

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ
ІНСТИТУТ
КАФЕДРА КОНСТРУЮВАННЯ МАШИН**

«На правах рукопису»
УДК 621.9.04

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 **Юрій ДАНИЛЬЧЕНКО**

« 9 » 05 2025р.

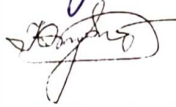
**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-науковою програмою «Прикладна механіка»
зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»
на тему: «СТВОРЕННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ОБЕРТАЛЬНО-
ПОВОРОТНОГО ПРИСТРОЮ НА МОДУЛЬНОМУ ПРИНЦИПІ»**

Виконав:

студент VI курсу, групи МК-31мн
Підгорний Назар Андрійович

Науковий керівник:

Професор, д. т. н.
Кузнєцов Юрій Миколайович

Рецензент:

Доцент кафедри технології
машинобудування, к.т.н.
Приходько Василь Петрович



Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.
Студент 

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ
ІНСТИТУТ
КАФЕДРА КОНСТРУЮВАННЯ МАШИН**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітня програма «Прикладна механіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 **Юрій ДАНИЛЬЧЕНКО**

«14» 03 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Підгорний Назар Андрійович**

1. Тема дисертації «Створення та дослідження обертально-поворотного пристрою на модульному принципі», науковий керівник дисертації Кузнєцов Юрій Миколайович, професор, доктор технічних наук, затверджені наказом по університету від «14» березня 2025 р. №1134-с

2. Термін подання студентом дисертації 08 травня 2025р.

3. **Об'єкт дослідження** - кінематико-силові параметри, навантажувальна здатність та точність позиціонування обертально-поворотного пристрою з застосуванням модульного підходу.

4. **Предмет дослідження** - концепція обертально-поворотного пристрою на основі модульного підходу, основні функціональні модулі та їх можливі комбінації (застосування морфологічного аналізу).

5. **Перелік завдань, які потрібно розробити** 1. Аналіз модульного підходу до проектування обладнання 2. Аналіз сучасного стану обертально-поворотних пристроїв, їхні переваги та недоліки. 3. Проведення морфологічного аналізу. 4. Розробка концепту обертально – поворотного пристрою. 5. Розробка розрахункової схеми і провєлення дослідження динаміки обертально – поворотних пристроїв.

6. **Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу** 1. Патентно-інформаційні дослідження по темі згідно ДСТУ 3575-97. 2. Приклади ОПП. 3. Морфологічна модель. ОПП. 4. Варіанти ОПП з морфологічними формулами. 5. Розрахункова схема обертального блоку. 6. Розрахункова схема поворотного

блоку. 7. Результати розрахунку обертального блоку. 8. Результати розрахунку поворотного блоку. 9. 3Д-вигляд УОПЗП. 10. Динамічна модель обертального блоку і результати її розрахунку.

7. Орієнтовний перелік публікацій:

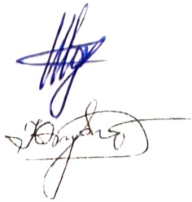
1. Ю. М. Кузнєцов, Н. А. Підгорний ДИНАМІКА ОБЕРТАЛЬНО-ПОВОРОТНИХ ПРИСТРОЇВ //Науково-практична конф. «Інновації молоді в машинобудуванні» (IMM-2025). 2. Yuriy Kuznetsov, Nazar Pidgorniy Dynamic analusis and control of modular universal rotary welding device // Journal of the Technical University of Gabrovo, vol., 70, 2025, p.p.1-4. 3. Підгорний Н.А., Кузнєцов Ю.М., ВИКОРИСТАННЯ АГРЕГАТНО-МОДУЛЬНОГО ПРИНЦИПУ В РІЗНИХ ГАЛУЗЯХ // Всеукраїнська науково-практична on-line конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених „Перспективи розвитку машинобудівної інженерії та транспортних технологій” (присвячена Дню науки), «Житомирська політехніка» 14.05.2025р.м.Житомир.

8. Дата видачі завдання 1.09.24

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз модульного підходу до проектування обладнання	Вересень 2024р.	Розділ дисертації
2	Проведення патентно-інформаційних досліджень	Жовтень 2024р.	Розділ дисертації
3	Проведення морфологічного аналізу	Листопад 2024р.	Розділ дисертації
4	Розробка концепту обертально – поворотного пристрою	Грудень 2024р.	Розділ дисертації
5	Опис системи керування	Січень 2025р.	Підрозділ дисертації
6	Методика дослідження динаміки обертально – поворотних пристроїв	Лютий 2025р.	Розділ дисертації
7	Аналіз та формулювання висновків дисертації	Березень 2025р.	Висновок
8	Підготовка статті до публікації	Березень 2025р.	Текст статті
9	Оформлення текстової частини	Квітень 2025р.	Текстова частина
10	Захист	Травень 2025р.	Доповідь

Студент



Назар ПІДГОРНИЙ

Науковий керівник

Юрій КУЗНЄЦОВ

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на тему «Створення і дослідження обертально-поворотного пристрою на модульному принципі» містить 109 сторінок пояснювальної записки, 34 рисунки, 6 таблиць, 87 використаних літературних джерел та 4 додатки.

Актуальність теми. Сучасні виробничі підприємства потребують гнучких та універсальних рішень для механізації та автоматизації технологічних процесів зварювання, обробки, складання та інших операцій, пов'язаних із переміщенням і фіксацією виробів у просторі. Однак наявні на ринку обертально-поворотні пристрої часто не відповідають вимогам щодо гнучкості, адаптивності та модульності. Вони мають обмежену сферу застосування, складну конструкцію та високу вартість. Запропонована в роботі концепція модульного обертально-поворотного пристрою дозволяє значно розширити функціональні можливості та забезпечити простоту адаптації до різних виробничих задач. Такий підхід відповідає сучасним тенденціям інтеграції обладнання в системи гнучких виробництв та розумних фабрик.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Магістерська дисертація виконана на кафедрі конструювання машин Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» відповідно до тематичного плану науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України. Робота є складовою комплексної програми з розвитку автоматизованих систем механізації виробництва та інтеграції інтелектуальних технологій у промислове середовище, як машинобудування України, так і світу..

Мета дослідження: створення конструкції обертально-поворотного пристрою з модульною архітектурою для забезпечення високої точності, гнучкості та енергоефективності під час роботи з різними виробами на підприємствах машинобудування, а також з можливістю їх інтеграції в комплекси фабрик нового покоління.

Завдання дослідження:

- Провести аналіз сучасного стану та потреб машинобудівної галузі в обертально-поворотних пристроях.
- Розробити конструктивну схему пристрою на основі модульного принципу.
- Побудувати математичну та динамічну моделі пристрою.
- Визначити основні динамічні характеристики, що впливають на точність та ефективність роботи.
- Здійснити аналітичну оцінку стійкості та частотних характеристик обертального блоку.

Методи дослідження: у роботі застосовано методи аналітичного моделювання кінематичних і динамічних властивостей обертально-поворотних пристроїв, методи розрахунку навантажень та моментів інерції, методи побудови частотних характеристик системи. Застосовано також комп'ютерне моделювання за допомогою CAD та CAE-систем для верифікації отриманих аналітичних залежностей.

Основні результати роботи:

- Запропоновано конструктивну реалізацію обертально-поворотного пристрою на основі модульного підходу, що забезпечує розширення функціональних можливостей та підвищення адаптивності до різних виробничих задач.
- Побудовано аналітичну динамічну модель пристрою, що дозволяє оцінити його стійкість та передбачити динамічну поведінку під час експлуатації.
- Визначено основні динамічні характеристики обертального блоку, включаючи жорсткість, момент інерції, демпфування та частотні характеристики.
- Проведено порівняльний аналіз впливу розташування виробу на платформі на динамічні властивості пристрою.

Практичне значення роботи полягає в тому, що отримані результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації обертально-поворотних пристроїв для зварювальних комплексів, обробних центрів, складальних ліній та

інших виробничих систем, де необхідне кероване переміщення виробу у просторі. Запропонована модульна архітектура дозволяє швидко адаптувати пристрій під конкретні виробничі задачі без потреби у значних конструктивних змінах.

Ключові слова: модульна архітектура, обертально-поворотний пристрій, кінематичне моделювання, динамічні характеристики, позиціювання, система керування, зварювальне виробництво, морфологічний аналіз.

ABSTRACT

Master's thesis titled "Development and Research of a Rotary-Tilting Device Based on the Modular Principle" contains 109 pages of explanatory notes, 34 figures, 6 tables, 87 references, and 4 appendices.

Relevance of the topic. Modern manufacturing enterprises require flexible and universal solutions for the mechanization and automation of technological processes such as welding, machining, assembly, and other operations involving the positioning and fixation of products in space. However, the rotary-tilting devices available on the market often fail to meet the requirements of flexibility, adaptability, and modularity. These devices typically have limited applications, complex designs, and high production costs. The modular rotary-tilting device proposed in this thesis significantly expands functional capabilities and ensures ease of adaptation to various production tasks. This approach aligns with modern trends of integrating equipment into flexible manufacturing systems and smart factories.

Relation of the research to scientific programs, plans, and topics. The master's thesis was completed at the Department of Machine Design of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" in accordance with the thematic research plan of the Ministry of Education and Science of Ukraine. The work is part of a comprehensive program for the development of automated mechanization systems and the integration of intelligent technologies into industrial environments.

Research objective: to develop the design of a rotary-tilting device with a modular architecture to ensure high accuracy, flexibility, and energy efficiency when working with various products in the mechanical engineering industry.

Research tasks:

- To analyze the current state and needs of the mechanical engineering industry for rotary-tilting devices.
- To develop a structural scheme of the device based on the modular principle.
- To construct mathematical and dynamic models of the device.

- To determine the main dynamic characteristics that influence the accuracy and efficiency of the device.
- To perform analytical evaluation of the stability and frequency characteristics of the rotary block.

Research methods: The thesis employs methods of analytical modeling of the kinematic and dynamic properties of rotary-tilting devices, methods for calculating loads and moments of inertia, and methods for constructing frequency response characteristics of the system. Computer modeling using CAD and CAE systems was also applied to verify the obtained analytical dependencies.

Main results of the work:

- A modular design concept of the rotary-tilting device has been proposed, providing expanded functionality and enhanced adaptability to various manufacturing tasks.
- An analytical dynamic model of the device has been developed, allowing for the assessment of stability and prediction of dynamic behavior during operation.
- The main dynamic characteristics of the rotary block, including stiffness, moment of inertia, damping, and frequency characteristics, have been determined.
- A comparative analysis of the influence of product positioning on the platform on the dynamic properties of the device has been conducted.

Practical significance of the work lies in the fact that the obtained results can be used in the design and modernization of rotary-tilting devices for welding complexes, machining centers, assembly lines, and other manufacturing systems where controlled spatial positioning of products is required. The proposed modular architecture allows for rapid adaptation of the device to specific manufacturing tasks without the need for significant structural modifications.

Keywords: modular architecture, rotary-tilting device, kinematic modeling, dynamic characteristics, positioning, control system, welding production, morphological analysis.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	11
ВСТУП.....	12
1. АГРЕГАТНО-МОДУЛЬНИЙ ПРИНЦИП – ОСНОВНИЙ ПІДХІД ПРИ СТВОРЕННІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ (ТО) НОВОГО ПОКОЛІННЯ.	15
1.1. Світові тенденції і перспективи розвитку сучасного машинобудування ..	15
1.2. Сутність модульного принципу	16
1.3. Приклади використання агрегатно-модульного принципу для різної техніки	19
1.4. Висновки	23
2. ПАТЕНТНО-ІНФОРМАЦІЙНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	25
2.1. Порядок проведення патентних досліджень згідно ДСТУ 3575-97.....	25
2.2. Патентно-інформаційні дослідження по темі «обертально – поворотних пристроїв»	27
2.3. Висновки	40
3. ДОСЛІДНИЦЬКИЙ	44
3.1. Морфологічний аналіз – системний метод пошуку нових технічних рішень	44
3.2. Побудова морфологічної моделі ОПП.	47
3.3. Синтез компоновок ОПП з написанням морфологічних і структурних формул.	51
3.4. Висновки	57
4. КОНСТРУКТОРСЬКИЙ.....	61
4.1. Синтезовані компоновки ОПП з використанням модульного принципу.....	61
4.2. Варіант конструктивного виконання і принципу роботи блоку обертального ОПП модульного принципу.....	63
4.3. Система програмного керування ОПП.....	69
5. ДИНАМІКА ОБЕРТАЛЬНО – ПОВРОТНИХ ПРИСТРОЇВ	75
5.1. Основні положення динаміки	75
5.2. Динамічні характеристики обертально – поворотного пристрою.....	80
5.3. Модель динамічного навантаження.	83

5.4. Аналітична модель оцінки впливу орієнтації виробу на динамічні характеристики обертально-поворотного пристрою	87
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	95
ДОДАТОК А	103
ДОДАТОК Б	104
ДОДАТОК В	107
ДОДАТОК Г	108

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ОПП	—	обертально-поворотний пристрій;
ТО	—	технологічне обладнання;
ЧПК	—	числове програмне керування;
СС	—	ступінь свободи;
r	—	радіус охоплення, м;
БО	—	Блок обертальний;
БП	—	Блок поворотний;
П	—	Перехідник;
О	—	Основа;
$L1$	—	довжина плеча обертального блоку, м;
$L2$	—	довжина плеча поворотного блоку, м;
α	—	кут між плечами обертального та поворотного блоків, рад;
ω	—	кутова швидкість, рад/с;
J	—	момент інерції, кг·м ² ;
M	—	крутний момент, Н·м;
β	—	кут нахилу платформи, рад;
F	—	сила, Н;
t	—	час, с;
V	—	лінійна швидкість, м/с;
Z, Y, X	—	осі просторової системи координат;
X_j, X_i	—	параметри морфологічної матриці;
$P_{n(1)}$	—	показник пріоритетності першого рівня;
$P_{\text{відн}}$	—	показник відносної значущості;
Δ	—	зміна параметра;
N	—	потужність приводу, Вт;
μ	—	коефіцієнт тертя;
$X1...X16$	—	параметри морфологічної матриці;

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних умовах інтенсивного розвитку промислового виробництва та автоматизації технологічних процесів особливої ваги набуває вдосконалення обладнання для зварювальних операцій. Одним із ключових елементів зварювальної інфраструктури є обертально – поворотні пристрої (ОПП) для обертання та точного позиціонування деталей. Використання обертально – поворотних механізмів на модульному принципі дозволяє значно підвищити якість швів, зменшити витрати часу на підготовчі операції та забезпечити гнучкість виробничих процесів.

За даними Міжнародного інституту зварювання (International Institute of Welding (IIW)), у 2024 році обсяг світового ринку зварювальних технологій склав понад 20,3 мільярди доларів США [1], зі щорічним зростанням у межах 4,7%. Згідно зі статистикою Американського зварювального товариства (AWS) [2], близько 30% дефектів у виробі виникають через неправильне розташування зварюваних деталей або нестабільність під час виконання зварювання. Саме тому застосування високотехнологічних обертально – поворотних пристроїв стає критично важливим для підвищення якості зварних конструкцій.

У машинобудуванні, де зварювання – одна з основних технологічних операцій, обертально – поворотні пристрої дозволяють оптимізувати процеси складання металевих конструкцій. Наприклад, у важкому машинобудуванні ефективність виконання швів зростає на 25- 40% при використанні пристроїв, що забезпечують багатоплощинне позиціонування виробу.

Важливим аспектом є впровадження модульних обертально – поворотних пристроїв у роботизоване зварювання. Згідно з прогнозами аналітичної компанії Markets and Markets, ринок роботизованого зварювання у 2028 році сягне 10,7 мільярдів доларів США [3]. Використання модульних рішень у цій сфері забезпечує гнучкість налаштувань, зменшує інерційні навантаження на роботизовані маніпулятори та підвищує продуктивність зварювального комплексу на 20 – 30%.

У контексті сталого розвитку промисловості все більшої ваги набуває концепція зменшення витрат на ремонт і обслуговування обладнання. Модульний принцип побудови обертально – поворотних пристроїв дає можливість замінювати окремі елементи конструкції без повного демонтажу системи, що дозволяє скоротити час простоїв до 60% та значно зменшити експлуатаційні витрати.

Варто також зазначити, що сучасні вимоги до безпеки праці на виробництві передбачають максимальне зменшення ручних операцій при маніпулюванні важкими деталями. Встановлення обертально - поворотних пристроїв, які дозволяють точно позиціонувати вироби у найзручніше для зварювання положення, знижує ризик травматизму на 35%, згідно з даними Occupational Safety and Health Administration (OSHA). [4]

Таким чином, створення та дослідження обертально – поворотного пристрою на модульному принципі – вкрай актуальне завдання. Це дозволить підвищити якість зварних з'єднань, збільшити продуктивність виробництва, зменшити витрати на технічне обслуговування та забезпечити відповідність сучасним стандартам безпеки праці.

Створення подібного пристрою має потенціал для широкого впровадження у різних секторах промисловості та сприятиме розвитку конкурентоспроможності технологічних рішень на національному та міжнародному рівнях.

