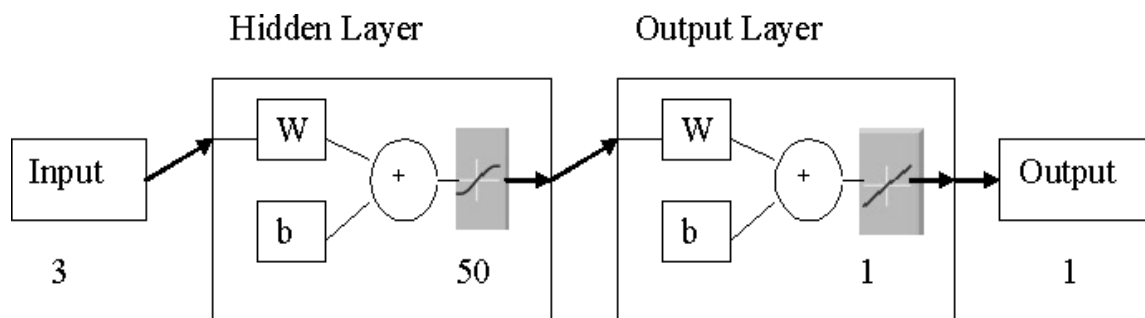


Рисунок 6.23 – Модель нейронної мережі відтворена в Matlab R2011b

Порівняльний аналіз моделі нейронної мережі в NeuroPro 0.25 та Matlab R2011b показав ідентичні результати та підтвердив, що запропонований метод дозволяє отримати прогнозоване значення величин ознак зношування пластини в залежності від амплітудо-частотних характеристик.

Представлений варіант обробки даних, на нашу думку, може дозволити в майбутньому провести оцінку якості різального інструмента.

Перевагами дослідження є те, що запропонований метод обробки високовольтним розрядом робочої поверхні пластин дозволяє з метою зменшення їхнього зношування додати його до переліку засобів і методів дій, що впливають на пластини різального інструменту. Завдяки групуванню пластин із використанням кластерного аналізу ознак зношування пластин у піксельному вимірюванні отримано підтвердження їхнього зменшення в середньому в 1,8 раза.

Недоліком запропонованого методу обробки пластин високовольтним розрядом є необхідність дотримання заходів безпеки при використанні електричного струму високої напруги.

Представлені результати дозволяють припустити, що високовольтна розрядна обробка непереточуваних пластин може сприяти зниженню їхнього зношування при металообробці. Крім того, високовольтна розрядна обробка дозволяє зменшити розсіювання ознак зношування пластин у порівнянні з необробленими. Оскільки витрати на забезпечення технологічного

впливу на різальну частину пластини вимагають не більше 8...10 Вт потужності енергетичного джерела, таке припущення, на нашу думку, має перспективу практичного застосування для зменшення зношування багатогранних непереточуваних пластин для різального інструменту.

Обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість оцінки якості різальних пластин за допомогою акустичних спектрів власних коливань. Для збудження власних коливань різального інструменту в роботі запропоновано вплив широкопasmовою (20...20 000 Hz) збудливою дією у вигляді «білого шуму».

Розроблено метод підвищення стійкості фрези на основі використання ефекту впливу високовольтного електричного розряду. Підвищення стійкості різальних пластин для кожного з кластерів склало: 1-й кластер – у 1,8 раза; 2-й кластер – у 2,75 раза; 3-й кластер – у 2,51 раза. Загальне – 1,8 раза. Розроблено рекомендації щодо впровадження методу підвищення стійкості фрез за допомогою високовольтного електричного розряду. Вплив високовольтним розрядом здійснюється на необроблену поверхню різальної частини інструмента впродовж 5 хвилин на відстані 7 мм від поверхні з напругою в межах 25 кВ.

## **6.5 Акустична діагностика багатоболтових з'єднань для складання МПС на модульному принципі**

Організація виробництва на основі реконфігурації структури механо-складальних цехів і ділянок потребує вдосконалення неруйнівних методів контролю якості з'єднань при виконанні монтажних і демонтажних робіт на допоміжних складальних операціях забезпечення виробничих ділянок верстатним обладнанням із МПС системами інтелектуального оперативного керування цим обладнанням.

Для цього запропонований метод контролю якості багатоболтових з'єднань з використанням акустичних спектрів власних їхніх коливань. Підвищення якості багатоболтових з'єднань дозволяє підвищувати надійність МПС.

Метою експериментальних досліджень є доведення перспективності запропонованого підходу, який ґрунтується на припущенні про підвищення рівномірності затягування багатоболтових з'єднань за допомогою застосування аналізу акустичного спектру як функції відклику від «білого шуму» об'єкту.

Для вирішення задач поліпшення якості контролю були поставлені наступні завдання.

Об'єктивна оцінка працездатності та безпеки технічних об'єктів, що містять різьбові з'єднання, у більшості випадків неможлива без наявності достовірної інформації про діючі в з'єднаних деталях зусиллях. Найпростіші пристрої контролю зусилля затягування, такі як динамометричні ключі, мають великі похибки.

Основне завдання вхідного контролю – запобігання попадання у виробництво неякісної продукції, пропонованої на контроль.

На рис. 6.24 представлена теоретична схема контролю болтового з'єднання, що складається з двох пластин 2, скріплених болтом 1 і гайкою 3. За допомогою випромінювача 5 на деталь подається «білий шум», який фіксується датчиком 4 у вигляді амплітудного спектру частот. Для визначення власної частоти болта визначаємо його масу. Відбитий спектр багатоболтового з'єднання дозволяє визначити резонансну частоту під напругою. Змінюючи силу затягування, можна визначити характер зміни резонансних частот болтового з'єднання при тому чи іншому сталому значенні.