Мета та завдання дослідження: Розробити та дослідити динаміку та кінематику обертально – поворотного пристрою, побудованого на агрегатно – модульному принципі, як універсального засобу, що може стати основою для різноманітних промислових і наукових пристосувань.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні:

1. Дослідити та довести ефективність агрегатно – модульного принципу при його застосуванні у запропонованому пристрої.
2. Виконати аналіз сучасного стану обертально - поворотних пристроїв та визначити їхні переваги та недоліки.

3. Розробити концепцію обертально – поворотного пристрою на основі модульного підходу, визначивши основні функціональні модулі та їх можливі комбінації (застосування морфологічного аналізу).
4. Розробити дизайн пристрою, забезпечуючи його ергономічність, зручність в експлуатації та здатність до легкої заміни модулів.
5. Розробити розрахункову схему і виконати теоретичні дослідження обертально – поворотного пристрою.
6. Провести аналіз ефективності, можливостей та переваг впровадження пристрою в різних сферах застосування, включаючи промисловість, медицину, науку та побут.

Об’єкт дослідження: процеси і явища, що виникають у обертально-поворотному пристрої, із застосуванням агрегатно – модульного підходу.

Предметом дослідження: обертально - поворотні пристрої різних світових виробників, конструктивні особливості, принципи модульної побудови, їх кінематичні та експлуатаційні характеристики, що забезпечують ефективне обертання та позиціонування деталей для зварювання.

Методи досліджень: Теоретичні дослідження процесу руху обертально – поворотних пристроїв з використанням основних положень і методів теоретичної механіки, теорії тертя, опору матеріалів, динаміки машин та методу кінцевих елементів.

1. АГРЕГАТНО-МОДУЛЬНИЙ ПРИНЦИП – ОСНОВНИЙ ПІДХІД ПРИ СТВОРЕННІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ (ТО) НОВОГО ПОКОЛІННЯ.

1.1. Світові тенденції і перспективи розвитку сучасного машинобудування

Розвиток технологій у сфері машинобудування, особливо у зварювальному виробництві, стимулював появу іноваційних рішень для обертання та позиціонування деталей. Серед ключових напрямів прогресу в цій галузі можна виділити такі тенденції:

1. Підвищення швидкості та точності позиціонування деталей за допомогою обертально – поворотних механізмів з автоматизованим приводом; застосування приводів, здатних забезпечувати прискорення до 5м/с^2 і кутові швидкості понад 60 об/хв при позиціонуванні зі швидкістю менше ніж 2 с на одну операцію.
2. Впровадження високоточної обробки шляхом розробки пристроїв із повторюваністю позиціонування на рівні $0,01^\circ$ і менше, що дозволяє мінімізувати відхилення в зоні зварювання і забезпечити рівномірну якість швів.
3. Створення багатофункціональних і модульних обертально – поворотних систем, які забезпечують інтеграцію з різноманітним зварювальним обладнанням і здатні адаптуватися до різних геометрій деталей без суттєвого перепроєктування.
4. Агрегатно – модульний принцип конструювання пристроїв, що передбачає можливість швидкої заміни конфігурації шляхом додавання або заміни окремих модулів від технологічних потреб виробництва.
5. Інтенсивне впровадження гнучких виробничих ліній із застосуванням обертально – поворотних пристроїв, інтегрованих у роботизовані комплекси, що дозволяє підвищити рівень автоматизації виробництва і знизити витрати на одиницю продукції.

6. Застосування технології тривимірного моделювання та цифрового подвійника (digital twin) для оптимізації конструкції обертально – поворотних пристроїв ще на етапі проектування, що скорочує час розробки та вартість впровадження нових моделей.
7. Активне використання адаптивних систем керування обертанням і позиціонуванням на основі комп’ютерного аналізу і алгоритмів машинного навчання, що дозволяє забезпечити високу стабільність роботи навіть за мінливих умов виробництва.
8. Використання новітніх конструкційних матеріалів, таких, як алюмінієві сплави з магнієвими домішками та вуглицеві композити, що сприяє зменшенню маси пристроїв без втрати їхньої міцності й надійності.
9. Розвиток сервісних технологій обслуговування обертально – поворотних систем із використанням можливостей віддаленого моніторингу стану обладнання через інтернет речей (IoT), що дозволяє своєчасно виявити потенційні відмови та мінімізувати простої.

1.2. Сутність модульного принципу

У сучасному машинобудуванні модульний принцип побудови технічних систем стає одним із найважливіших напрямів розвитку інженерних рішень. Його застосування у створенні обладнання забезпечує підвищення гнучкості, універсальності, ремонтпридатності та адаптивності до різноманітних виробничих завдань.

Модульний принцип передбачає проектування конструкцій як сукупності окремих функціональних елементів – модулів, кожен з яких виконує чітко визначену задачу. У випадку обертально – поворотних пристроїв для зварювання такими модулями можуть бути приводи обертання, опори, механізми фіксації, редуктори, системи керування, елементи з’єднання з основним виробничим обладнанням, а також допоміжні конструктивні елементи для підвищення жорсткості чи точності позиціонування.

Основна перевага модульного підходу полягає в тому, що створення складного пристрою перетворюється на комбінування стандартних або типових елементів у залежності від конкретних виробничих вимог. Завдяки цьому досягається значне скорочення часу на проектування нових систем, спрощення процесу модернізації вже існуючих рішень та оптимізації витрат на виробництво і обслуговування обладнання.

У галузі зварювання модульний принцип особливо актуальний через велику різноманітність деталей, які потребують зварювання, що різняться масою, габаритами, матеріалом та конфігурацією. Використання модульних оберально – поворотних пристроїв дозволяє швидко адаптувати обладнання під змінні виробничі задачі, що важливо для підприємств, які працюють з малосерійним або індивідуальним виробництвом.

Конструктивно модулі ОПП повинні мати уніфіковані приєднувальні розміри та стандартизовані інтерфейси, що забезпечує їх взаємозамінність і можливості швидкої заміни одного елемента іншим без необхідності повної переробки системи. Це, у свою чергу, підвищує експлуатаційну надійність обладнання та зменшує простой через технічне обслуговування.

Одним з ключових завдань при реалізації модульного принципу є оптимальна інтеграція окремих функцій у модулі. Наприклад, модуль приводу обертання може поєднувати в собі електричний мотор, редуктор та систему датчиків положення, що значно знижує габарити та масу вузла, підвищуючи при цьому його енергетичну ефективність.

Модульний принцип також передбачає розділення функціональності на базові рівні, що дозволяє створювати як прості одноканальні пристрої для нескладних зварювальних робіт, так і багатоканальні системи з можливістю синхронізованого обертання кількох елементів для автоматизованих зварювальних ліній. Такий підхід забезпечує масштабованість системи без істотного збільшення складності конструкції.

Слід зазначити, що застосування модульного принципу у проектуванні тісно пов'язане з концепціями цифровізації виробництва та Індустрії 4.0. Кожен

модуль може бути обладнаний власною електронною системою контролю і зв'язку, що дозволяє в режимі реального часу відстежувати його стан, діагностувати можливі несправності і здійснювати віддалене налаштування параметрів роботи.

Досвід провідних світових компаній, таких як ABB, KUKA та Lincoln Electric, свідчить про те, що модульна архітектура пристрою сприяє не тільки підвищенню технічних характеристик обладнання, а й значно скорочує життєвий цикл виробу: від розробки до виведення на ринок. Згідно з дослідженням Markets and Markets (2023), [6] впровадження модульного принципу дозволяє скоротити час розробки промислового обладнання на 25-35%, а витрати на технічне обслуговування – на 20-30%.

Окрім технічних переваг, модульний підхід також сприяє підвищенню ергономіки роботи обладнання. Завдяки уніфікованим кріпленням і стандартизованим розмірам модулів монтаж пристроїв у виробничу лінію стає простішим і менш затратним. Це особливо важливо при інтеграції обладнання у вже діючі технологічні процеси.

Також варто відзначити високий рівень кастомізації модульних пристроїв. Виробник або користувач має можливість конфігурувати пристрій під свої специфічні потреби: змінювати максимальне навантаження, швидкість обертання, кількість ступенів свободи, тип системи керування та багато інших параметрів.

Розвиток модульних пристроїв сприяє також екологічній модернізації виробництва. Зменшення кількості матеріалів, необхідних для виготовлення одного пристрою, зниження енергоспоживання під час експлуатації, а також тривалий термін служби модулів позитивно впливають на зменшення вуглецевого сліду підприємства.

В Україні модульний принцип створення пристроїв набуває дедалі більшої популярності. Провідні науково – дослідні установи та підприємства галузі активно працюють над адаптацією модульних конструкцій до умов серійного та дрібносерійного виробництва. Застосування сучасних CAD/CAM систем

проектування та використання цифрового прототипування істотно прискорюють цей процес.

Підсумовуючи вищезазначене, слід відзначити, що модульний принцип є стратегічно важливим напрямом у розвитку обертально – поворотних пристроїв. Його використання забезпечує не лише технічні й економічні переваги, а й створює основу для подальшої інтеграції цих систем у високотехнологічні виробничі комплекси майбутнього.

1.3. Приклади використання агрегатно-модульного принципу для різної техніки

Агрегатно-модульний принцип побудови технічних систем – це потужний інструмент у проектуванні різноманітного обладнання, оскільки забезпечує високу гнучкість, уніфікацію компонентів і можливість швидкої адаптації до змінних умов експлуатації. Сучасні інженерні рішення активно впроваджують цей принцип у багатьох галузях техніки, від зварювального виробництва до аерокосмічної техніки, транспорту та робототехніки.



Рисунок 1.1 - Приклад модульного зварювального обладнання компанії Lincoln Electric Ferris Wheel Positioner[7]

У галузі зварювання агрегатно – модульний підхід проявляється у створенні універсальних платформ (рис.1.1), які можуть бути швидко переналаштовані для роботи з різними деталями, вага яких може змінюватися в межах кількох кілограм до десятків тон. Наприклад, сучасні модульні зварювальні позиціонери, такі, як серії Fanuc Arc Mate або Lincoln Electric Ferris

Wheel Positioner[7], дозволяють змінювати конфігурацію під розмір і форму виробу без повної заміни обладнання.

Важливим прикладом ефективного використання модульності є індустріальні роботи для зварювання та переміщення деталей. У таких системах обертальні та поворотні механізми (зокрема, осі обертання) представлені у вигляді окремих функціональних блоків. Кожен блок має стандартні інтерфейси для механічного та електричного з'єднання, що дозволяє оперативно змінювати конфігурацію робота під конкретне виробниче завдання. Згідно з даними World Robotics Report 2023, [8] близько 72% промислових роботів використовують агрегатно – модульну архітектуру.

Ще однією ілюстрацією агрегатно – модульного принципу є мобільні ОПП для монтажних та ремонтних робіт на будівельних майданчиках або у важкодоступних місцях. Такі пристрої часто складаються з базової платформи, модулів обертання, висувних механізмів та адаптерів для кріплення різноманітних інструментів.

У транспортній техніці, наприклад, у виробництві вантажних автомобілів агрегатно – модульний підхід дозволяє створювати різні варіанти шасі та кузовів на базі одного стандартного каркасу. Завдяки цьому забезпечується економія на проектуванні та виготовленні техніки, а також значне скорочення часу на її адаптацію до різних умов експлуатації.



Рисунок 1.2. - Приклад модульного підходу у військовій сфері на прикладі модульних бойових платформ Boxer

У військовій техніці цей підхід використовується у бронетехніці, де платформи бойових машин можуть бути оснащені різними типами озброєння або обладнання залежно від поставленого бойового завдання. Наприклад, модульні

бойові платформи Boxer (розробка ARTEC GmbH) (рис.1.2) [9] дозволяють швидко змінювати модулі для транспортування військових, медичної евакуації або протитанкової боротьби.

У цивільному будівництві та монтажних роботах агрегатно – модульний підхід реалізується через створення стандартних зварювальних ферм, які можуть бути швидко з'єднані між собою в різних конфігураціях для побудових будівельних конструкцій. Подібні системи широко використовуються у швидкокомонтованих будівлях, мостах тощо.

У виробництві авіаційної техніки модульність забезпечує гнучкість збірки літаків та вертольотів. Наприклад Airbus у своїй лінійці A320 [10] застосовує принцип змінних модулів крила та фюзеляжу для спрощення складання й обслуговування, що дозволяє знизити витрати на технічне обслуговування літаків на 18% за весь термін дії експлуатації.

У медичній техніці модульний принцип проявляється у конструюванні реабілітаційних роботизованих систем і хірургічних маніпуляторів (рис.1.3). Наприклад, відомі Da Vinci Surgical Systems [11] мають модульні компоненти, що дозволяють оптимізувати налаштування маніпуляторів залежно від потреб конкретної операції.

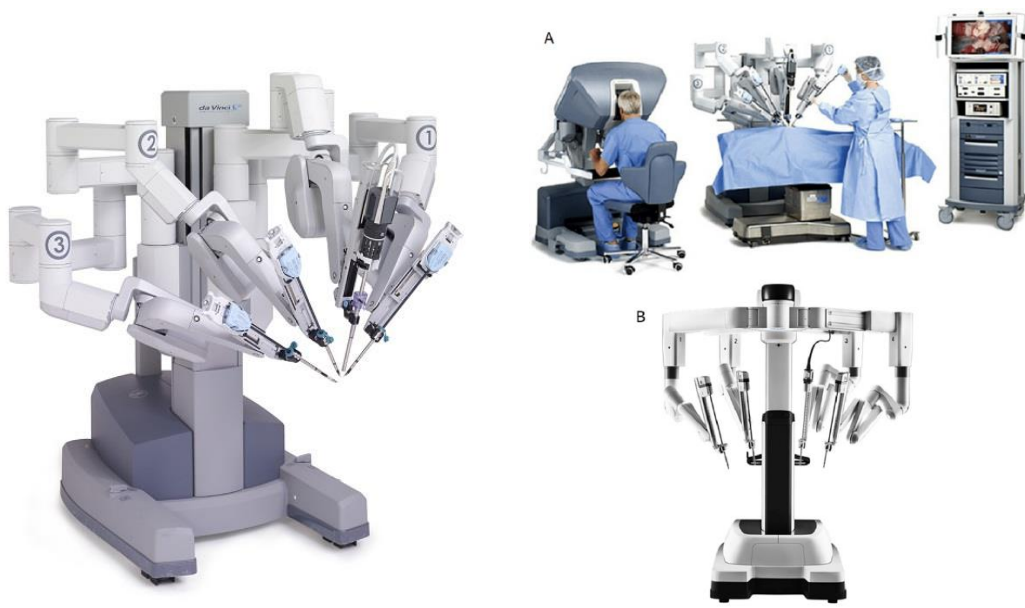


Рисунок 1.3. - Приклад модульних роботизованих реабілітаційних та хірургічних систем Da Vinci Surgical Systems [11]

Що стосується безпосередньо обертально – поворотних пристроїв, агрегатно – модульна структура дозволяє створити модулі з різною кількістю ступенів свободи – від простих двовісних систем до багатокоординатних роботизованих платформ для високоточного позиціонування в автоматизованих зварювальних комплексах (рис.1.4). Приклади таких систем включають модульні зварювальні осередки Fronius [12]. або Yaskawa Motoman [13].