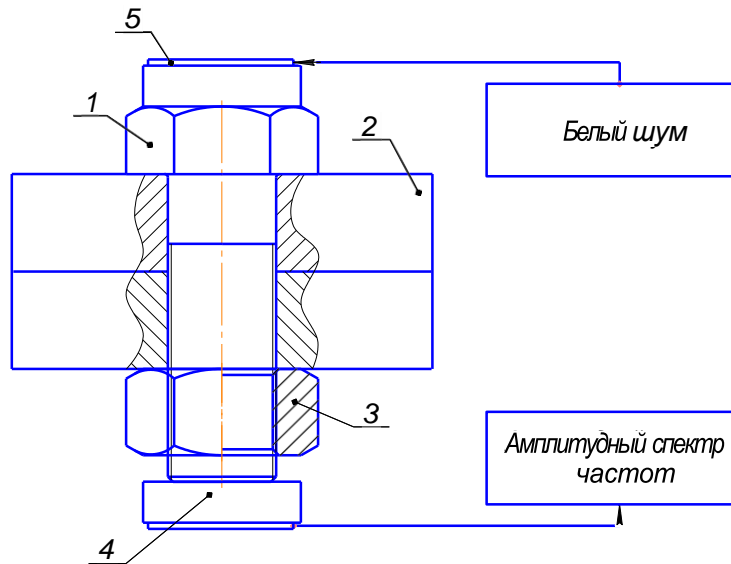


Рисунок 6.24 – Теоретична схема контролю болтового з'єднання

Експериментальні дослідження ґрунтуються на припущенні, що при затягуванні одного болта інші розкручуються на випадкову величину. Для цього необхідно дослідити вплив 1-го затягнутого болта на інші, а також подальше затягування інших і їхній вплив на затягнуті й розкручені болти.

Експериментальний стенд, наведений на рис. 6.25, складається з валу 1, на якому кріпиться кришка 6 та стакан 5 за допомогою болтів 2. На вал 1 установлюється випромінювач «білого шуму» 3, на болт 2 установлюється аналізатор відбитого акустичного потоку власних коливань з'єднання.

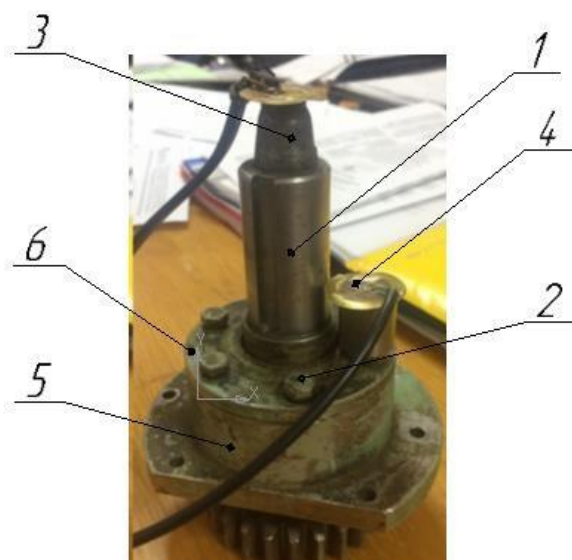


Рисунок 6.25 – Експериментальна установка



Для збирання прецедентних даних усі болти закручуються на один і той же кут у певній послідовності: 1 – 146325, 2 – 153642, 3 – 413652, 4 – 642531, 5 – 345612. Для тесту вилучено 20 % усіх вимірювань – вони не були використані для побудови обчислювальної системи розпізнавання.

При кодуванні вхідних даних наступним чином проведені багаторазові випробування.

000000 – усі болти не навантажені;

000001 – закручується перший болт;

000011 – закручується другий болт;

000111 – закручується третій болт;

001111 – закручується четвертий болт;

011111 – закручується п'ятий болт;

111111 – усі болти закручено;

111112 – усі болти закручено, перший закручується по другому колу.

111122 – закручується другий болт по другому колу;

111222 – закручується третій болт по другому колу;

112222 – закручується четвертий болт по другому колу;

122222 – закручується п'ятий болт по другому колу;

222222 – усі болти закручено по другому колу.

**Де посилання на рис. 6.26?**



**Рисунок 6.26** – Діаграма вихідних даних

Отримані дані за допомогою комп'ютерного емулятора аналізатора спектру частот ANALYSER, який має відкритий код, дозволили побудувати ідентифікаційну модель об'єкту для прогнозування стану напруги кожного болта в багатоболтовому з'єднанні. Для цього значення експериментальних даних були використані у якості вхідних для побудови математичної моделі. У результаті побудована тришарова обчислювальна мережа з початковою кількістю 100 елементів на кожному з трьох слоїв із наступною оптимізацією мережі, де вихідними симптомами були показники рівня шуму (X1–X129), показники рівня затягування (Y1–Y6), а кінцевими симптомами – порядок затягування болтів (N1–N6).

Вербальний опис нейроподібної мережі має наступний вигляд:

Поля бази даних (початкові симптоми):

X39; X109

Поля бази даних (кінцеві синдроми):

N1; N2; N3; N4; N5; N6

Передобробка вхідних полів БД для подачі мережі:

$X39=(X39-55,275)/2,004999$

$X109=(X109-52,885)/1,914999$

Функціональні перетворювачі:

Сигмоїда1(A)=A/(0,1+|A|)

Сигмоїда2(A)=A/(0,1+|A|)

Сигмоїда3(A)=A/(0,1+|A|)

Синдромів першого рівня має – 58

Синдромів другого рівня – 64

Синдромів третього рівня – 62

Постобробка кінцевих синдромів:

$N1=((N1*5)+7)/2$

$N2=((N2*4)+6)/2$

$N3=((N3*4)+8)/2$

$N4=((N4*3)+9)/2$

$$N5 = ((N5 * 4) + 6) / 2$$

$$N6 = ((N6 * 5) + 7) / 2$$

Значимість впливу вихідних даних представлена на рис. 6.27, 6.28.