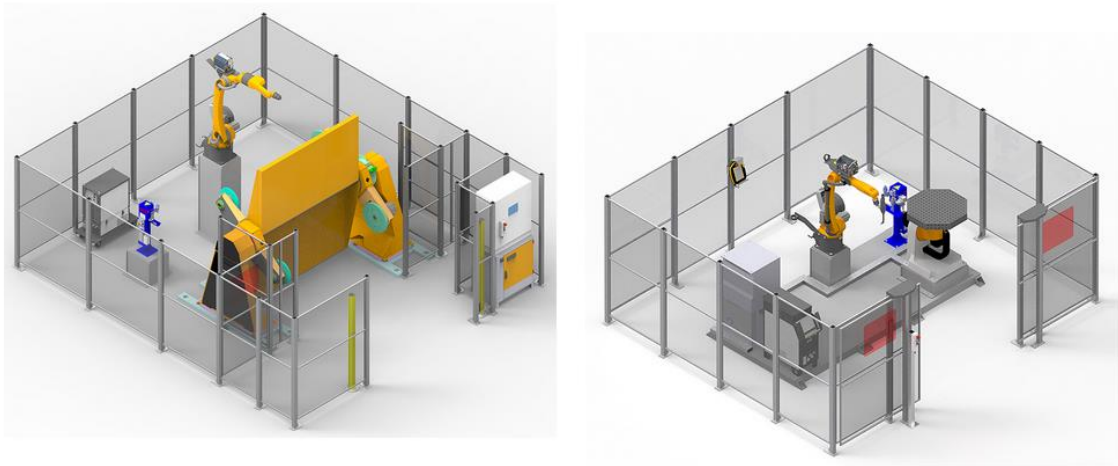


Рисунок 1.4.- Приклад модульних зварювальних осередків з використанням обладнання Fronius, Yaskawa, ABB [14]

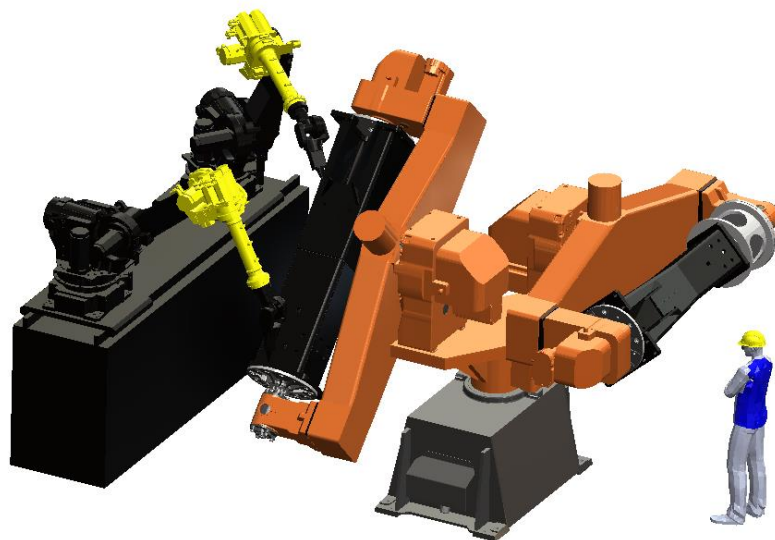


Рисунок 1.5 – Приклад роботизованого зварювання (використання обертально – поворотного пристрою зі зварювальними роботами)

Таким чином, агрегатно – модульний принцип демонструє універсальність і ефективність у всіх основних галузях сучасної техніки (рис.1.5). Його застосування в обертально – поворотних пристроях забезпечує не тільки зниження виробничих витрат та часу на підготовку обладнання, а й істотно підвищує якість кінцевої продукції за рахунок більш точного та гнучкого позиціонування виробів.

1.4. Висновки

Сучасні тенденції розвитку технологічних процесів свідчать про зростаючу потребу в універсальних засобах автоматизації, які забезпечують не лише високу продуктивність, але й гнучкість виробництва. Обертально – поворотні пристрої, що функціонують на основі модульного принципу побудови, відіграють важливу роль у забезпеченні цих вимог. Аналіз сучасних рішень і технологій підтвердив, що саме модульний підхід є найбільш перспективним для створення таких пристроїв, оскільки він дозволяє оперативно адаптувати конструкцію під специфічні виробничі задачі, мінімізуючи витрати часу та ресурсів.

Особливу актуальність має застосування обертально – поворотних пристроїв у галузі зварювання, де точність позиціонування та стабільність руху деталі безпосередньо впливають на якість зварних з'єднань. Підвищення вимог до складності зварних конструкцій, а також прагнення підприємств до автоматизації та зменшення залежності від людського фактора обумовлюють необхідність створення нових, більш ефективних допоміжних пристроїв. Саме модульна структура таких механізмів дозволяє не тільки забезпечити необхідну точність і надійність, але й зменшити вартість модернізації й обслуговування обладнання в умовах постійного розвитку технологій.

Досвід використання модульного принципу в інших галузях, таких, як робототехніка, енергетика, транспорт і військова техніка, підтверджує правильність обраного напрямку. Модульні рішення демонструють високу надійність, ремонтпридатність і здатність до швидкого масштабування в залежності від потреб виробництва. Такі підходи дозволяють суттєво знизити час

розробки нових моделей обладнання, полегшують процес адаптації технологічних ліній до нових завдань і мінімізують витрати на виробництво.

Узагальнюючи результати аналізу, можна зробити висновок, що створення обертально – поворотного пристрою на модульному принципі відкриває широкі можливості для підвищення ефективності виробничих процесів, особливо у сфері зварювання. Такий підхід сприяє реалізації гнучких, економічно вигідних та технологічно досконалих рішень, що повністю відповідають сучасним вимогам ринку.

2. ПАТЕНТНО-ІНФОРМАЦІЙНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Порядок проведення патентних досліджень згідно ДСТУ 3575-97

Патентні дослідження – це важлива складова іноваційної діяльності, оскільки вони забезпечують ефективне використання науково-технічної інформації та правову охорону нових технічних рішень. Відповідно до вимог національного стандарту України ДСТУ 3575-97 «Патентні дослідження. Основні положення та порядок проведення», патентні дослідження мають здійснюватися системно і послідовно, охоплюючи усі етапи життєвого циклу продукції [15].

Згідно ДСТУ 3575-97, патентні дослідження передбачають здійснення наступних основних етапів:

1. *Формулювання завдання на проведення патентних досліджень.* На цьому етапі визначається мета досліджень, об'єкт дослідження, а також встановлюється основні вимоги до обсягу і глибини аналізу патентної інформації. Для створення обертально – поворотного пристрою на модульному принципі, завданням є виявлення існуючих технічних рішень та патентів у сфері пристроїв для позиціонування деталей під час зварювання.
2. *Підбір інформаційних джерел і розробка стратегії пошуку.* Застосовується як тематичний пошук, так, як і пошук за класифікаційними індексами (наприклад, Міжнародна патентна класифікація – МКП). До джерел відносяться офіційні патентні бази даних, такі, як Espacenet, WIPO, Державне підприємство «Український інститут інтелектуальної власності» (Укрпатент) [16].
3. *Проведення пошуку патентної інформації.* Пошук виконується відповідно до розробленої стратегії. Важливо забезпечити повноту охоплення для мінімізації ризику дублювання вже відомих рішень або порушення прав третіх осіб.

4. *Аналіз, систематизація та оцінювання знайденої інформації.* На цьому етапі відбувається вивчення суті виявлених технічних рішень, їхнього технічного рівня, правового статусу, актуальності та придатності для подальшого використання або обґрунтування новизни власної розробки.
5. *Оформлення результатів патентних досліджень.* Згідно ДСТУ 3575-97, результати повинні оформлюватися у вигляді звіту про патентні дослідження, який включає опис проведених ним дій, висновки щодо патентної чистоти розробки, обґрунтування технічного рівня і новизни рішення, а також рекомендації щодо подальших дій [15].

Особливо важливим є поняття «патентної чистоти» розробки, яке визначається як відсутність у виробі чи технології ознак, що охороняються чинними патентами третіх осіб. Для оберально – поворотного пристрою на модульному принципі це має вирішальне значення, оскільки недотримання патентної чистоти може призвести до юридичних спорів, фінансових витрат або заборони використання технологій.

Крім того, ДСТУ 3575-97 наголошує на необхідності періодичного оновлення патентних досліджень на всіх етапах створення продукції: від концепції до серійного виробництва. Таким чином, патентні дослідження не є одноразовою процедурою, а супроводжують увесь інноваційний цикл виробу.

Важливо зазначити, що результати патентних досліджень дозволяють не лише мінімізувати ризики, але й отримати цінну інформацію про найновіші технічні досягнення, тенденції розвитку технологій, рівень конкурентоспроможності власної розробки та потенційні напрями для подальших науково-дослідних робіт [17].

Проведення патентних досліджень згідно ДСТУ 3575-97 є обов'язковим елементом комплексної підготовки будь-якої науково-дослідної або конструкторської роботи, спрямованої на створення нових технічних рішень у будь-якій галузі техніки, включаючи розробку оберально – поворотних пристроїв для зварювання.

2.2. Патентно-інформаційні дослідження по темі «обертально – поворотних пристроїв»

Обертально – поворотні пристрої (ОПП) (рис.2.1) являють собою спеціалізовані технічні засоби, призначені для надійної фіксації, обертання та нахилу зварювальних деталей у просторі з метою забезпечення оптимального положення зварного шва при проведенні робіт. Ці пристрої дозволяють змінювати просторову орієнтацію об'єкта, що значно спрощує доступ до зварних зон, покращує якість шва та підвищує ефективність виконання процесу.

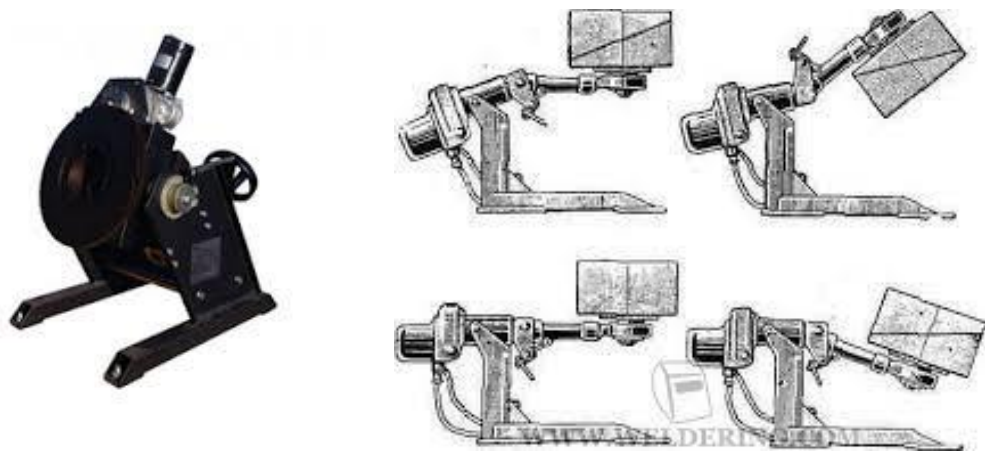


Рисунок 2.1.- Приклади обертально-поворотних пристроїв [15,16]

Сутність обертально – поворотних пристроїв полягає у поєднанні двох основних видів руху (рис.2.2, 2.3), а саме:

- обертання деталі навколо горизонтальної чи вертикальної осі;

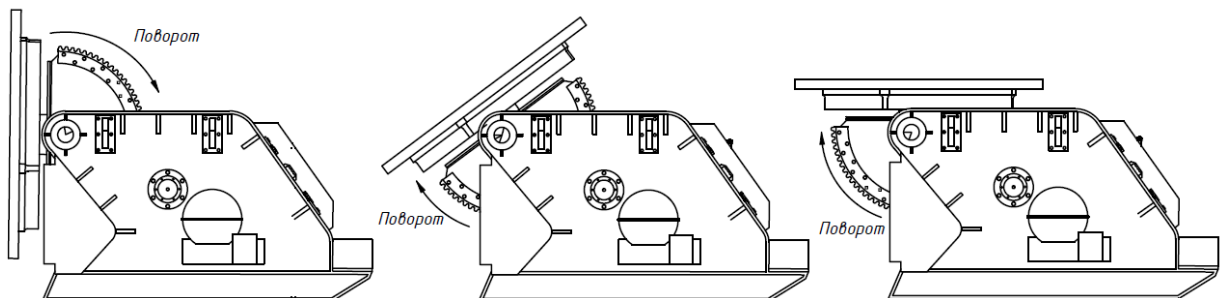


Рисунок 2.2. - Схема повороту ОПП

- повороту деталі навколо другої осі для встановлення у потрібне положення.

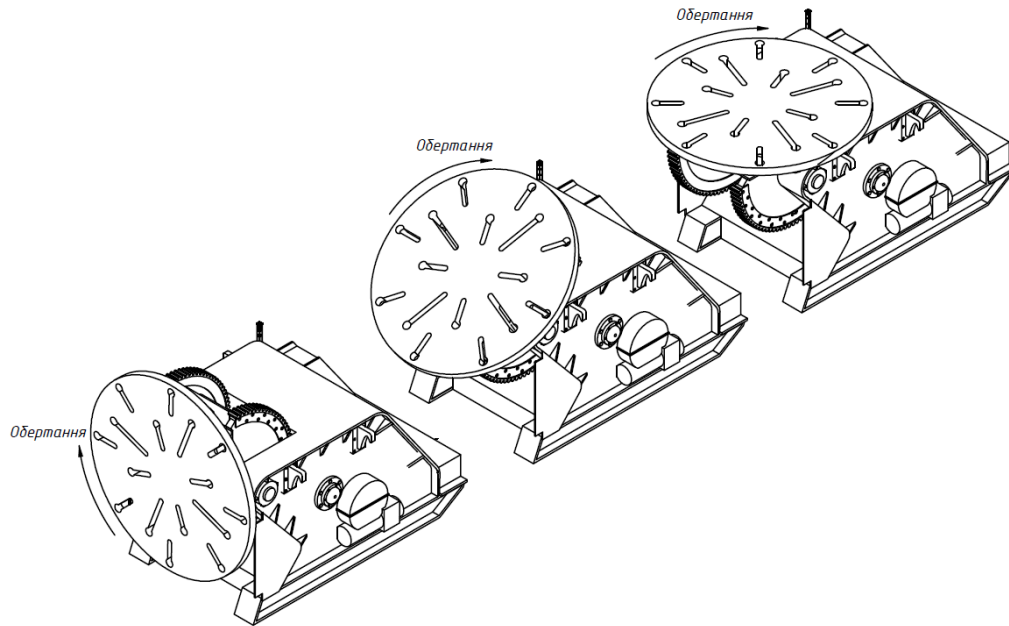


Рисунок 2.3. - Схема обертання ОПП

Такий підхід дозволяє виготовляти чи обертати вироби у зручних просторових положеннях, наближаючи їх до умов плоского зварювання, яке є найефективнішим та найменш дефектним.

Згідно з методологією, визначеною в ДСТУ 3575-97 [17], патентний пошук розпочався з формулювання ключових понять: «обертально – поворотний пристрій», «позиціонування для зварювання», «модульні конструкції поворотних механізмів». На базі сформованих понять було визначено міжнародні патентні класифікаційні індекси, такі, як B23K 37/04 (Позиціонування деталей під час зварювання), B23Q 1/54 (Поворотні або нахильні столи для обробних верстатів) та F16H (Передачі, механічні елементи передач) [18].

Основними базами для пошуку були обрані Espacenet (ЕРО), Patentscope(WIPO) та база Укрпатенту. Для забезпечення повноти пошуку було враховано також Google Patents та деякі конструкції подібних пристроїв, що описуються у технічній літературі. [18-22]

Аналіз виявлених патентів показав, що основні інновації у сфері ОПП зосереджені на таких напрямках, як:

- модульність конструкції для швидкої зміни конфігурації пристрою;
- Підвищення точності позиціонування деталі за рахунок вдосконалення приводних систем;
- Інтеграція систем керування з програмованими контролерами (PLC);
- Використання легких і міцних матеріалів для зменшення маси конструкцій при збереженні високої жорсткості.

Чудовим прикладом модульного підходу слугує рішення, що запропоноване у патенті WO2011045078A1 [23]., де представлено поворотний стіл із змінними модулями приводів, що дозволяє адаптувати пристрій до деталей різних розмірів та маси без необхідності повного демонтажу.

У свою чергу, на рис.2.4 представлений зварювальний маніпулятор M11010. Цей пристрій являється більш класичним прикладом обертально – поворотного пристрою. Він складається з підставки 6, на ній у свою чергу змонтований електродвигун 10, редуктор нахилу 11 та кронштейни 12, на які змонтований блок управління 7, а також редуктор 3, що відповідальний за обертання планшайби 1. Цей маніпулятор оснащений педаллю 8, яка служить для дистанційного керування маніпулятором працівником.

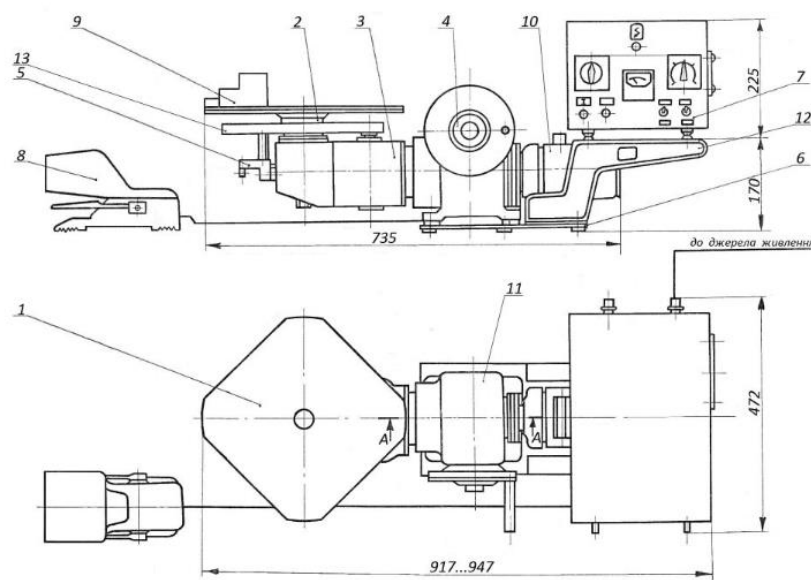


Рисунок.2.4. Зварювальний маніпулятор M11010:

Цей маніпулятор (рис.2.5) має систему нахилу, що реалізована одноступінчастим черв'ячним редуктором, що фіксується на підставці 6. У свою

чергу тихохідний вал – це порожниста труба 1, на якій змонтовано черв'ячне колесо 2. Кінець валу виконаний як фланець, що служить для кріплення до редуктора, який обертає планшайбу.

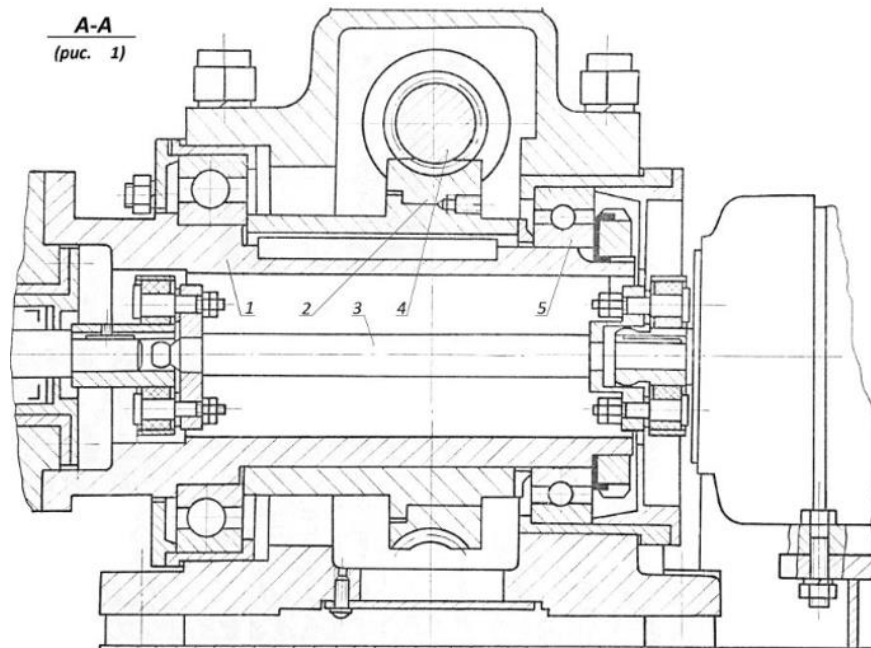


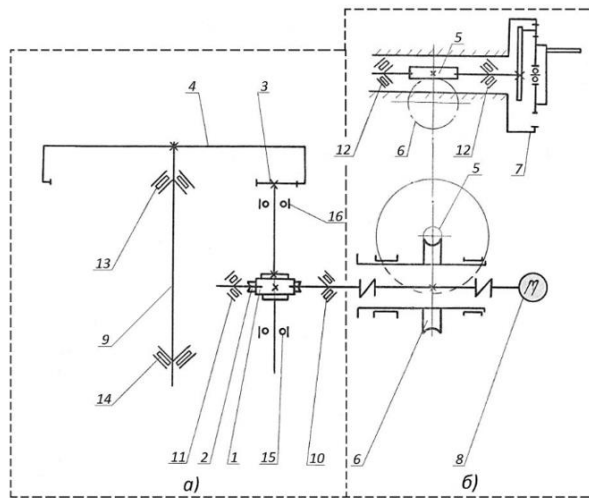
Рисунок 2.5 — Розріз А - А рисунку 2.4

Згідно з рисунком 2.5, показано конструктивну схему, яка включає трубу-вал(1), черв'ячне колесо(2), проміжний вал(3), вал черв'яка(4) та підшипник(5), що забезпечують взаємодію елементів у складі обертального вузла.

У вал- трубі знаходяться елементи, які забезпечують з'єднання валу електродвигуна з валом редуктора, який і відповідає за обертання планшайби. Ці компоненти включають у себе проміжний вал 3, що оснащений двома еластичними муфтами. На валу черв'яка 4 змонтований маховик, що розташований на зовнішній стороні. Цей маховик інтегрує внутрішній планетарний редуктор (рис.2.6). Вал – трубу тримають два підшипники ковзання, під номером 5.

Черв'ячний редуктор обертання планшайби – основний механізм приводу обертання. Черв'ячна пара цього редуктора зображена на рис.2.6, позиції 1,2 і має самогальмуючі властивості. На вихідному валу черв'ячного колеса розташована шестерня, що з'єднана із зубчастим колесом шпіндельного вузла.

Редуктор обертання фіксується з одного боку до фланця вал-труби редуктора нахилу, а з іншого до кріплення шпиндельного вузла, таким чином забезпечується стабільна робота механізму обертання.



*Рисунок 2.6 —Схема кінематична маніпулятора M11010
а – схема приводу обертання, б – схема приводу нахилу планшайби*

На рисунку 2.6 представлено конструкцію приводу, яка складається з черв'яка приводу обертання планшайби (1), черв'ячного колеса приводу (2), пари зубчастих шестерень (3,4), черв'яка приводу нахилу (5), черв'ячного колеса приводу нахилу (6), внутрішнього редуктора, що являється планетарним (7), електродвигуна (8), шпинделя (9), а також підшипників (10, 11, 12, 13, 14, 15, 16), що забезпечують підтримку і стабільну роботу всіх рухомих елементів системи.

Шпиндельний вузол складається зі шпинделя, зубчастого колеса та струмознімача. Весь шпиндель знаходиться у корпусі. Встановлений він на підшипниках кочення. Він має порожнисту конструкцію і має Конус Морзе на верхньому кінці порожнини.

На шпинделі встановлена зубчаста передача із внутрішнім зачепленням (Рис.2.7), що обертається через малий шестерневий елемент редуктора обертання.

Корпус шпиндельного вузла фіксується до корпусу редуктора обертання. Торцева частина корпусу має змонтований струмознімач із графітовими щітками,

який забезпечує відведення струму, що виникає під час зварювання від маніпулятора.

Текстолітовий кронштейн, що монтується на корпусі, утримує пастину, на якій розміщено три стакани для мідно – графітових щіток. Ці щітки щільно притискаються до внутрішньої поверхні зубчастого за допомогою пружин. Струм, що відводиться від щіток, поступає на мідну шину, а звідти до джерела живлення. Кронштейн із текстоліта виступає, як ізолятор для струмознімача, оберігаючи маніпулятор від електричних контактів.

Наступним розглядаємо зварювальний маніпулятор легкого типу Т-25М, який представлений на рис.2.7 .

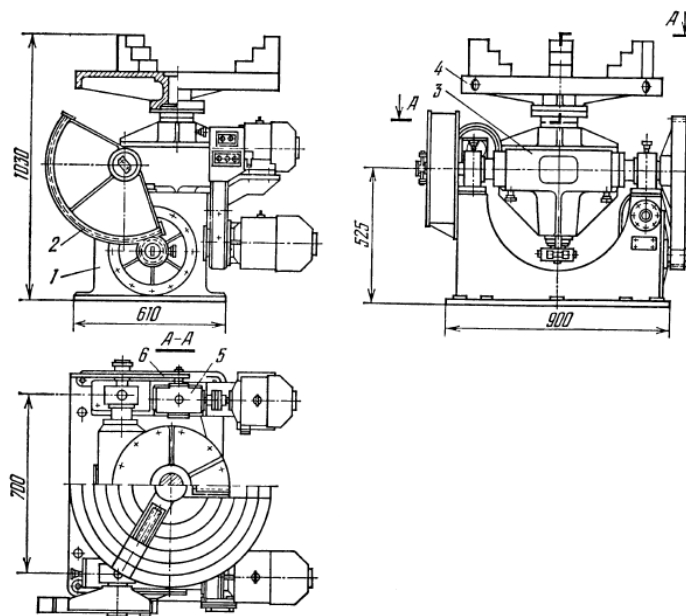


Рисунок 2.7. — Схема конструкції зварювального маніпулятора Т-25М

На рисунку 2.7 наведено конструктивну схему пристрою, яка включає раму(1), механізм, що забезпечує нахил (2), поворотну траверсу (3), планшайбу(4), механізм обертання (5) та комплект змінних шестерень (6), що забезпечують реалізацію функціональних можливостей пристрою.

Цей пристрій може обертати виріб зі швидкістю від 0.3 до 1 м/хв, причому діаметр виробу коливається від 0,25 до 0,9 м, а його маса може досягати 1 тони. Він допускає грузовий момент відносно осі нахилу до 900 кгс*м, відносно осі

обертання до 200 кгс*м. Швидкість обертання регулюється за допомогою змінних шестерень 5 (рис.2.8), де зображений головний привід пристрою.

У цьому маніпуляторі геометричне співвідношення осі черв'яка останньої передачі з віссю нахилу дозволяє встановити електропривід обертання стаціонарно, не використовуючи поворотну траверсу. Це компонування приводу призводить, що осі нахилу та обертання планшайби не перетинаються, що дозволяє вже у свою чергу максимально знизити момент навантаження при положенні, коли планшайба нахилена. В часткових випадках це призводить до покращення вантажопідйомності пристрою.

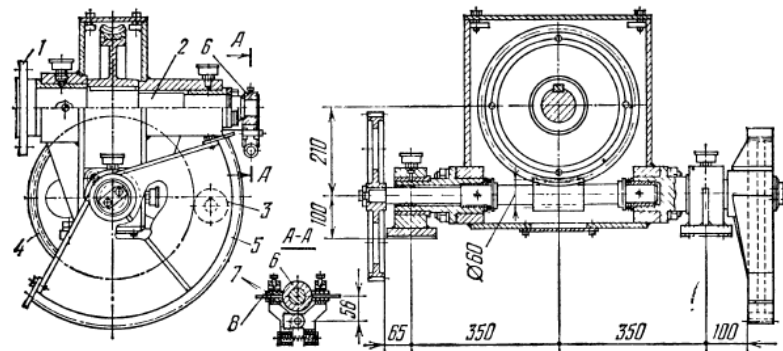


Рисунок 2.8. — Головний привід маніпулятора Т — 25М

Під час аналізу конструкції головного приводу даного маніпулятора можна виділити основні елементи, серед яких фланець, який кріпить планшайбу (1), шпindel (2), несуча змінна шестерня редуктора (3), змінна шестерня, що є ведучою (4), зубчастий сектор нахилу планшайби (5), а також елементи системи струмовідводу, що включають бронзове кільце (6), мідно-сітчасті щітки (7) та наконечник проводу (8) для забезпечення електричного з'єднання.

Механізм обертання у пристрої складається з двох черв'ячних передач, що йдуть послідовно та з'єднані між собою парою зубчастих коліс, які являються змінними.

Остання кінематична ланка цього механізму виконана, як черв'ячна передача. Це являється однією з рекомендацій у проектуванні обертально – поворотних пристроїв, і обґрунтовано її здатністю забезпечувати більш плавний

рух, порівняно з іншими типами зубчастих передач, таких як конічні та циліндричні.

В цей же час варто зазначити, що далеко не усі виробники використовують саме черв'ячну передачу, як останню кінематичну ланку. До прикладу компанія «Аронсон», використовує конічні зубчасті передачі у маніпуляторах свого виробництва. Це робиться в основному для спрощення механізму обертання планшайби (рис.2.9).

Цікавим відносно компоновки та конструкції є саніпулятор важкого типу У-191М, вантожопідйомністю до 20 тон. Цей пристрій вітчизняної розробки і був створений у Інституті електрозварювання ім. Є.О.Патона. Допустимий вантажний момент відносно осі нахилу робочого органу досягає 20 т*м, а крутний момент, що являється допустимим осі обертання становить 1,6 т*м.

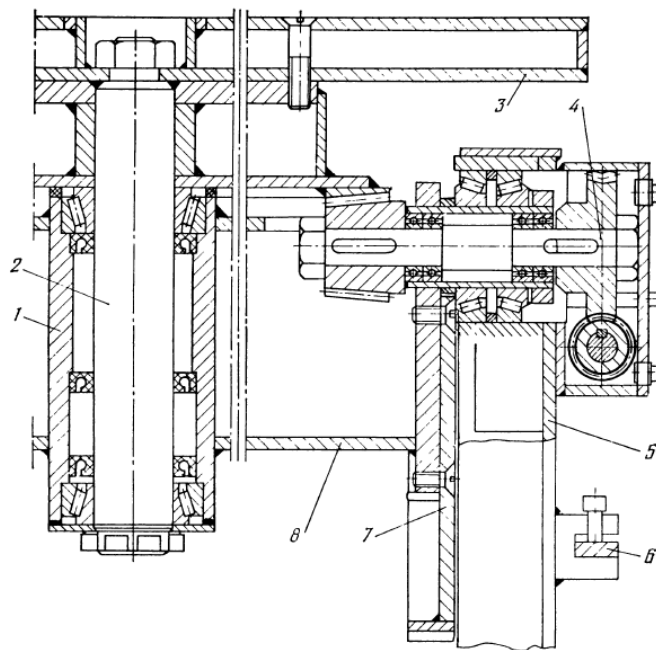


Рисунок 2.9. — Зварювальний маніпулятор фірми “Аронсон”

Конструкція цього маніпулятора включає корпус (1), на якому закріплюється сам шпиндель (2) із установленою на ньому планшайбою (3), ведучий вал механізму обертання (4), станину (5), привід зварювання (6), зубчастий сектор механізму повороту (7), а також поворотну траверсу (8), яка забезпечує зміну просторового положення виробу.

Швидкість обертання регулюється в межах від 0,24 до 0,006 об/хв. Така різниця швидкості та її зміна здійснюється шляхом плавного регулювання частоти обертання двигуна, який являється двигуном постійного струму, а також перемиканням коробки швидкостей приводного механізму, яка має чотири ступені. І забезпечує можливість коригування швидкості зварювання в діапазоні від 0,2 до 1 м/хв, причому діаметр встановленого виробу коливається від 2 до 4м.

У цьому механізмі незмінна швидкість нахилу, яка становить 0,068 об/хв, тобто нахил на 90° відбувається за 3,7 хв. Максимальний кут нахилу вперед складає 105° , а назад – 15° . Отже загальний кут нахилу дорівнює 120° . Щоб забезпечити своєчасне та автоматичне припинення нахилу у заданих положеннях використовуються кінцеві чи шляхові вимикача. На вимикачі діє кулачковий диск 3, який з'єднаний з поворотною віссю нахилу. Зміна кута нахилу регулюється шляхом переміщення кулачків диску. Змінивши його, кулачки відповідно взаємодіють з вимикачами і зупиняють нахил в заданому положенні, відповідно до визначеної технології зварювання та конструкції деталі.

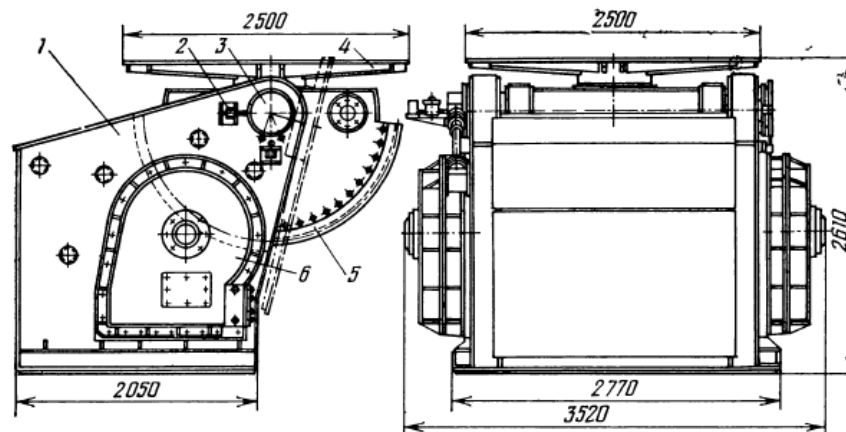


Рисунок 2.10. - Схема конструкції зварювального маніпулятора Т-25М

Загальна конструкція цього маніпулятора передбачає наявність станини (1), на якій розміщено кінцевий вимикач (2), кулачковий диск (3), планшайбу (4), зубчастий сектор приводу нахилу (5) та редуктор (6), що забезпечує привід і керування механізмом зміни нахилу планшайби.

Далі розглянемо кінематичні схеми механізмів маніпулятора (рис.2.11,2.12).

Механізм обертання встановлюється стаціонарно на станині. Лише остання черв'ячна передача на шпинделі 1 та блок паразитних шестерень монтуються на нахильній частині маніпулятора. При нахилі планшайби вони обертаються разом із нею навколо осі нахилу 11. Саме така конструкція маніпулятора являється наглядним прикладом дотримання вимог раціональної компоновки при конструюванні подібних маніпуляторів.