Сигнал	Значимість
X36	0
X37	0
X38	0
X39	1
X40	0
X41	0
X42	0

Рисунок 6.27 – Значимість вихідних даних

Сигнал	Значимість
X107	0
X108	0
X109	0.9385052
X110	0
X111	0
X112	0

Рисунок 6.28 – Значимість вихідних даних

На основі отриманих даних, за допомогою прогнозної моделі створена система контролю на базі аналізу спектру, як функції відклику від «білого шуму». Цей метод дозволяє оцінити рівень затягування та спрогнозувати послідовність затягування болтів, щоб при цьому вони були однаково затягнуті.

Таблиця 6.5 – Результат тестування нейроподібної мережі

N1	N2	N3	N4	N5	N6
3,211379	3,861401	4,743045	6,245674	1,230555	2,141108
1,490457	4,866484	5,183563	3,392358	1,867153	3,839123
1,061216	4,5055	5,064695	3,816196	2,44783	3,838613
2,852069	4,256382	4,819934	5,795181	1,210331	2,365543
3,024577	4,099837	4,995338	6,013463	0,9204113	2,319118

З табл. 6.5 виходить, що ідентифікаційній моделі вдалося спрогнозувати послідовність затягування, аналізуючи при цьому лише рівень шуму (N1–N6 – порядковий номер болта). Таким чином, було доведено, що за допомогою аналізу спектру, як функції відклику від «білого шуму», можна діагностувати стан багатоболтового з'єднання. Можливості акустичної діагностики рівномірності затягування багатоболтових з'єднань дозволяють її автоматизувати і тим самим створюють перспективи для забезпечення якості монтажу-демонтажу устаткування реконфігурованих виробництв на основі МПС.

## ВИСНОВКИ

1. Уперше теоретично й експериментально встановлено, що:

– динамічні характеристики МПС впливають на ампліудно-частотні характеристики механізму верстата-робота й викликають зсув узагальненого центру мас у межах 1...2 мм. Отримано підтвердження припущення, що ампліудно-частотна характеристика МПС має інформацію про координати рухомих ланок і точність їхніх переміщень і може використовуватися для побудови системи управління точністю переміщень виконавчими ланками МПС;

– резонансні коливання деталей і механізмів машин містять інформацію про їхні розмірні і якісні характеристики. Показано, що вилучення інформації про зміст резонансних коливань деталей слід виконувати на основі аналізу їхніх ампліудно-частотних спектрів. Запропоновано методику вимірювання числових значень ампліудно-частотних спектрів резонансних коливань об'єктів;

– можливість управління механічною обробкою на основі еталонної моделі на глибоких нейроподібних мережах каскадної архітектури; застосування neural control-технологій дозволяє підвищити продуктивність механічної обробки за рахунок підвищення точності обробки шляхом зміни положення й траєкторії руху різальної кромки інструменту з урахуванням геометричної неточності верстата й температурних деформацій, а також зміни характеристик жорсткості верстата протягом терміну використання.

2. Уперше запропоновано:

– фасетну систему класифікації МПС, на основі якої показано безліч варіантів їхніх структур. Сполучення класифікаційних ознак у межах їхніх змінюваних діапазонів дає можливість прогнозувати можливості обладнання механоскладальних цехів на основі МПС;

– принципи оптимізації траєкторії переміщення виконавчої ланки МПС: принцип оптимізації траєкторії за точністю за рахунок мінімізації

суми переміщень рухомих елементів плечей МПС при обмеженні відхилень від проєктованої траєкторії в межах похибки менше дискрети кожного окремого крокового приводу; принцип оптимізації точності позиціонування виконавчої ланки МПС шляхом мінімізації часу позиціонування, у тому числі за рахунок функціонального управління циклами позиціонування приводами рухливих плечей;

– методику побудови еталонних моделей на основі спектрального аналізу функцій поглинання механізмом верстата-робота збудженої акустичною хвилею «білого шуму»;

– методику побудови ідентифікаційної математичної моделі, що відображає взаємозв'язок спектральних характеристик резонансних коливань деталей із розмірами й показниками якості поверхні; встановлено, що для оцінки значень розмірів та показників якості поверхні деталей достатньо мати інформацію про відносні значення амплітуд тільки певних частотних діапазонів;

– оснащення механоскладальних цехів ділянками з монтажу-демонтажу верстатів-роботів для забезпечення організації виробничої системи за принципом «бережливого виробництва»;

– спосіб контролю елементів складання обладнання з використанням болтових з'єднань, які можуть вбудовуватися в автоматизовані виробничі системи й забезпечувати контроль якості складання;

- спосіб зниження зношування застосовуваного технологічного, зокрема – різального інструменту, у тому числі зміцненого з нанесенням зміцнюючих покриттів, на основі гіпотези про вплив високовольтного розряду на експлуатаційні властивості робочих поверхонь інструменту. Показана можливість підвищення стабільності властивостей обробленого таким чином інструменту.

3. Отримали подальший розвиток:

– методи аналізу структури МПС із використаних ознак пов'язаності графів МПС, матриць їхньої інцидентності й запропонованого методу потенціалів;

– методику проектування механічних ланок виконавчих механізмів при застосуванні принципу мультиплікативності рухомих плечей МПС, що дозволяє отримати збільшення передавального відношення виконавчого механізму в 3–5 разів. Запропоновано методики розрахунків при конструюванні мультиплікативного рухомого плеча МПС;

– концепцію механоскладального виробництва на базі верстатів із МПС та організації механоскладальних цехів на основі реконфігурації ділянок механічної обробки й складання. Показано, що в порівнянні з гнучким виробництвом збирати заново механоскладальне обладнання на нові МПС дозволяють досягати підвищення продуктивності до 3 разів при забезпеченні максимального завантаження виробничих площ.

4. За результатами виконання роботи запропоновано:

– нові структури складових МПС і доведено, що такі структури мають графи з пов'язаністю, Ейлерові й Гамільтона цикли, що охоплюють виконавчі ланки. Це підтверджує Запропоновано методику розрахунків похибки позиціонування виконавчої ланки МПС. Показано, що в межах робочої зони МПС розрахункова похибка на прикладі структури механізмів із МПС становить від 20 % до 80 % від величини дискрети кожного приводу в напрямку рухомого плеча МПС;

– методику визначення граничних значень кутів повороту каретки виконавчого механізму при однакових траєкторіях переміщення виконавчої ланки МПС;

- рекомендації про створення апаратних засобів автоматизації управління складними технологічними машинами, такими як верстати з МПС, для підвищення точності позиціонування виконавчих механізмів, забезпечення їхньої динамічної настройки й оптимізації траєкторій переміщень робочих органів обладнання.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Abd Rahman A., Brookes N.J., Bennett D.J. The precursors and impacts of BSR on AMT acquisition and implementation. *IEEE Transactions on Engineering Management* 2009; 56(2). P. 285–297.
2. Ahmed N., Mitrofanov A. V., Babitsky V. I., Silberschmidt V. V. Анализ реакции материала на нагрузку ультразвуковыми вибрациями при точении сплава Inconel 718. Analysis of material response to ultrasonic vibration loading in turning Inconel 718. *Mater. Sci. and Eng. A*. 2006. 424, N 1–2. – С. 318–325. АНГЛ.
3. Alers O. Ultrasonic Techniques for Measuring the Strength of Adhesive Bonds / Alers O., Flynn R., Bukkly M. // *Materials Evaluation*. – 1977. – V. 35, N 4. – P. 77–84.
4. AlGeddawy T., ElMaraghy H. A model for co-evolution in manufacturing based on biological analogy. *International Journal of Production Research* 2011; 49(15). – P. 4415–4435.
5. Andersen A., Rösiö C., Bruch J., Jacksonc M. Reconfigurable Manufacturing – An Enabler for a Production System Portfolio Approach. *Procedia CIRP*, Volume 52, 2016. – P. 139–144.
6. Aubry S. Breathers in nonlinear lattices: Existence, linear stability and quantization // *Physica D*. – 1997. – Vol. 103. – P. 201–250.
7. Automation Studio. URL: <http://www.automationstudio.com/>
8. Beaman, J. J. Solid Freeform Fabrication / J. J Beaman. – An Historical Perspective. The University of Texas. Austin, Texas. – 2007. – 30–35 p.
9. Beer S. *Cybernetics and Management*, English Univ. – London: Press, 1959. – 280 p.
10. Binder M., Klocke F., Lung D. Tool wear simulation of complex shaped coated cutting tools // *Wear*. № 5. 2015. P. 600–607.
11. Bonev, I. (2001) Delta Parallel Robot – the Story of Success, Online article available at <http://www.parallemic.org/Reviews/Review002.html>



12. Bonev, L. A. Geometric Analysis of Parallel Mechanisms : dissertation / Ph. D L. A. Bonev – Canada : University of Laval, Quebec, 2002.
13. Bruch J., Bellgran M. Design information for efficient equipment supplier/buyer integration. *Journal of Manufacturing Technology Management* 2012; 23(4). P. 484–502.
14. Bruch J, Bellgran M, Characteristics affecting management of design information in the production system design process. *International Journal of Production Research* 2013; 51(11). P. 3241–3251.
15. Bruch J, Bellgran M, Integrated portfolio planning of products and production systems. *Journal of Manufacturing Technology Management* 2014; 25(2). P. 155–174.
16. Cambol, J. 3-D Printing Manufacturing Process is Here// Independent global forum for the Unmanned Aircraft Systems community. – *UAS Vision* № 3. – 1997. – 18–22 p.
17. Campbell J.P. Modeling the performance prediction problem in industrial and organizational psychology / J.P. Campbell, M.D. Dunnette, L.M. Hough // *Handbook of Industrial and Organizational Psychology*. Palo Alto: Consulting Psychologists Press, 1990. – Second edition, vol. 1. – P. 687–732.
18. Chen, L., Xi, F. and Macwan, A., 2005, «Optimal Module Selection for Preliminary Design of Reconfigurable Machine Tools», *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 127(1). P. 104–115.
19. Clavel, R. (1991) Conception d'un robot parallèle rapide à 4 degrés de liberté. Ph.D. Thesis, EPFL, Lausanne, Switzerland Bonev, I. (2001) Delta Parallel Robot – the Story of Success, Online article available at <http://www.parallemic.org/Reviews/Review002.html>
20. Clavel, R. DELTA, a fast robot with parallel geometry / R. Clavel // In 18th Int.Symp. on Industrial Robot. – Lausanne. – 1988. – 26–28 April. – P. 91–100.
21. Cooper R., Edgett S., Kleinschmidt E. Portfolio management for new product development: results of an industry practices study. *R&D Management* 2001; 31(4). P. 361–380.

22. Daniel, L. M. Fatigue Damage Monitoring in Composites by Ultrasonic Mapping / L. M. Daniel, S. W. Schramm, T. Leber // *Materials Evaluation*. – 1981. – V. 39, N 9. – P. 834–839.

23. Dashchenko, A. I. Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories / A. I. Dashchenko // *Springer Series in Advanced Manufacturing*. – 2009. – 757 p.

24. David, L. A. Brief History of Additive / L. A. David Bourella, J. Joseph Beaman, Jr.a, Ming C. Leub and W. David Rosenc. – *Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead*. RapidTech. – 2009. – 328 p.

25. Do, W.Q. D. Invers Dynamic Analysis and Simulation of a Platform Type of Robot. / W.Q. D. Do, D.C.H. Yang // *J. Robot. Syst.* – 1988. – № 3.– P. 209–227.

26. Dreval, A., Vasilev V., Vinogradov D., Malkov O. Measuring Diagnostic Stand for Experimental Researches in Technology Machining. // *Nauka i Obrazovanie*. № 12, 2014. P. 22–58.