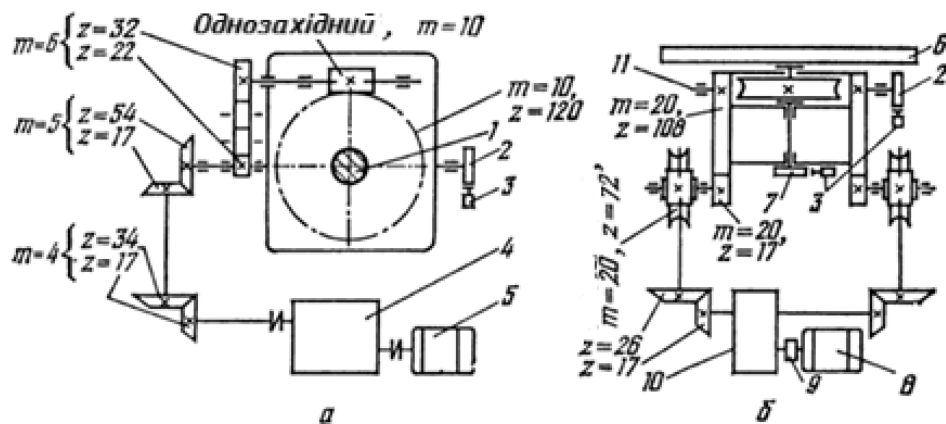


Рисунок 2.11 — Кінематична схема маніпулятора У-191М
а - механізм обертання планшайби; б — механізм нахилу

На кінематичній схемі представлено конструкцію, що включає шпиндель (1), кулачковий управляючий диск нахилу (2), кінцевий вимикач (3), коробку швидкостей (4), електродвигун потужністю 6 кВт (5), планшайбу (6), кулачковий диск обертання планшайби (7), електродвигун потужністю 10 кВт (8) з частотою обертання 1500 об/хв, електромагнітне гальмо (9), зубчастий циліндричний редуктор (10) та вісь нахилу планшайби (11), що забезпечують виконання обертальних і нахильних рухів у процесі роботи пристрою.

Наступним розглядаємо кінематичну схему коробки швидкостей (рис.2.12). Вона входить у склад механізму обертання маніпулятора У-191М.

Кінематична схема коробки швидкостей маніпулятора У-191М, представлена на рисунку 2.12, складається із зубчастих коліс (1-4), що перемикаються, вихідного валу (5), односторонньої кулачкової муфти (6), електромагнітної муфти (7) та електродвигуна потужністю 6 кВт (8), які спільно забезпечують передачу та регулювання обертального руху в механізмі маніпулятора.

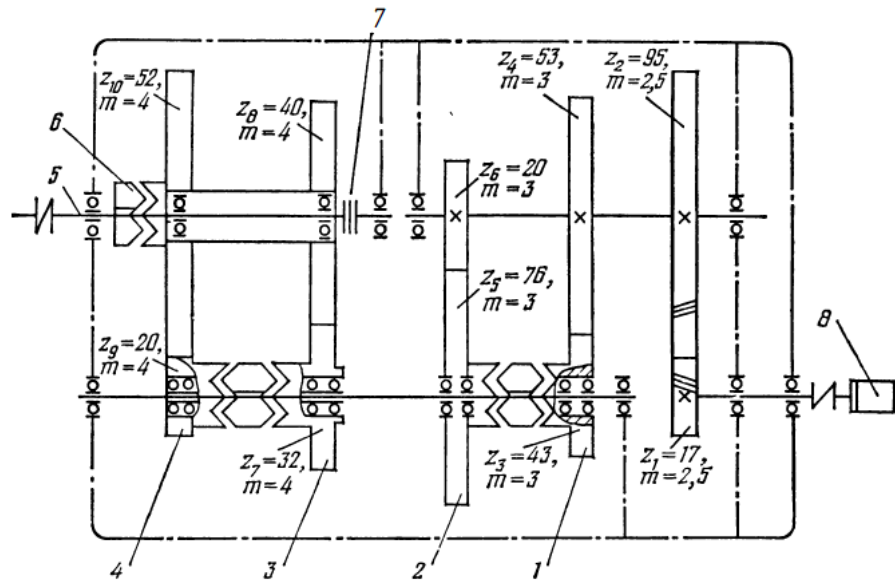


Рисунок 2.12 — Кінематична схема коробки швидкостей маніпулятора U191M

Усі зубчасті колеса у цій коробці швидкостей постійно перебувають у зачепленні, а регулювання швидкостей, зокрема перемикання передач, здійснюється з використанням двохсторонніх кулачкових муфт, які також можна побачити на кінематичній схемі. Управління цими муфтами здійснюється за допомогою рукояток, що виведені за корпус редуктора. Вихідний вал 5 може бути відключений від приводу за допомогою кулачкової муфти 6, яка керується також рукояткою, виведеною за корпус, або ж електромагнітною муфтою 7, яке вже керується дистанційно.

Також потрібно зазначити, що цей маніпулятор має подвійну систему відключення вихідного валу. Вона доцільна у випадку забезпечення поетапного наплавлення виробу із періодичним відключенням приводу обертання. Механізм обертання відключається двома різними способами, а саме:

- За допомогою електродвигуна 8;
- За допомогою електромагнітної муфти 7.

При використанні першого способу, блок із зубчастими колесами залишається у зачепленні із кулачковою муфтою вихідного валу 6 постійно. На відміну від першого, при другому способі електродвигун продовжує працювати, а кулачкова муфта 6 – відключена.

Використання зупинки механізму через відключення електродвигуна буває часто потрібним та обґрунтовується тривалими зупинками у роботі маніпулятора. До прикладу при тривалому проварюванні однієї зони. У свою ж чергу, відключення за допомогою електромуфти, використовується при коротких або періодичних зупинках механізму, так, як інерційність виробу, що закріплений у пристрої – мінімальна.. Це пояснюється тим, що маси частин приводного механізму, що обертаються з великою швидкістю і створюють найбільший динамічний момент, будуть неактивні під час коротких чи періодичних зупинках пристрою.

В залежності від положення двосторонніх кулачкових муфт, можна отримати різні передаточні відношення коробки швидкостей. Вони наведені у табл.2.1.

Таблиця 2.1 – Передаточні відношення коробки швидкостей залежно від положення двосторонніх муфт

<i>Задіяні шестерні</i>	<i>1 та 3</i>	<i>1 та 4</i>	<i>2 та 3</i>	<i>2 та 4</i>
<i>Передаточні відношення коробки швидкостей</i>	<i>5,7</i>	<i>11,8</i>	<i>26,6</i>	<i>55,2</i>

Якщо оцінювати усі вузли маніпулятора, то потрібно зазначити, що найбільше навантаження несе саме шпиндель та механізм обертання та нахилу, які можна побачити на Рис.2.13

В корпусі 8 розташовані опори шпинделя 11, при цьому ж цей корпус є і картер черв'ячної передачі механізму обертання пристрою. І в цей же час, він несуча частина нахильної частини маніпулятора. Вздовж осі нахилу корпус обладнується двома втулками 1, в які пресуються опорні цапфи 2 маніпулятора. Вони всередині порожнисті, що дозволяє в лівій цапфі розміщувати приводний вал з ведучим зубчастим колесом 3. Завдяки співвісному розташуванню ведучого зубчастого колеса та опорних цапф, стає можливим стаціонарне розміщення всіх інших приводів механізму обертання, зокрема електродвигуна, коробки швидкостей та проміжної трансмісії.

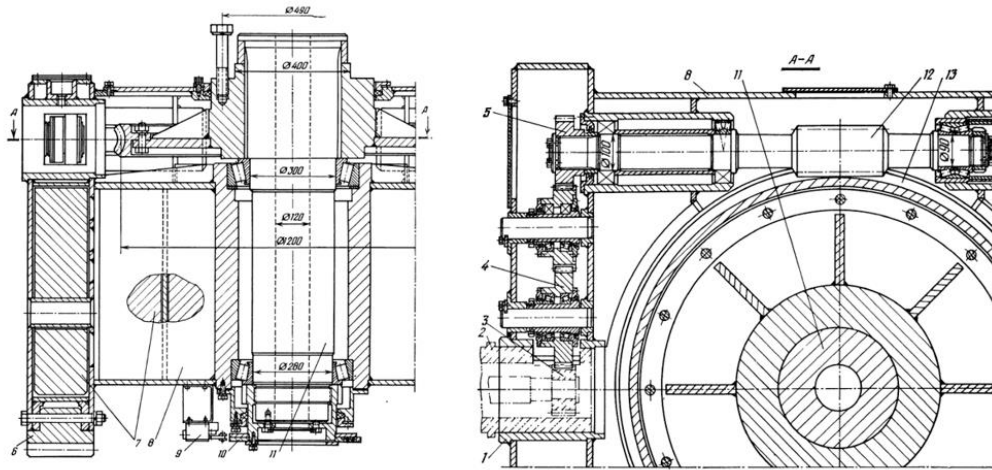


Рисунок 2.13 — Шпиндель маніпулятора Y-191M

Конструкція шпинделя даного маніпулятора включає втулку для посадки цапфи (1), саму цапфу (2), ведучу шестерню механізму обертання (3) з модулем 6 та числом зубців 22, систему паразитних шестерень (4), ведучу зубчасту передачу (5) з параметрами $m = 6$ і $z = 32$, зубчастий сектор (6) із модулем 20 та загальною кількістю зубців 108, контргрузи (7), зварний корпус (8), кінцевий вимикач (9), кулачковий диск шагового пристрою (10), власне шпиндель (11), черв'як (12) з модулем 10 і одним зубцем, а також відповідне черв'ячне колесо (13) з модулем 10 і 120 зубцями.

До корпусу з обох сторін кріпляться зубчасті сектори 6 механізму нахилу, вони кріпляться симетрично за допомогою болтів.

Аналіз патентної інформації дозволив визначити ключові технічні характеристики, якими повинні володіти сучасні обертально – поворотні пристрої для ефективної роботи в умовах автоматизованого зварювання, а саме:

- Діапазон обертання: $0 - 360^\circ$, із фіксацією через кожні 1° ;
- Максимальне навантаження від 50 до 10000 кг;
- Час повного обертання від 10 до 120 с. , в залежності від навантаження;
- Точність позиціонування до $0,1^\circ$;
- Можливість інтеграції з промисловими роботами за допомогою стандартних інтерфейсів (Ethernet/IP, ProfiNet).

Таким чином, на основі проведеного патентно – інформаційного пошуку сформовані вимоги до обертаньно – поворотного пристрою для подальшої роботи.

Такими є:

- Модульність конструкції;
- Висока точність позиціонування;
- Адаптивність до різних типів деталей;
- Сумісність із сучасними системами автоматизації виробництва.

Патентно-інформаційні дослідження підтверджують актуальність розробки ОПП для зварювальних робіт, побудованих на модульному принципі, що надає можливість оперативно реагувати на зміни виробничих завдань, знижувати витрати на технічне обслуговування та розширювати функціональні можливості обладнання.

2.3. Висновки

Проведені патентно-інформаційні дослідження за темою обертально-поворотних пристроїв дозволили сформулювати глибоке розуміння поточного стану техніки у зазначеній сфері, визначити рівень інноваційності вже існуючих рішень та ідентифікувати можливості для вдосконалення конструкцій з урахуванням принципів модульності, технологічності та адаптивності до різних умов експлуатації. Станом на зараз інтенсивний розвиток галузей, пов'язаних із зварювальними роботизованими системами, верстатобудуванням, авіакосмічним і бронетанковим машинобудуванням, спричинив підвищений попит на високоточні, мобільні та багатофункціональні обертально-поворотні пристрої [24-26].

Аналіз наявних патентів, науково-технічної літератури та ринкових зразків показав, що більшість існуючих пристроїв орієнтовані або на вузько спеціалізовані задачі, або розроблені без врахування модульного принципу, що значно знижує їхню адаптивність, технологічну гнучкість і можливість інтеграції в сучасні виробничі лінії з гнучкою конфігурацією [27,28]. Пристрої, які

переважно базуються на жорстко фіксованих кінематичних схемах, не здатні ефективно адаптуватися до змінюваних параметрів оброблювального виробу, зокрема габаритів, ваги, геометрії та особливостей зварювальних швів [25].

Здійснений аналіз виявив певні закономірності у розвитку конструкцій обертально-поворотних пристроїв. По-перше, простежується чітка еволюція від примітивних механічних поворотних столів до систем з числовим програмним керуванням (ЧПК), де активно впроваджуються цифрові приводи, інерційні датчики, системи стабілізації та навіть штучний інтелект [24,29]. По-друге, актуальним трендом зараз є перехід до модульної архітектури, що дозволяє створювати гнучкі конфігурації пристроїв під конкретні виробничі задачі, однак у практичній реалізації цей підхід все ще недостатньо опрацьований у більшості представлених на ринку систем [28,30].

Виявлені конструкції мають низку обмежень. Часто вони розраховані на обробку елементів із невеликою масою, або навпаки – орієнтовані лише на важкі габаритні вироби, що робить їхню експлуатацію нераціональною в умовах змінної номенклатури продукції [27]. Окрім того, у переважній більшості рішень простежується недостатня увага до питання ергономіки обслуговування, безпеки оператора та уніфікації елементів, що ускладнює обслуговування та ремонт [29].

Особливо слід відзначити, що значна частина запатентованих рішень застосовує принцип жорсткої структурної цілісності, без можливості швидкого демонтажу або заміни окремих функціональних вузлів. Це унеможливорює застосування таких пристроїв у сучасних високотехнологічних виробництвах, які потребують гнучкості, мінімізації простоїв та можливості оперативної переконфігурації обладнання [28].

Аналіз патентів за останні 15 років також показав, що хоча окремі конструкції заявляють модульний підхід, на практиці цей принцип обмежується лише сегментною заміною платформ або опор. Ідея створення повноцінно модульного обертально-поворотного пристрою, в якому всі ключові елементи – приводи, платформи, вузли керування, привід з'єднання – уніфіковані,

стандартизовані та мають можливість незалежної заміни чи компоновки в єдину систему, залишається новаторською [26,30].

Особливої уваги заслуговують рішення, в яких передбачена автоматична синхронізація обертального і поворотного рухів за допомогою електроніки. Такі підходи дають змогу забезпечити високу точність позиціонування, що критично важливо для зварювання або обробки великогабаритних деталей, зокрема корпусів бронетехніки, де похибка в градус може призвести до браку або навіть аварійної ситуації [27,31].

У контексті реалізації модульного принципу також є доцільним впровадження швидкороз'ємних з'єднань (механічних, електричних, пневматичних) між модулями, що дозволяє скоротити час переобладнання виробничої лінії [25,29]. Це створює підґрунтя для побудови так званих «реактивних» виробництв, які здатні оперативно адаптуватися до змін ринкових вимог [30].

Таким чином результати патентно-інформаційного дослідження підтверджують актуальність теми дослідження у магістерській дисертації. Аналіз показав відсутність на ринку універсального обертально-поворотного пристрою, побудованого повністю на модульному принципі, який би однозначно задовольняв вимоги гнучкості, уніфікації масштабованості, високої вантажомісткості, можливості інтеграції з ЧПК і швидкого обслуговування [24-31].

Наукова та практична новизна запропонованого підходу полягає в тому, що розробка, яка здійснюється в рамках даної дисертаційної роботи, передбачає створення конструкції, яка буде здатна адаптуватися до широкого спектру технологічних операцій, таких, як зварювання, обробки, монтажу, контролю [29,30]. Передбачене уніфіковане електронне управління, змінна архітектура механічної частини та підтримка інтелектуального позиціонування.

На відміну від типових промислових рішень (рис.2.14), розробка також враховує специфіку вітчизняного машинобудування, зокрема підприємства оборонної промисловості, де часто відсутня автоматизація на належному рівні, а

багато процесів здійснюється вручну. Отже, створення пристрою, який буде придатний як для ручного керування, так і для автоматизованих процесів, має стратегічне значення для підвищення продуктивності та якості продукції [26].

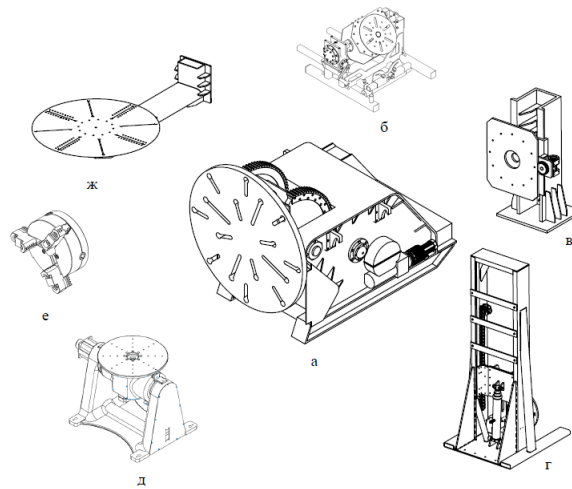


Рисунок.2.14. Набір модулів обертально-поворотних пристроїв

Узагальнюючи результати дослідження, можна стверджувати, що сучасний стан техніки у галузі обертально-поворотних пристроїв перебуває на етапі переходу від ізольованих спеціалізованих рішень до інтегрованих багатофункціональних систем. Але реальний прорив у цій сфері можливий лише за рахунок застосування системного підходу, в основі якого лежить модульний принцип проектування [28]. Саме такий підхід дозволяє забезпечити повну адаптивність системи до потреб конкретного виробництва без необхідності її повної заміни. У цьому контексті тема дисертації є не лише актуальною, а й стратегічно перспективною. Вона відкриває нові можливості для інженерного розвитку галузі, створення ефективного високотехнологічного обладнання, що відповідатиме викликам часу та забезпечить конкурентоспроможність українського виробництва у глобальному масштабі.

3. ДОСЛІДНИЦЬКИЙ

3.1. Морфологічний аналіз – системний метод пошуку нових технічних рішень

В сучасному технічному проектуванні, пошук інноваційних рішень виходить за межі традиційних евристичних підходів і дедалі більше спирається на формалізовані методи. Одним із таких методів є морфологічний аналіз (МА).