27. Dutta, B. Additive Manufacturing by Direct Metal Deposition // *Advanced materials & processes*. 2011. № 5. P. 33–36.

28. Dutta, B. et. al. Additive Manufacturing by Direct Metal Deposition *ADVANCED MATERIALS & PROCESSES • MAY*. – 2011. – 33–36 p.

29. Dutta, B. et. al. Additive Manufacturing by Direct Metal Deposition *ADVANCED MATERIALS & PROCESSES • MAY*. – 2011. – 33–36 p.

30. Eisenhardt KM, *Building Theories from Case Study Research*. *Academy of Management Review* 1989; 14(4). P. 532–550.

31. ElMaraghy H, *Changing and Evolving Products and Systems - Models and Enablers*, in *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*, ElMaraghy H, Editor. Springer-verlag: London; 2009. P. 25–46.

32. Farlow S.J. *Self-organizing Methods in Modeling (Statistics: Textbooks and Monographs)*. – New York and Basel: Marcel Dekker Inc. – Vol. 54. – 1984.

33. Fngelo, H. C. *Powder Metalurge: Science, technology and application*. H. C. Fngelo, R. Subramanian– New Dehli. – 2009. – 128 p.

34. Friesecke, G., Wattis, J. Existence theorem for solitary waves on lattices / G. Friesecke, J. Wattis // *Commun. Math. Phys.* – 1994. – Vol. 161. – P. 391–418.
35. Gwinnett, J. T. Amusement devices US Patent № 1, 789, 680, January 20, 1931.
36. Herve, J. M. Group mathematics and parallel link mechanisms / J. M. Herve // *In 9th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Milan.* – 1995. – P. 2079–2082.
37. High precision parallel robots for micro-factory applications / Clavel R. and others // *In 2nd Int. Colloquium, Collaborative Research Centre 562, pages 85–296, Braunschweig, May, 10–11, 2005.*
38. Hohmann, M. Production methods and applications for high-quality metal powders and sprayformed products / M. Hohmann, G. Brooks, C. Spiegelhauer *Produktionsmethoden und Anwendungen für qualitativ hochwertige Metallpulver und spruhkompaktierte Halbzeuge. Stahl und Eisen.* – 2005. – 258 p.
39. <http://tekhnosfera.com/kinematicheskiy-i-silovoy-analiz-ploskih-mehanizmov-parallelnoy-struktury-s-uchetom-osobyh-polozheniy-i-algoritmov-upravl>
40. IBAG Switzerland AG <http://www.sergeev-hsc.de/47361/40055.html>
41. Iooss G., Kirschgässner K. Traveling waves in a chain of coupled nonlinear oscillators / G. Iooss, K. Kirschgässner // *Commun. Math. Phys.* – 2000. – Vol. 211. – P. 439–464.

42. Isaksen, A., Kalsaas B.T., Suppliers and strategies for upgrading in global production networks: the case of a supplier to the global automotive industry in a high-cost location. *European Planning Studies* 2009; 17(4). P. 569–585.

43. Ivahnenko, G. A. Self-organization of neuronal with active neurons for effects of nuclear test explosions forecasting's // *System Analysis modeling Simulation (SAMS)*. – 1995. – № 20. – P. 107–116.

44. Ivakhnenko, A. G., Müller J.-A. Self-organization of nets of active neurons // *SAMS*. – 1995. – № 1–2. – P. 93–106.

45. Jackson G. The Nondestructive Testing of Adhesive Bonded Structural Assemblies for Aircraft / Jackson G. // *The British Journal of NDT*. – 1972. – V. 14, N 5. – P. 145–146.

46. Jennings N., Paratin P., Jonson M. Using Intelligent Agents to Manage Business Processes // *The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology: Proceedings of the First Intern. Conference*. London (UK). – 1996. – P. 345–376.

47. Jovane, F. Molinari Tosatti L. Design Issues for Reconfigurable PKMs / Jovane F., Negri S. P., Fassi T. // *3-rd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar: Development Methods and Application Experience of Parallel Kinematics*. Chemnitz, 2002. – P. 69–82.

48. Kianinejad K., Uhlmann E., Peukert B. The influence of the cooling conditions on the cutting tool wear and the chip formation mechanism // *Procedia CIRP*. № 26, 2015. P. 533–538.

49. Kline, R. A. Ultrasonic Guided-Wave Monitoring of Fatigue Damage Development in Bonded Joints / Kline R. A., Hashemi D. // *Materials Evaluation*. – 1967. – V. 45, N 4. – P. 1076–1082.

50. Koren Y. General RMS Characteristics. Comparison with Dedicated and Flexible Systems, in *Reconfigurable Manufacturing System and*

Transformable Factories, Dashchenko AI, Editor. Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg; 2007. P. 27–46.

51. Koren Y., Heisel U., Jovane F., Moriwaki T., Pritschow G., Ulsoy G., Van Brussel H. Reconfigurable manufacturing systems. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 1999; 48(2): P. 527–540.

52. Kovalevskyy, S. V. Acoustic Monitoring with Neural Network Diagnostics / S. V. Kovalevskyy, O. S. Kovalevska // *American Journal of Neural Networks and Applications*. – 2015. – Vol. 1, No. 2. – P. 39–42. – doi: 10.11648/j.ajna.20150102.12

53. Kovalevskyy, S. V. Acoustic Monitoring with Neural Network Diagnostics // *American Journal of Neural Networks and Applications*. 2015. № 2. P. 39–42.

54. Kreiner C.-F., Zimmer J. Heteroclinic travelling waves for the lattice sine-Gordon equation with linear pair interaction / C.-F. Kreiner, J. Zimmer // *Discrete and continuous dynamical systems*. – Vol. 25, Number 3, November. – 2009. – P. 1–17.

55. Kristensen S., Horstmann S., Klandt J., Lohner F. and Stopp A. Human-friendly interaction for learning and cooperation // *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seoul, Korea, 2001. IEEE. – P. 2590–2595.

56. Kruglov, I. A. Neural networks modeling of multivariable vector functions in ill-posed approximation problems / I. A. Kruglov, O. A. Mishulina // *Journal of Computer and System Sciences International*, 2013. – Vol. 52. No. 4. – P. 503–518.

57. Kruglov, I. A. Neural networks modeling of multivariable vector functions in ill-posed approximation problems // *Journal of Computer and System Sciences International*. 2013. 52. № 4. P. 503–518.

58. LMS Imagine.Lab Amesim. Integrated simulation platform for multi-domain mechatronic systems simulation. URL:

[http://www.plm.automation.siemens.com/en\\_us/products/lms/imagine-lab/amesim/index.shtml](http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/lms/imagine-lab/amesim/index.shtml)

59. Luo M., Luo H., Zhang D., Tang K. Improving tool life in multi-axis milling of Ni-based superalloy with ball-end cutter based on the active cutting edge shift strategy // Journal of Materials Processing Technology. №2. 2018. P. 105–115.

60. MapleSim . URL: <http://www.maplesoft.com/>

61. MapleSim . URL: <http://www.maplesoft.com/>.

62. Mehrabi M.G., Ulsoy A.G., Koren Y. Reconfigurable manufacturing systems: Key to future manufacturing. Journal of Intelligent Manufacturing 2000; 11(4): p. 403–419.

63. Merlet J.-P. Parallel Robots. – Springer-Verlag New York Inc., 2006. – 394 p.

64. Modelica. URL: <https://modelica.org/tools>

65. Niaritsiry, F-T. Study of the source of inaccuracy of a 3 dof flexure hinge-based parallel manipulator / F-T. Niaritsiry, N. Fazenda, R. Clavel // In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, New Orleans, April, 28–30, 2004. – P. 4091–4096.

66. Parenti-Castelli, V. On the joint clearance effects in serial and parallel manipulators / V. Parenti-Castelli, S. Venanzi // In Workshop: Fundamental issues and future directions for parallel mechanisms and manipulators, pages 215–223, Qu'ebec, October, 3–4, 2002.

67. Pat. US 6,680,456 B2 ION FUSION FORMATION / Robbie Adams.- Jan. 20, 2004.

68. Pat. US № 5707419 Method of production of metal and ceramic powders by plasma atomization / Tsantrizos P. G. et. al. – 1998.

69. Paynter, H. Bond Graphs and Diakoptics, *The Matrix Tensor Quarterly*, 19(3), 1969, pp.104–107.
70. Paynter, H. Discussion Regarding «State-Space Formulation for Bond Graph Models of Multi-Port Systems» by R.C. Rosenberg, *Trans. of the ASME, J. of Dynamic Systems Measurement and Control*, 93(2), 1971, pp.123–125.
71. Paynter, H. *Hydraulics By Analog – An Electronic Model of a Pumping Plant* J. Boston Society of Civil Engineering, July 1959, pp.197–219.
72. Petrenko, Y. I. Research of algorithms and development of modeling and simulation technique of automatic control systems in 20-sim / Y. I. Petrenko // *Матеріали XVII науково-технічної конференції студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів Запорізької державної інженерної академії. – Запоріжжя : ЗДІА, 2013. – С. 48–49.*
73. Pilarski, A. Ultrasonic Evaluation of the Adhesion Degree in Laminated Joints / A. Pilarski // *Materials Evaluation*. – 1985. – V. 43, N 6. – P. 765–770.
74. Pott, A. A new approach to error analysis in parallel kinematic structures / A. Pott, M. Hiller // *In ARK, Sestri-Levante, June 28 – July 1, 2004.*
75. Pritschow, G. Influence of the dynamic stiffness on the accuracy of PKM / G. Pritschow, C. Eppler, T. Garber // *In 3rd Chemnitzer Parallelkinematik Seminar, Chemnitz, April, 23–25, 2002. – P. 313–333.*
76. Reconfigurable Manufacturing Systems/ Y. Koren, U. Heisel, F. Jovane, T. Moriwaki, G. Pritsehow, G. Ulsoy, H. Van Brussel // *Annals of the CIRP № 48. – 1999. – №2. – P. 527–540.*
77. Roze, J. The Fisher Linear Discriminant Function for Adhesive Bond Strength Prediction / J. Roze, G. Thomas // *The British Journal of NDT. – 1979. – V. 21, N 3. – P. 135–139.*
78. Schliekelmann, R. Nondestructive Testing of Bonded Joints. Recent Developments in Testing Systems / R. Schliekelmann // *Nondestructive Testing. – 1975. – V. 8. N 2. – P. 100–103.*
79. Sellgren, U. Modeling of mechanical interfaces in a systems context / U. Sellgren // *In Int. ANSYS Conf., Pittsburgh, April 2002.*