Морфологічний аналіз – це універсальний інструмент, що дозволяє систематизувати творчий процес розробки складних технічних систем. Вперше він був запропонований астрофізиком Фріцем Цвіккі із Швейцарії, ще у 40-х роках ХХ століття. Цей метод знайшов активне та широке застосування у промисловому конструюванні, дизайні, автоматизації виробництва, зокрема в аналізі обертально – поворотних пристроїв[32].

Аналіз – це декомпозиція розглядаємої ситуації у процесі проектування на окремі функціональні компоненти, з подальшим детальним вивченням кожного з цих компонентів. Його метою є уточнення та верифікація початково сформульованих цілей проекту.

Метод полягає у розкладанні складної технічної системи на певні функціональні частини чи параметри. Кожний з цих параметрів визначається кількома можливими варіантами реалізації. Побудова усіх цих можливих комбінацій параметрів створює морфологічне поле, яке слугує основою для генерування альтернативних інженерних рішень. Саме таким чином МА дозволяє не лише зберегти логічність системи, а охоплювати широкий спектр можливих конструкцій, уникаючи втрати потенційно ефективних ідей.

Значна заслуга у поширенні та адаптації морфологічного аналізу в українському технічному середовищі належить професору Кузнецову Юрію Миколайовичу, який у своїх публікаціях неодноразово підкреслював гнучкість та ефективність цього підходу при вирішенні задач конструкторського синтезу [33]. В частності, метод був успішно застосований для створення нових типів верстатів, механізмів, автоматичних пристроїв. У своїй роботі «Модулювання

Технічних систем» Ю.М. Кузнецов вказує, що при правильному структуруванні об'єкта аналізу, метод дозволяє не лише згенерувати нові конструкції, але й виділити найбільш доцільні з них заданими критеріями [34].

Якщо розглядати морфологічний аналіз у контексті обертально – поворотних пристроїв, то він є надзвичайно доречний. Адже ці пристрої характеризуються високою функціональною складністю, включаючи механізми обертання, системи фіксації, елементи керування, системи безпеки тощо.

Їхнє проектування вимагає врахування великої кількості параметрів, таких, як: діапазону кутів повороту, точності позиціонування, вантажопідйомності, габаритів, типу приводу, способу укрупнення та сутності з існуючим обладнанням. Традиційні методи часто не дозволяють враховувати всю множину можливих конфігурацій, що й обумовлює доцільність використання МА.

Методологія морфологічного аналізу складається з кількох основних етапів:

- Формалізація задачі, що являє собою чітке визначення мети дослідження та об'єкту аналізу
- Виділення параметрів, що є ідентифікацією ключових параметрів чи характеристик об'єкта, які впливають на рішення задачі.
- Генерація варіантів. Цей етап означає визначення можливих реалізацій кожного параметру.
- Побудова морфологічної матриці. На цьому етапі будуються таблиці, де кожний із стовбців відповідає параметру, а кожний з рядків – його можливим реалізаціям.
- Комбінування варіантів, а саме аналіз комбінацій реалізацій параметрів для пошуку оптимальних рішень.
- Оцінка та підбір. Оцінка оптимальних комбінацій за критеріями ефективності, вартості, надійності тощо.

У публікаціях таких авторів, як В.М. Рижов [35], С.П. Кулешов [36], а також у численних підручниках, які навчають технічної творчості, метод МА позиціонується, як один із найефективніших підходів до концептуального проектування. Особливу увагу автори приділяють його можливостям у галузях,

де важко забезпечити високу варіативність технічних рішень при одночасному дотриманні функціональної сумісності складових.

До переваг методу відносять:

1. Системність;
2. Повноту охоплення;
3. Потенціал автоматизації;
4. Можливість аналізу інноваційних рішень.

Проте варто відзначати і обмеження морфологічного аналізу. Зокрема, при великій кількості параметрів і варіантів, розмір морфологічного поля експоненціально зростає, що створює складнощі з аналізом та обробкою. У зв'язку з цим сучасна практика передбачає використання евристичних фільтрів, експертних оцінок чи методів багатокритерного аналізу, щоб вибрати та пояснити вибір найбільш доцільного рішення.

Для прикладу, у випадку розробки ОПП, параметри можуть включати: тип приводу (електричний, гідравлічний, пневматичний), кількість ступенів обертання, систему керування (ручна, ЧПК, сенсорна), тип підшипникового вузла (ковзання, кочення), метод фіксації деталей (гідрозатискач, механічний кулачок тощо).[37]

Кожен з параметрів може включати від 3 до 5 можливих варіантів, які забезпечать десятки, то й сотні можливих та унікальних технічних конфігурацій, які раніше могли бути просто неочевидними. Цей підхід дозволяє одночасно врахувати інноваційність, функціональність та техніко – економічну доцільність рішень.

У майбутньому, із розширенням цифрових можливостей та впровадженням штучного інтелекту, морфологічний аналіз трансформується у ще більш елективний інструмент. Зокрема, використовуються так звані морфологічні генератори проектів, які автоматично створюють конструктивні моделі на основі введених параметрів. Це особливо актуально для малосерійного виробництва, прототипування та індивідуального конструювання пристроїв для спеціалізованих задач.

3.2. Побудова морфологічної моделі ОПП.

Морфологічний аналіз у даній роботі спрямований на формування можливих конструктивних конфігурацій обертально-поворотний пристроїв (ОПП), модульної структури які забезпечують інтеграцію в архітектуру багатофункціональної інтелектуальної міні-фабрики[38]. Для досягнення цієї мети застосовується системно-морфологічний підхід[39-41], що дозволяє здійснити структурно-функціональний синтез об'єкта на основі поетапного дослідження.

Постановка задачі вирішується через послідовну реалізацію наступних етапів:

1. Формалізація дослідницької задачі відповідно до визначеної мети, що включає уточнення вихідних вимог та обмежень.
2. Морфологічна декомпозиція об'єкта, в рамках якої здійснюється поділ конструкції ОПП на ключові морфологічні елементи, а саме: блок обертальний (БО), блок поворотний (БП), перехідник (П), основа (О). Для елементів БО та БП визначаються траєкторії їхніх можливих рухів у системі координат X , Y , Z із відповідним графічним представленням форм виконання.
3. Побудова морфологічної структури, що реалізується у вигляді морфологічної таблиці та матриці. Ці інструменти слугують засобами систематизації ознак та варіантів їх реалізації, на основі чого здійснюється подальший варіативний аналіз.
4. Варіативний синтез конструкцій, у процесі якого здійснюється комбінування альтернатив морфологічних ознак з метою генерації потенційних структурних рішень. В результаті, формуються як морфологічні [39-41], так і структурні [42] формули макетів, що описують функціональні конфігурації розроблюваних пристроїв.

5. Пріоретизація конструктивних варіантів, яка передбачає відбір найбільш доцільних конфігурацій за допомогою методів експертного оцінювання[43] Критеріями відбору виступають:

- 1) Мінімізація кількості складових блоків;
- 2) Зменшення габаритних розмірів;
- 3) Потенційна можливість масштабування шляхом додавання модулів.

У нашому випадку, виходячи з функціонального поділу пристрою, було визначено шість основних морфологічних ознак, якими є:

1. Форма виконання блоку обертального (БО);
2. Тип обертального руху;
3. Форма виконання блоку поворотного (БП);
4. Тип поворотного руху;
5. Конфігурація перехідника
6. Тип основи.

На першому етапі побудови морфологічної модулі необхідно виділити основні функціональні блоки обертально поворотного пристрою. Ці блоки мають відображати структурну та кінематичну функцію елемента пристрою. Такими блоками будуть:

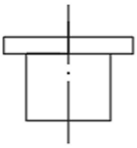
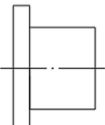
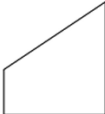
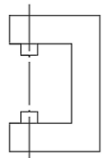
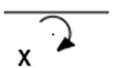
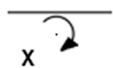
- Блок обертальний (БО), що забезпечує поворот конструкції навколо осі, як правило вертикальної (однак можливі і альтернативи);
- Блоку поворотного (БП), що реалізує нахил або додаткові ступені свободи, забезпечуючи маневреність конструкції.
- Нерухомі частини (НЧ), що включають у себе основу (О), яка взаємодіє з робочою поверхнею та перехідник (П), який може слугувати адаптером між активними модулями.

Таблиця 3.1 ілюструє розгорнуту морфологічну таблицю, що складається з усіх можливих варіантів для кожного із зазначених блоків.

Розглядаючи форму виконання блоку обертального (БО), бачимо, що це є циліндричний тип виконання блоку. Цей варіант обумовлений переважним

використанням валів та підшипників у системах обертання. Також зазначаємо, що подібний тип виконання являється стандартним для подібних пристроїв[43].

Таблиця 3.1 – Розгорнута морфологічна таблиця обертально – поворотного пристрою

Блок обертальний (БО)		Блок поворотний (БП)		Нерухомі частини (НЧ)	
1. Форма виконання	2. Рух	3. Форма виконання	4. Рух	5. Перехідник (П)	6. Основа (О)
1.1. 	2.1. 	3.1. 	4.1. 	5.1. 	6.1. 
	2.2. 	3.2. 	4.2. 	5.2. 	
	2.3 		4.3. 	5.3. <i>Перехідник відсутній</i>	
	2.4 		4.4. 		

Далі розглядаємо чотири основні варіанти обертального руху. Такими є:

- Обертальний рух навколо осі Z, що являється класичним випадком та часто використовується у поворотних столах;
- Обертання навколо осі Y. Такий рух забезпечує доступ до бокових поверхонь закріпленої деталі;
- Комбіноване обертання Z/Y, за рахунок якого досягається гнучкість положення;

- Обертання навколо Х. Цей тип руху застосовується досить рідко, однак він доцільний у випадку нестандартного розташування робочого середовища.

Якщо розглядати виконання блоку поворотного (БП), то варто зазначити, що цей блок може бути реалізований як консольна конструкція з однією віссю обертання, або ж таким же циліндричним блоком з віссю обертання. Циліндричний тип зручний при компактних компоновках, а консоль дає змогу працювати з великогабаритними об'єктами. З конструкторської точки зору, консольний блок складніший, вимагає точнішого балансування та розрахунків на вигин та кручення.

При поворотному русі варіанти компоновки аналогічні до обертального руху, а саме Z, y, Z/Y, X. Але в цей же час важливо відзначити, що в реальності поворотний блок часто є підпорядкованим по керування обертальному. Тому в архітектурі ОПП важливо враховувати, які осі сумісні, а які – взаємовиключні.

Для визначення робочої зони маніпулятора в тривимірному просторі можна застосовувати наступну формулу радіусного охоплення:

$$R = \sqrt{L_1^2 + L_2^2 + 2L_1L_2\cos(\theta)} \quad (3.1)$$

де L_1 – довжина плеча блоку обертального;

L_2 – довжина плеча блоку поворотного;

θ – кут між плечами блоків.

По перехіднику було визначено два варіанти виконання: клиноподібний адаптер та прямокутний. Перший варіант виконання більш технологічний при встановленні під кутом блоку обертального, а другий більш універсальний. В загальному форма перехідника важливий елемент конструкції, так, як вона критично впливає на центр мас механізму, передачу зусиль між блоками та сполучення геометрії базових площин.

Основа у свою чергу служить, як опора пристрою та точка фіксації до землі. Відповідно до умов експлуатації вона може бути стаціонарною,

мобільною, чи змінною. У даному морфологічному аналізі ми розглядаємо стаціонарну основу, як базовий варіант.

На цьому етапі доцільно провести розрахунок кількості степенів свободи пристрою(СС). Це можна зробити використавши наступну формулу:

$$CC = n_{\text{БО}} + n_{\text{БП}} \quad (3.2)$$

де $n_{\text{БО}}$ – кількість незалежних степенів свободи блоку оберտального;

$n_{\text{БП}}$ – кількість степенів свободи блоку поворотного.

Після формування морфологічної таблиці доцільно виконати обрахунок кількості всіх можливих комбінацій, що визначають кількість альтернативних архітектур ОПП. Це ми робимо використовуючи наступну формулу:

$$N_k = n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6 \quad (3.3)$$

де n_i – кількість варіантів для кожної з морфологічних ознак.

Провівши розрахунок – отримуємо:

$$N_k = 4 \times 2 \times 4 \times 3 = 96 \quad (3.4)$$

Ми отримуємо 96 можливих варіантів, що свідчить про значний простір для оптимізації, що актуалізує необхідність введення обмежувальних критеріїв та вагових коефіцієнтів, оскільки далеко не всі 96 варіантів є доцільними з техніко-економічної точки зору.

3.3. Синтез компоновок ОПП з написанням морфологічних і структурних формул.

Таблиця 3.2 – морфологічні та координатні структурні формули компоновок

№ варіанта	Морфологічна формула	Структурна формула
1	2	3
X_1	$ 1,1 - 2,1 \wedge 3,1 - 4,1 \wedge 5,1 - 6,1 $	$d_z e_z O$
X_2	$ 1,1 - 2,1 \wedge 3,1 - 4,1 \wedge 5,3 - 6,1 $	$d_z e_z O$
X_3	$ 1,1 - 2,2 \wedge 3,1 - 4,2 \wedge 5,2 - 6,1 $	$d_z e_y O$

Продовження таблиці 3.2 – морфологічні та координатні структурні формули компоновок

X_4	$ 1,1 - 2,1 \wedge 3,1 - 4,2 \wedge 5,3 - 6,1 $	$d_z e_y O$
X_5	$ 1,1 - 2,1 \wedge 3,2 - 4,4 \wedge 5,2 - 6,1 $	$d_z e_x O$
X_6	$ 1,1 - 2,1 \wedge 3,2 - 4,4 \wedge 5,1 - 6,1 $	$d_z e_x O$
X_7	$ 1,1 - 2,1 \wedge 3,2 - 4,4 \wedge 5,3 - 6,1 $	$d_z e_x O$
X_8	$ 1,1 - 2,4 \wedge 3,2 - 4,4 \wedge 5,1 - 6,1 $	$d_y e_x O$
X_9	$ 1,1 - 2,2 \wedge 3,2 - 4,4 \wedge 5,2 - 6,1 $	$d_y e_x O$
X_{10}	$ 1,1 - 2,2 \wedge 3,2 - 4,4 \wedge 5,3 - 6,1 $	$d_y e_x O$
X_{11}	$ 1,1 - 2,1 \wedge 3,2 - 4,2 \wedge 5,3 - 6,1 $	$d_y e_z O$
X_{12}	$ 1,1 - 2,3 \wedge 3,1 - 4,1 \wedge 5,1 - 6,1 $	$d_{z/y} e_z O$
X_{13}	$ 1,1 - 2,3 \wedge 3,1 - 4,2 \wedge 5,1 - 6,1 $	$d_{z/y} e_y O$
X_{14}	$ 1,1 - 2,3 \wedge 3,2 - 4,4 \wedge 5,2 - 6,1 $	$d_{z/y} e_x O$
X_{15}	$ 1,1 - 2,3 \wedge 3,2 - 4,4 \wedge 5,3 - 6,1 $	$d_{z/y} e_x O$
X_{16}	$ 1,1 - 2,2 \wedge 3,1 - 4,3 \wedge 5,1 - 6,1 $	$d_y e_{z/y} O$

Один із дієвих підходів для якісного оцінювання альтернативний на основі експертного аналізу — це метод встановлення пріоритетів, також відомий як метод "визначення лідера". Він використовується в процесі багатокритеріального аналізу для порівняння варіантів побудови технічних систем. Суть підходу відбувається у дійсності попарного зіставлення альтернативи, де для кожного пари варіантів встановлюється[43]:

- перший варіант є кращим за другий (позначається стрілкою «>» від кращого до гіршого);
- перший гірший за другий (позначається стрілкою «<» від гіршого до кращого);
- обидва варіанти еквівалентні (використовується знак дорівнює «=»).

На основі отриманих результатів здійснюється обробка даних за спеціальним алгоритмом. Для більш чіткого представлення задачі результати

такого умовного змагання між конфігураціями можна змодельовати у вигляді графічної структури (рисунок 3.1).

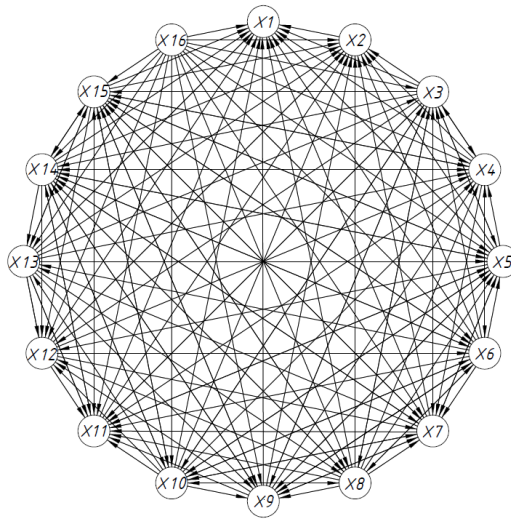


Рисунок 3.1 – Умовне зіставлення варіантів компоновки ОПП[43].