80. Shannon, C. A. Mathematical Theory of Communication. Bell System Tech. J., 1948, no. 27, pt. I., 379–423; pt. II., 623–656.
81. Siemens 2SP1253-1 [siemens@siemens-ag.com.ua](mailto:siemens@siemens-ag.com.ua)
82. SimulationX. URL: <http://www.simulationx.com/>
83. Smets D., Willem M. Solitary waves with prescribed speed on infinite lattices / D. Smets, M. Willem // J. Funct. Anal. – 1997. – Vol. 149. – P. 266–275.
84. SolidWorks. URL: <http://www.solidworks.com/>
85. Stancioiu A., Csofu F. Research on increasing active life of cutting tools // Fiabilitate și Durabilitate. 2012. № 1. P. 212–217.
86. Stepashko, V. S. GMDH Algorithms as Basis of Modeling Process Automation after Experimental Data // Sov. J. of Automation and Information Sciences. – 1988. – Vol. 21. – № 4. – P. 43–53.
87. Stepashko, V. S. Structural Identification of Predictive Models under Conditions of a Planned Experiment // Sov. J. of Automation and Information Sciences. – 1992. – Vol. 25. – № 1. – P. 24–32.
88. Stock G. N., Tatikonda M.V. External technology integration in product and process development. International Journal of Operations & Production Management 2004; 24(7): p. 642–665.
89. Tetko I. V., Villa A. E. P., Livingstone D. J. Neural Network Studies. Variable Selection // J. Chem. Inf. Comput. Sci. – 1996. – № 36. – P. 794–803.
90. THE ONLINE INDUSTRIAL EXHIBITION <http://www.directindustry.com/>
91. The optimal synthesis of parallel manipulators for desired workspace / A. M. Hay, J. A. Snyman // In ARK, pages 337–346, Caldes de Malavalla, June 29 – July 2, 2002.
92. Tischler, C. R. Predicting the slop of in-series/parallel manipulators caused by joint clearances / C. R. Tischler, A. E. Samuel // In ARK. – Strobl, 1998. June 29 – July 4. – P. 227–236.
93. Tyurin, Y. N. Electric heating using a liquid electrode / Y. N. Tyurin, A. D. Pogrebnjak // Surface and Coatings Technology. – 2001. – P. 293–299.



94. Vassilvitskii S., Kubica J., Rieffel E., Yim M. H. and Suh, J. W. 2002, «On the General Reconfiguration Problem for Expanding Cube Style Modular Robots», IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington, D. C., p. 801–808.
95. Vladimir Rentyuk. Contro lsteppermotors in both directions // EDN. – 2010. – March18.
96. Willian, A. Tribological and wear behavior of HfN/VN nanomulti-layer coated cutting tools // Ingeniería e Investigación. № 34, 2014. P. 22–28.
97. Wohlhart, K. Degrees of shakiness / K. Wohlhart // Mechanism and Machine Theory, 1999. – October. – № 34(7). – P. 1103–1126.
98. Wurst, K.-H. Peling U PKM Concept for Rconfigurable Machine Tools / K.-H Wurst // 3-rd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar; Development Methods and Application Experience of Parallel Kinematics. Chemnitz, 2002 – P. 683–695.
99. Yasa E. Application of laser re-melting on Selective laser melting parts. Catholic University of Leuven, Dept. of Mech. Eng, Heverlee, Belgium. Advances in Production Engineering / E. Yasa, J. Kruth Management 6. – 2011. – P. 259–270.
100. Yoon, J. Reconfigurability of a Parallel Manipulator: A Case Study / J. Yoon, J. Ryu. // Proceeding of the WORKSHOP on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators, October 3–4, Clement M. Gosselin, Imme Ebert-Uphoff (eds.), Quebec, Canada, 2002. – P. 94–97.
101. Yoram Koren. The Global Manufacturing Revolution: Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems / Koren Yoram. – 2010. – 422 p.
102. Yusimit Z., Yoandrys M., Arlys L., Roberto B. Influence of the cutting parameters on flank wear of coated inserts during turning of AISI 316L // Enfoque. № 6, 2015 P.13–24.

103. **Буханець, В. В.** Економічний механізм формування технічного потенціалу залізорудних підприємств : автореф. дис. ... канд. екон. наук : спец. 08.06.01 / В. В. Буханець. – Кривий Ріг, 2005. – 18 с.

104. **Воронін, В. В.** Діагностичні моделі технічних об'єктів / В. В. Воронін // Системи та процеси. – 2002. – № 1. – С. 20–30.

105. **Глива, В. А.** Неперервний акустичний контроль та ідентифікація тріщиноутворення в металевих конструкціях/ В. А. Глива // Збірник «Управління розвитком складних систем». – 2013. – Вып. 15. – С.115–118.

106. **Григоренко, О. В.** Дослідження й оптимізація технічної системи в концепції реконфигурованих виробничих систем / О. В. Григоренко. – 2002. – С. 12.

107. Діагностика технологічних систем і виробів машинобудування (з використанням нейромережевого підходу) : монографія / С. В. Ковалевський, О. С. Ковалевська, Є. О. Коржов, А. О. Кошевий ; за заг. ред. д-ра техн. наук, проф. С. В. Ковалевського. – Краматорськ : ДДМА, 2016. – 186 с.

108. Інтернет-ресурс: <http://www.symetrie.fr/en/products/motion-hexapods/mistral/>

109. Інтернет-ресурс: <https://www.pinterest.com/pin/368873025711752903/>

110. Інтернет-ресурс: <http://mikrolar.com/rotopod.html>

111. Інтернет-ресурс: <https://www.pinterest.com/pin/368873025710517008/>

112. Інтернет-ресурс: <https://www.pinterest.com/pin/589549407440184336/>

113. Інтернет-ресурс:<http://www.cnc-club.com/forum/download/file.php?id=2577&sid=f30948899974c630ad6af7b4b78b4bbd&mode=view&mt=1>

114. **Ковалевський, С. В.** Формування реконфігурованої структури ділянок у механоскладальних цехах на основі мобільних верстатів-роботів / С. В. Ковалевський, О. С. Ковалевська // Вісник ДДМА. – 2017. – № 1(40). – С.69–72.

115. **Коновалюк, Д. М.** Деталі машин : підручник / Д. М. Коновалюк, Р. М. Ковальчук. – Вид. 2-е. – К. : Кондор, 2004. – 584 с. – ISBN 966-7982-22-X

116. **Методологія та організація наукових досліджень : конспект лекцій для магістрів усіх спеціальностей денної та заочної форм навчання / С. В. Ковалевський.** – Краматорськ : ДДМА, 2016. – 99 с.

117. **Крижанівський, В. А.** Технологічне обладнання з паралельною кінематикою : навч. посібник для ВНЗ / В. А. Крижанівський, Ю. М. Кузнецов, І. А. Валявський, Р. А. Склярів. – Кіровоград, 2004. – 449 с.

118. **Кузнецов, Ю. М.** Світові тенденції і перспективи розвитку верстатобудування в Україні / Ю. М. Кузнецов // Проблеми фізико-математичної і технічної освіти і науки України в контексті євроінтеграції. – К. : НПУ ім. М. П. Драгоманова, 2007. – С. 45–55.

119. **Кузнецов, Ю. М.** Сучасний стан, прогнозування і перспективи розвитку верстатів з паралельною кінематикою / Ю. М. Кузнецов, В. А. Крижанівський, Р. А. Склярів // Процеси механічної обробки в машинобудуванні, ЖДТУ. – Вип.1. – 2005. – С. 320–333.

120. Лінійна алгебра і тензорне обчислення / А. В. Зенков. – Єкатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПІ, 2010. – 96 с. – ISBN 5-321-19662-3.

121. Метод кінцевих елементів. Теорія і задачі / С. І. Трушин. – ..... : Видавництво АСВ, 2008. – 257 с. – ISBN 978-5-93093-539-4.

122. Методичні вказівки до виконання курсового проєкту з деталей машин «Вибір електродвигуна та визначення вихідних даних для розрахунку приводу» / укл. : В. П. Оніщенко, В. С. Ісадченко, В. Б. Недосекін. – Донецьк : ДонНТУ, 2005. – 36 с.

123. Мехатроніка в технологічних системах : навч. посібник / С. В. Ковалевський. – Краматорськ : ДДМА, 2017. – 103 с.

124. **Акимов, О. О.** Дослідження впливу пружності ресорного кріплення тарілок на їх амплітуді вимушених коливань/ О. О. Акимов, О. Л. Ігнатенков, Є. К. Платонов // V Міжнародна науково-практична конференція 19–22 травня 2015 року «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». – 2015. – С 167–170.

125. **Павленко, І. І.** Особливості силового навантаження гексаподів при свердлінні під кутом / І. І. Павленко, Д. В. Вахніченко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія : Машинобудування. – К. : НТУУ «КПІ», 2015. – № 73. – С. 119–123.

126. Патент 78854 Україна МПК (2006), G01N 29/04 (2006.01). Спосіб визначення залишкового ресурсу шліфувальних кругів / Ковалевський С. В., Бугайова О. В., Колот Л. П. ; власник Донбас. держ. машинобуд. акад. – № u201207178 ; заявл. 13.06.2012 ; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 7/2013. – 3 с.

127. Патент 80043 Україна МПК (2006), B23C 3/00 (2013.01). Спосіб комплектації різальних пластин при селективному складанні фрез / Ковалевський С. В., Тютюнник Л. О., Колот Л. П.; власник Донбас. держ. машинобуд. акад. – № u201213568 ; заявл. 27.11.2012 ; опубл. 13.05.2013, Бюл. № 9/2013. – 4 с.

128. Патент 88572 Україна МПК (2014.01), B23Q 15/00, B23Q 17/00. Спосіб діагностики якості технологічної системи / Ковалевський С. В., Носков К. В., Стародубцев І. М. ; власник Донбас. держ. машинобуд. акад. – № u201310795 ; заявл. 09.09.2013 ; опубл. 25.03.2014, Бюл. № 6. – 4 с.

129. Розрахунок економічної ефективності обробки валів методом високошвидкісного фрезоточіння / А. Н. Селиванов, Т. Г. Насад // Вісник СГТУ. – 2011. – Вип. 2. – С.134.

130. Струтинський, В. Б. Теоретичний аналіз жорсткості шестико-ординатного механізму паралельної структури / В. Б. Струтинський, А. М. Кириченко // Вісник Національного технічного університету України



«Київський політехнічний інститут». Серія: Машинобудування. – 2009. – № 57. – С. 198–207.

131. **Струтинський, С. В.** Визначення основних конструктивних параметрів сферичних опорних вузлів просторового механізму методом Монте-Карло / С. В. Струтинський // *Машинознавство*. – 2007. – № 5. – С. 37–43.

132. **Струтинський, С. В.** Математичне моделювання просторових поперечно-кутових мікропереміщень сферичного шарніра з використанням рекурсивних зв'язків / С. В. Струтинський // *Машинознавство*. – 2009. – № 1. – С.37–43.

133. *Теорія графів* / О. Оре. – Вид. Ліброком, 2009. – 354 с. – ISBN 978-5-397-00044-4.

134. Технологічні основи гнучких виробничих систем : лабораторний практикум для студентів спеціальності 7.05050201 денної і заочної форм навчання / В. С. Медведєв. – Краматорськ : ДДМА, 2013. – 56 с.

135. **Хомяк, О. М.** Вали, підшипники, муфти : навч. посібник / О. М. Хомяк, Б. Ф. Піпа, С. О. Ловейкіна. – К. : КНУТД, 2004. – 100 с.

136. **Щелкунов, Є. Б.** Автоматизація проєктування механізмів паралельної структури / Є. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Є. Щелкунова, М. Ю. Сарілов // *Фундаментальні дослідження*. – 2015. – № 2–17. – С. 3748–3752.

*Наукове видання*

КОВАЛЕВСЬКА Олена Сергіївна,  
КОВАЛЕВСЬКИЙ Сергій Вадимович

**УДОСКОНАЛЕННЯ УПРАВЛІННЯ  
ТЕХНОЛОГІЧНИМ ОБЛАДНАННЯМ  
ІЗ МЕХАНІЗМАМИ ПАРАЛЕЛЬНОЇ  
СТРУКТУРИ**

**Монографія**

3/2020. Формат 60 × 84/16. Ум. друк. арк. 17,9.  
Обл.-вид. арк. 14,0. Тираж пр. Зам. № \_\_\_\_.

Видавець і виготівник  
Донбаська державна машинобудівна академія  
84313, м. Краматорськ, вул. Шкадінова, 72.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК №1633 від 24.12.2003