Кожна з n компоновок ($X_1, X_2, \dots, X_{16}$) представлена у вигляді вершини орієнтованого графа, який моделює результати умовного змагання між ними. У випадку, якщо варіант X_i переважає X_j , у графі присутня стрілка від X_i до X_j ; у разі поразки — стрілка спрямована навпаки, від X_j до X_i . Якщо ж результати виявилися рівнозначними, між відповідними вершинами існують двосторонні стрілки. Ілюстрація такого графового представлення наведена на рис. 3.1 [44].

На основі цієї графічної інформації будується відповідна матриця суміжності (рис. 3.2) і виконуються розрахунки.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 0 & 2 & 2 & 0 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 2 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 & 2 & 0 & 2 & 1 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 2 & 0 & 2 & 1 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 1 & 2 & 2 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 2 & 2 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 & 2 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 2 & 0 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 & 2 & 2 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

Рисунок 3.2 – Матриця суміжності переbrаних варіантів компоновок ОПП[43].

Таблиця 3.3 - Матриця суміжності варіантів

X_j	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	$P_n(1)$	$P_{відл_i}(1)$	$P_n(1)$	$P_{відл_i}(2)$	№ (по перспект.)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
X_1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.0039	1	0.00004	16
X_2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0.0017	5	0.002	15
X_3	2	2	1	1	1	0	1	1	1	1	2	2	0	2	2	0	19	0.0742	224	0.0067	7
X_4	2	2	1	1	0	1	2	0	0	0	2	0	0	1	1	0	13	0.0507	142	0.053	12
X_5	2	2	1	2	1	0	1	0	1	1	1	2	0	1	1	0	16	0.0625	192	0.063	10
X_6	2	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	0	2	1	1	0	21	0.082	294	0.09	2
X_7	2	2	1	0	1	0	1	0	1	1	2	0	2	1	1	0	15	0.0585	188	0.0622	11
X_8	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	2	0	1	1	0	22	0.086	291	0.089	3
X_9	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	2	0	1	1	0	17	0.0664	199	0.061	9
X_{10}	2	2	1	2	1	1	1	1	2	1	2	2	2	1	1	0	22	0.0886	283	0.087	4
X_{11}	2	2	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	8	0.031	67	0.0356	14
X_{12}	2	2	0	2	0	2	2	0	0	0	2	1	0	0	0	0	13	0.05	134	0.0442	13
X_{13}	2	2	2	2	2	0	0	2	2	0	2	2	1	0	1	0	20	0.08	261	0.0803	5
X_{14}	2	2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	0	18	0.07	243	0.079	6
X_{15}	2	2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	0	17	0.07	223	0.071	8
X_{16}	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	31	0.12	481	0.149	1

На рис. 3.3 наведено типові архітектури пристроїв з поворотно – обертальним принципом, що використовуються у зварювальних роботах або складальних лініях[16].

Перша схема (а) – демонструє ОПП з горизонтальною віссю повороту платформи та вертикальною віссю обертання. Ця конструкція є найпростішою реалізацією ОПП. Верхня платформа може обертатися навколо вертикальної осі, а також нахилитися вперед-назад навколо горизонтальної осі. Така схема дозволяє досягати двох ступенів свободи: обертання та нахил, що є достатнім для

позиціювання виробів циліндричної або прямокутної форми. Обмеженнями такої конструкції є відсутність вертикального переміщення, складність у фіксації важких компонентів без противаги та обмеження кута нахилу через механічну конструкцію шарніра. Цю схему можна побачити в простих позиціонерах зварювальників TIG/MIG (наприклад, лінійка ALM Positioners).

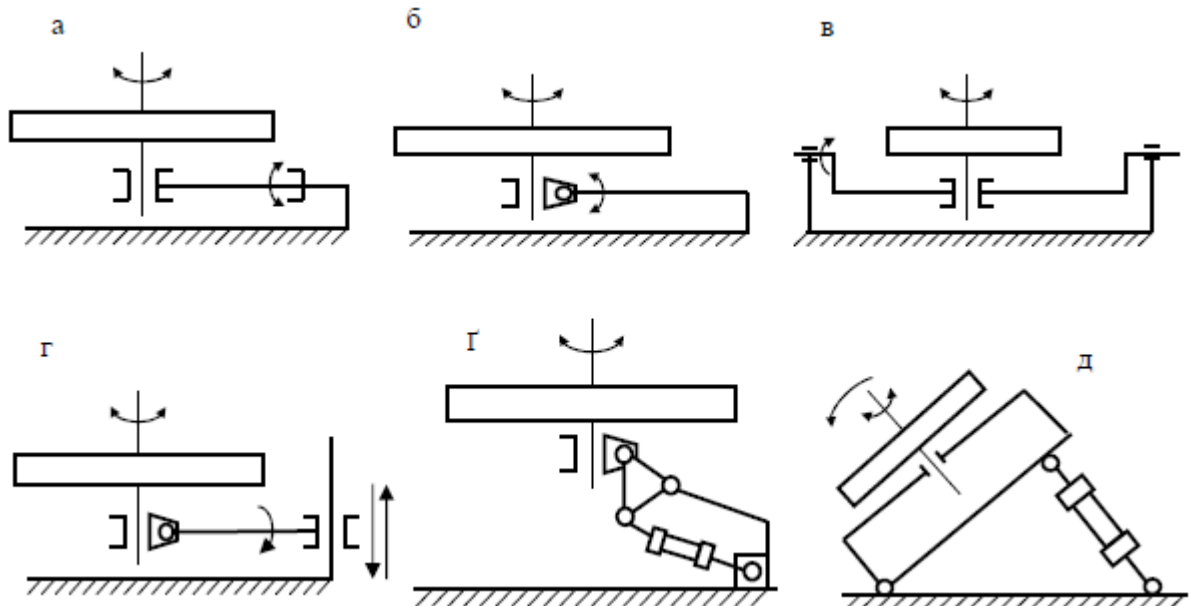


Рисунок 3.3 — Відомі структурні схеми ОПП[16]

Друга схема (б) – представляє з себе ОПП з осьовим обертанням та фіксованим нахилом через механізм типу черв'ячної передачі. Цей тип конструкції включає обертання навколо вертикальної осі та регульований нахил через кінематичний механізм, ймовірно, черв'ячну передачу або малу редукторну передачу. Завдяки механізму з високим передаточним числом можна точно налаштовувати кут нахилу та забезпечити надійне фіксування. Перевагами такої конструкції є висока точність позиціювання та блокування самогальмуванням передачі. Стосовно недоліків, то це складність обслуговування при роботі в запиленому середовищі та обмежена швидкість повороту. Схеми з черв'ячними передачами використовуються в маніпуляторах для плазмового різання, наприклад у системах компанії Koike Aronson [45].

Схема (в) – це ОПП із двома опорами, в яких закріплена обертальна вісь. Така конструкція є аналогом “консольного кріплення”, де деталь утримується з

двох боків, що зменшує згинальні навантаження. Вісь обертання розташована горизонтально, забезпечуючи поворот по осі “roll”. Переваги такого типу конструкції – це зменшення деформацій конструкції та придатність для важких деталей. У свою чергу недоліками залишаються вузька область нахилу і обмежена свобода переміщення. Такі системи активно використовуються в авіаційній галузі, зокрема в обслуговуванні літакових панелей – наприклад, Schuler positioning systems [46].

Розглядаючи наступну схему (г) – ОПП із лінійним переміщенням платформи, бачимо, що окрім повороту, дана конфігурація дозволяє піднімати або опускати платформу, що критично при обслуговуванні об'ємних виробів. Платформа змонтована на вертикальній колоні або направляючій із лінійним приводом (часто електромеханічним або гідравлічним). Така компоновка має гнучке регулювання по висоті, але складну конструкцію та потребує контролю стійкості при зміні центра мас. Робочі станції для зварювання бронекорпусів, наприклад Fronius Positioners, інтегрують такі підйомні механізми [47].

Схема типу (г) – це конструкція з паралелограмним важільним механізмом. Це складніша конструкція, що забезпечує фіксований кут нахилу при зміні положення платформи. Механізм схожий на ті, що застосовуються в підйомних платформах або маніпуляторах типу SCARA. Всі ланки з'єднані через шарніри, що забезпечує плавне керування положенням. Такі механізми характеризуються високою стійкістю конструкції та постійному положенні осі при зміні висоти. В цей же момент Вони мають високі вимоги до синхронізації приводів та збільшену масу. Цей тип механізму можна побачити в позиціонерах для роботизованих систем KUKA [48].

Схема (д) – механізм з нахилом платформи через зовнішній циліндричний привід. Цей тип передбачає розміщення платформи на основі з двома гідроциліндрами, які керують нахилом і підйомом. Такий підхід часто використовується в важких промислових умовах, де потрібно гнучке позиціонування. Ці механізми характеризуються високою вантажопідйомністю але в цей же час потребують гідросистеми, що веде до ускладнення конструкції,

ускладнень у ремонті та експлуатації. Системи автоматизованого зварювання великих резервуарів компанії Weldlogic Inc. використовують подібну концепцію[49].

В табл. 3.4, наведена коротка характеристика пристроїв, що побудовані по структурним схемам наведених на рис. 3.3.

Таблиця 3.4 – Передаточні відношення коробки швидкостей залежно від положення двосторонніх муфт.

<i>Схема.</i>	<i>Тип конструктивної схеми</i>	<i>Кількість осей обертання</i>	<i>Можливий тип приводу</i>	<i>Механічна особливість</i>	<i>Потенційна сфера застосування</i>
а	Поворотна платформа	2	Електромеханічний або ручний	Вертикальна вісь обертання	Зварювання по окружності, позиціонування деталей
б	З ексцентричним приводом	2	Електромеханічний або гідравлічний	Поворот через ексцентриковий механізм	Промислове зварювання середньої складності
в	Механізм симетричного розміщення	2	Електромеханічний	Балансування щодо осі, симетрична вісь обертання	Автоматизоване зварювання, роботи високої точності
г	Карусель із комбінованим нахилом	2	Електромеханічний або гідравлічний	Обертання + нахил платформи	Складні лінії з регульованим положенням
г	Підйомно-поворотний механізм	2	Гідравлічний або електромеханічний	Платформа з шарнірним підйомом	Зварювання великих виробів на кутових площинах
д	Важільно-секторний механізм	2	Гідравлічний	Обертання з важільною підтримкою під нахилом	Тяжке машинобудування, великогабаритні конструкції

Проаналізувавши структурні схеми та коротку характеристику пристроїв побудованих по них, ми можемо зіставити нашу морфологічну таблицю з цими практичними прикладами, та визначити найкращу архітектуру для умов заданого середовища.

3.4. Висновки

У ході виконання дослідницького розділу магістерської дисертації було здійснено поетапне формування, систематизацію та порівняльний аналіз конструктивних варіантів обертально-поворотного пристрою (ОПП), що

базується на модульному принципі. Застосування методу морфологічного аналізу дозволило сформулювати системне уявлення про всі можливі конфігурації структурних компонентів пристрою, а також надало інструментарій для вибору оптимального зразка відповідно до заданих функціональних, ергономічних та технологічних критеріїв.

У результаті комбінування морфологічних ознак і наступного формалізованого порівняння, з урахуванням багатокритеріального аналізу, найбільш раціональною виявилась компоновка №16, умовно позначена в схемі як «р». Даний варіант отримав найвищий інтегральний бал під час обчислення нормованої ітераційної сили другого порядку, що свідчить про його перевагу перед іншими конфігураціями за сукупністю техніко-функціональних показників.

Компоновка №16 поєднує в собі низку структурно-конструктивних рішень, які дозволяють ефективно реалізувати повний діапазон рухів, необхідний для багатоплощинного позиціонування об'єкта. Її архітектура базується на класичному модулі обертового блоку (БО), встановленому на важільно-поворотному механізмі з нахилом блоку (БП) відносно осі Y та поворотом платформи по комбінованій осі Z/Y. Подібна компоновка надає системі три ключові переваги:

1. Максимальна гнучкість та маневреність. Тобто обертання деталі навколо декількох осей забезпечує свободу її орієнтації в просторі без необхідності переміщення базової основи. Це дозволяє проводити маніпуляції з д закріпленою деталлю в важкодоступних зонах або на складних просторових поверхнях.
2. Балансування мас та стійкість. Компоновка передбачає геометрично вивірене розташування осей обертання та нахилу, що мінімізує навантаження на приводи та запобігає виникненню паразитних моментів. Розташування блоків забезпечує симетричне навантаження на несучі вузли, покращуючи динамічні характеристики пристрою.

3. Модульність та ремонтпридатність. Застосування перехідного адаптера (П) у конфігурації 16 дозволяє швидко демонтувати або замінювати функціональні вузли без розбирання всього пристрою. Це особливо важливо для умов експлуатації в середовищах з високою частотою зміни задач або в обмеженому просторі.

Порівнюючи обрану конфігурацію з типовими схемами, представленими на рисунку 3.3 (а–д), можна зробити висновок, що компоновка №16 поєднує в собі елементи паралелограмного механізму (Г) і карусельного блоку з вертикальним підйомом (Г), що є унікальним рішенням серед усіх раніше реалізованих структур. Такий підхід забезпечує високу структурну адаптивність, дозволяє використовувати змінні приводи (гідравлічні, електромеханічні) залежно від умов, і створює умови для інтеграції пристрою в автоматизовані або роботизовані виробничі лінії.

Іншою ключовою перевагою компоновки №16 є її відповідність принципам модульного проектування, що були сформульовані на основі патентно-інформаційного дослідження в попередньому розділі. Конструкція дозволяє варіювати тип приводу, систему фіксації, а також спосіб керування (механічний, ручний, автоматизований) без зміни базової архітектури пристрою. Така властивість є особливо важливою в умовах переходу до гнучкого виробництва, де потрібна швидка адаптація до зміни типу деталей.

Додатково, з позиції техніко-економічної доцільності, конфігурація №16 забезпечує компроміс між складністю реалізації, вартістю виробництва та функціональною ефективністю. Розміщення основних компонентів у компактному просторі дозволяє оптимізувати робочу зону без втрати ступенів свободи. Можливість реалізації виробничого процесу без необхідності ручного втручання, за рахунок точної автоматизації осей, знижує ризик помилок оператора і скорочує виробничий цикл.

З точки зору інженерної логіки, компоновка №16 – це результат синтезу кількох ключових вимог:

- ергономіки (простота доступу до зони зварювання);

- кінематики (необхідна кількість ступенів свободи);
- механіки (розподіл навантажень, стабільність);
- електромеханіки (можливість інтеграції ЧПК);
- обслуговування (легкість заміни модулів і доступ до вузлів).

Таким чином, конфігурація №16 не лише є переможцем в контексті морфологічної оптимізації, але й виступає еталонною архітектурною формою, що демонструє потенціал майбутніх універсальних ОПП, орієнтованих на адаптивне виробництво. У процесі проектування така компоновка відкриває перспективи подальшої оптимізації в частині вагових характеристик, енергозбереження, інтелектуалізації керування та підвищення точності.

Завдяки застосуванню методології системно-морфологічного аналізу, підтриманої кількісним методом попарних порівнянь, було реалізовано багаторівневий інженерний відбір, який забезпечив не інтуїтивний, а математично і логічно обґрунтований вибір. Це є свідченням зрілості методології й підтвердженням її ефективності для складних задач на стику конструкції, автоматизації та кіберфізичних систем.

На завершення, важливо відзначити, що обрана компоновка може стати фундаментом для подальшого етапу – розробки детальної конструкторської документації, розрахунку навантажень, вибору матеріалів, моделювання кінематики та розробки системи керування. Компоновка №16 є не лише раціональним вибором у поточному проєкті, а й прототипом майбутніх адаптивних, модульних, функціонально досконалих обертально-поворотних пристроїв нового покоління.

4. КОНСТРУКТОРСЬКИЙ

4.1. Синтезовані компоновки ОПП з використанням модульного принципу.

У цьому підрозділі розглядаються синтезовані компоновки ОПП, які розроблені на основі принципів модульності та системного підходу до структурування функціональних вузлів.

Початковою точкою у проектуванні стала побудова морфологічної таблиці, яка включала ключові елементи конструкції ОПП: обертальний блок (БО), поворотний блок (БП), перехідний модуль (П) та базову опору (О). Кожен з цих блоків було представлено кількома альтернативами, що відрізняються за геометрією, функціональністю, типом приводу, типом з'єднання та кількістю ступенів свободи[50]. Завдяки комбінації цих параметрів було сформовано низку концептуальних конфігурацій, кожна з яких забезпечує відмінний рівень адаптивності до різних виробничих сценаріїв.

Розроблені компоновки базуються на архітектурі, яка передбачає незалежність кожного функціонального модуля, але при цьому забезпечує їхню взаємну узгодженість завдяки уніфікованим інтерфейсам[51]. Це дозволяє не лише замінювати окремі блоки без повного демонтажу системи, але й варіювати конструкцію залежно від технологічних умов, наприклад, змінювати тип приводу з електромеханічного на гідравлічний, змінювати тип адаптера або обирати інший механізм фіксації об'єкта.

У процесі структурного синтезу було сформовано шістнадцять базових компоновок, що охоплюють найтипівіші варіанти конструктивних рішень для ОПП. Компоновки відрізняються за кількістю ступенів свободи, орієнтацією обертання, типами приводів та механізмів трансмісії. Наприклад, деякі конфігурації передбачають послідовне з'єднання двох блоків обертання — навколо вертикальної та горизонтальної осей, що дозволяє досягти просторового маневрування, необхідного для багатокоординатного зварювання. Інші компоновки базуються на єдиному обертовому модулі з можливістю заміни об'єкта без зміни його положення в просторі.

Особливу увагу при синтезі компоновок було приділено забезпеченню жорсткості конструкції, рівномірному розподілу навантажень та центрів мас. Так, обертальний блок у більшості конфігурацій розташовується нижче осі нахилу, що зменшує момент інерції та дозволяє використовувати приводи з меншою потужністю. У багатьох компоновках реалізовано систему противаг або балансування, що дозволяє зберігати стійкість навіть при роботі з деталями великої маси.

Усі варіанти, отримані в результаті морфологічного синтезу, було оцінено за низкою критеріїв, таких як компактність, простота складання, гнучкість модернізації, вартість виготовлення, точність позиціонування, можливість автоматизованого керування, а також ергономіка доступу до робочої зони. Задля об'єктивного порівняння було застосовано метод попарних порівнянь, який дозволив розрахувати інтегральну значущість кожної компоновки. Найвищі оцінки отримала компоновка №16, яка є оптимальним рішенням за більшістю техніко-експлуатаційних показників.

Компоновка №16 (рис. 4.1) реалізує концепцію обертально-поворотного механізму на основі симетричного обертального блоку з нахилом по осі Y, встановленого на підвісній платформі, яка інтегрована з поворотним адаптером.

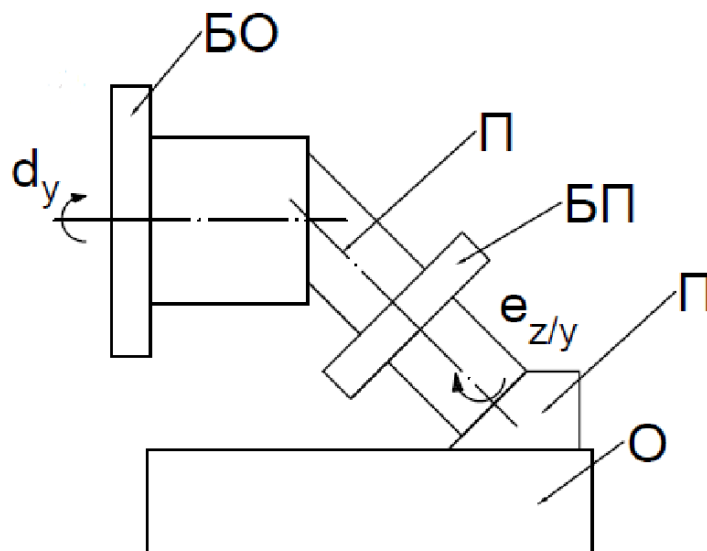


Рисунок 4.1.- Синтезована компоновка ОПП №16

Це рішення дозволяє реалізувати безперервний поворот деталі на 360° з можливістю її одночасного нахилу в межах $\pm 90^\circ$. Завдяки цьому забезпечується

повноцінне орієнтування деталі у просторі без необхідності зміни її положення на робочому столі. Додатковим плюсом компоновки є можливість модульної заміни приводу — у базовій конфігурації передбачається використання електромеханічного серводвигуна з редуктором, однак конструкція також допускає інтеграцію гідроприводу або пневматичного виконавчого механізму.

Конструктивна реалізація кожної компоновки передбачає використання стандартних елементів з каталогів ISO/IEC, що дозволяє значно знизити витрати на виготовлення та скоротити терміни розробки[52]. Усі вузли мають стандартні посадкові місця, приєднувальні отвори та інтерфейсні фланці, що дозволяє легко масштабувати конструкцію або інтегрувати її до складу більш складних мехатронних систем.

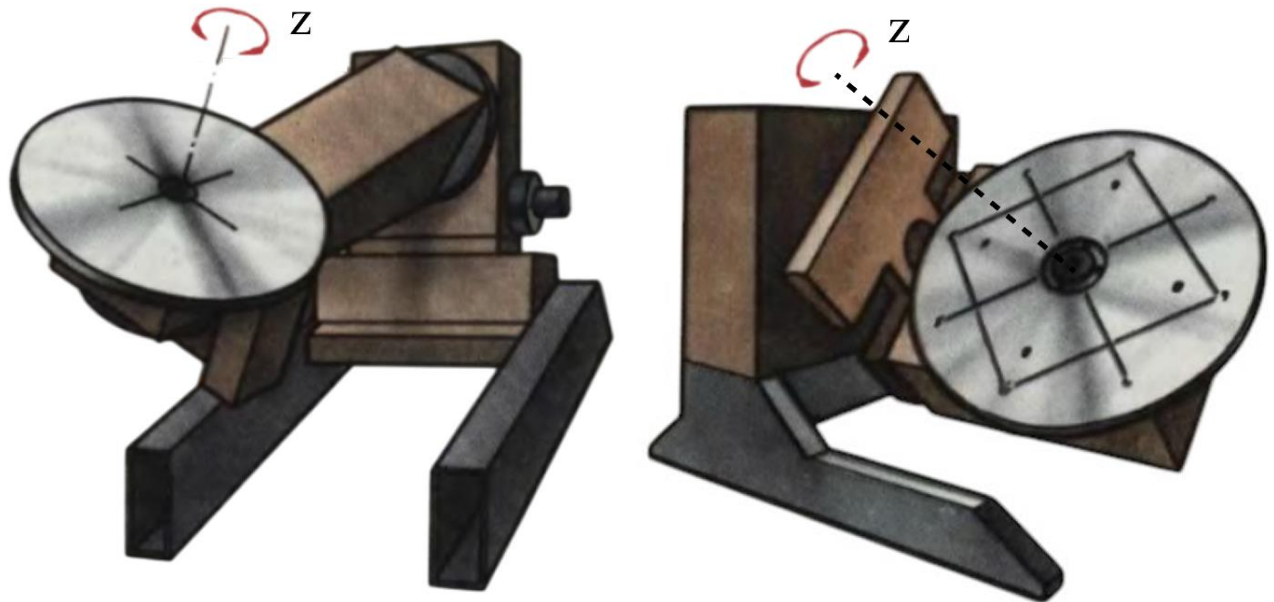
Синтезовані компоновки можна також класифікувати за рівнем складності реалізації, що дозволить сформувати матрицю вибору для підприємств із різними технічними можливостями. Зокрема, прості компоновки (№1–4) рекомендовані для ручних і напіваавтоматичних робочих місць, середні (№5–10) — для інтеграції у серійне зварювання, а складні (№11–16) — для використання в автоматизованих лініях, де потрібне інтелектуальне керування рухом об'єкта[50].

Таким чином, синтезовані компоновки ОПП, побудовані на модульному принципі, демонструють високий потенціал для практичного застосування у виробничих середовищах із підвищеними вимогами до гнучкості, точності та адаптивності. Модульний підхід дозволив не лише скоротити витрати на проектування, а й сформувати гнучку платформу для подальшого розвитку обертально-поворотних систем нового покоління.

4.2. Варіант конструктивного виконання і принципу роботи блоку обертального ОПП модульного принципу

Обертально – поворотний пристрій (ОПП), а саме його конструкція, яка була вибрана після морфологічного аналізу та побудована за модульним принципом, складається з ряду взаємозалежних технічних вузлів. Центральним елементом конструкції цього пристрою буде обертальний модуль, який

забезпечує обертання закріпленої деталі навколо вертикальної осі (вісь Z блоку обертального) (рис.4.1) [53]



*Рисунок 4.1.- Приклад обертальних модулів з осями обертання заготовки
(зображена вісь Z)*

Основними вузлами пристрою є: силовий привід, редуктор, обертальна платформа, система підшипників, фіксуючий механізм, корпусна основа, а також допоміжні компоненти – енкодери, контролери та адаптери [54].

Силовий привід виконується зазвичай у вигляді електродвигуна змінного струму. Рух від приводу передається через редуктор, який являється черв'ячним чи планетарним, що зменшує швидкість і збільшує момент обертання [55,56]. Обертальний момент через вал передається на поворотну платформу, до якої кріпиться заготовка чи спеціалізований адаптер.

Також варто зазначити, що у якості приводів обертання використовують не лише електродвигуни, тобто електричні приводи, але й інші типи приводів, варіанти таких приводів ООП можна побачити у табл.4.1.

Таблиця 4.1 – Приклади використовуваних приводів в обертальних приводах ОПП

Тип приводу	Характеристика	Приклад
Електричний	Найбільш поширений, дозволяє точне керування, використовує ПІД - регулятори	
Пневматичний	Простий у реалізації, підходить для малих навантажень[57,58]	
Гідравлічний	Використовується для потужних і важких конструкцій[59,60]	
Гібридний	Використовується для потужних та важких конструкцій[61]	

У структурі обертально – поворотних пристроїв основним та ключовим елементом, який визначає функціональність та технічні характеристики системи обертання виступає привід. Від того, який тип приводу був вибраний залежить динаміка обертання, навантажувальні характеристики, точність позиціонування, реакція пристрою на сигнали керування, ергономічність та енергоефективність. Основними типами приводів, які застосовуються у таких пристроях являються електромеханічні, гідравлічні, пневматичні та комбіновані.

Електромеханічний привід найбільш поширений у промислових ОПП. Основою цього приводу є електродвигун, в більшості своїй асинхронний чи серводвигун. Двигун з'єднується через редуктор з вихідним валом обертання.

Рух від двигуна передається через систему передач (зубчасту, планетарну, черв'ячну), залежно від вимог до навантаження та точності позиціонування.

Перевагою електромеханічного приводу є точне керування кутом повороту за допомогою зворотнього зв'язку від енкодерів, а також можливість реалізації програмних траєкторій обертання. До прикладу, у високоточний поворотних столах, для обробки складних поверхонь, використовуються серводвигуни з роздільною здатністю до $0,001^\circ$.

Типовим прикладом електромеханічного ОПП є поворотні столи з ЧПУ, де використовується цифрове керування та сервовузли для досягнення високої точності, як наприклад продукція компанії Kitagawa чи Tsudakoma.

Гідравлічні ж приводи застосовуються в тих випадках, коли потрібна велика сила обертання або ж коли обладнання працює в складних умовах, зокрема у важкому машинобудуванні чи суднобудуванні. Основу гідроприводу становить гідромотор, який приводить в дію потоки рідини під тиском, що подається через гідравлічну систему (насос, розподільник тощо)

Гідравлічна енергія перетворюється в механічну обертальну енергію через торцеву або осьову гідравлічну машину. Керування обертанням здійснюється за допомогою дросельного або об'ємного регулювання. Поворотний стіл, що використовує гідропривід дозволяє створювати обертальний момент в десятки й сотні $\text{Н}\cdot\text{м}$.

Системи з гідравлічними приводами демонструють високу надійність, але все таки мають деякі обмеження щодо точності позиціонування, оскільки їм властива певна «м'якість» руху через стисливість рідини.

Пневматичні приводи працюють за аналогічним принципом до гідравлічних, однак як робоче середовище вони використовують стиснене повітря. Вони призначені для швидкого обертання з обмеженою силою та здебільшого застосовуються у випадках, коли критично важливі компактність, легкість та швидкодія.

Обертання забезпечується пневмо-мотором, який через механічну передачу обертає робочий орган. Завдяки невисокій вартості та простоті

обслуговування пневмоприводи мають переваги у низько-навантажених системах.

Точність у таких системах досягається за допомогою кінцевих датчиків положення або обмежувачів ходу. Проте вони мають обмеження по навантаженню й стабільності крутного моменту, що знижує їх ефективність у складних механічних системах .

Комбіновані приводи поєднують переваги різних типів енергоносіїв. Найпоширенішим є комбінація електро-механічного та гідравлічного приводів. Тобто електродвигун керує гідравлічним насосом, який приводить в дію гідромотор обертання. Такий підхід дозволяє точно регулювати параметри потоку рідини, забезпечуючи плавність і контроль обертання.

Також застосовується електро-пневматичне поєднання, де електроніка контролює клапани та регулятори подачі повітря, дозволяючи автоматизувати процес управління. Такі приводи особливо актуальні в інтелектуальних виробничих системах, де потрібна адаптивність до змін технологічного середовища .

Керування обертанням здійснюється через ПЛК або ЧПК. Сигнал від контролера активує обертання платформи на заданий кут або забезпечує безперервне обертання з певною швидкістю. Привідна система оснащується енкодером для забезпечення зворотного зв'язку щодо поточного положення платформи.

Обертальна платформа виконує функцію основи для фіксації об'єкта. Вона має шліцьову або перфоровану поверхню для адаптивного кріплення. Платформа розміщується на підшипниковій системі, що забезпечує її обертання з мінімальним тертям. Для важких конструкцій використовуються роликові або конічні підшипники, що здатні витримувати як радіальні, так і осьові навантаження [62].

Фіксує механізм є критично важливим у конструкції пристрою, оскільки від нього залежить безпека оператора і точність обробки. Він може мати форму

пневматичного або гідравлічного затискача, ручного патрона або самоцентрувального механізму.

Для забезпечення точного позиціонування та утримання найкраще використовувати одну з наступних систем фіксації:

- Фрикційна система. У ній застосовується гальмівна муфта, яка утримує платформу за рахунок сили тертя.
- Штифтова система, яка використовує механічні стопори, які входять у відповідні отвори конусу.
- Електромагнітна фіксація, що активується або деактивується залежно від наявності електроживлення.

Фіксація активується автоматично, після досягнення потрібного положення платформи, що дозволяє надійно утримувати деталь під час технологічної операції, таких, як зварювання, свердління, вимірювання. [63].

Корпусна основа у свою чергу виконує функцію несучої рами, на яку монтуються усі модулі. Вона виготовляється з литої сталі або чавуну і має високу жорсткість та надійність до вібрацій. Вона має канали для прокладання кабелів, систем охолодження або подачі пневматичних і гідравлічних ліній.

Допоміжні системи включають у себе енкодери, які забезпечують точне зчитування положення платформи, та контролери, що відповідають за координацію усіх приводів та сенсорів. Вони дозволяють реалізувати складні алгоритми синхронізації і автоматичного керування процесами. [64].

У модульному виконанні ОПП кожен із зазначених елементів може бути замінений або оновлений окремо. Що забезпечує високу адаптивність конструкцій до змін у виробничому середовищі. Наприклад, для роботи з важкими заготовками можна швидко замінити обертальну платформу на посилену, або ж інтегрувати новий тип енкодера, не змінюючи основну архітектуру пристрою [65].

Таким чином, принцип роботи обертально – поворотного пристрою полягає у скоординованому переміщенні платформи за допомогою обертального приводу з можливістю її точної фіксації, керування кутом повороту, забезпечення

жорсткості кріплення об'єкта та зворотнього зв'язку через сенсорні модулі. Це дає змогу ефективно використовувати ОПП у задачах точного зварювання, обробки, монтажу, інспекції чи складання.

4.3. Система програмного керування ОПП

У сучасних умовах автоматизованого машинобудування ефективність функціонування обертально-поворотних пристроїв (ОПП), зокрема побудованих за модульним принципом, безпосередньо залежить від рівня організації їх системи керування. Саме вона забезпечує координовану роботу виконавчих механізмів, обробку сигналів з датчиків, інтерфейс із користувачем, а також інтеграцію у ширше цифрове виробниче середовище, включаючи зв'язок із зварювальними роботами в умовах розумної фабрики (Smart Factory) [66].

Архітектура системи керування побудована за модульно-ієрархічною структурою, що дозволяє досягти масштабованості, гнучкості та високої відмово-стійкості. Основні компоненти включають:

1. Виконавчі модулі – це безпосередні фізичні механізми, які здійснюють обертання та поворот платформи. Залежно від типу конструкції, застосовуються:
 - електромеханічні серводвигуни з енкодерами для точного керування положенням;
 - гідравлічні циліндри з пропорційним керуванням (у важких промислових умовах);
 - пневматичні приводи для швидкого позиціонування при малих навантаженнях;
 - комбіновані системи, які поєднують в собі електропривід з пневматичним фіксатором [67].
2. Локальні модулі керування (LCU – Local Control Units) – це мікроконтролерні пристрої (наприклад, на базі STM32 або Siemens LOGO), які керують конкретним вузлом ОПП. LCU отримують команди

від центрального контролера, реалізують локальні ПІД-регулятори (PID – Proportional-Integral-Derivative), забезпечують безперервне опитування сенсорів і виконують обробку зворотного зв'язку [68].

3. Центральний керуючий модуль (CCU – Central Control Unit) – головний інтелектуальний блок системи. Виконується у вигляді програмованого логічного контролера (PLC – Programmable Logic Controller) або промислового комп'ютера (IPC – Industrial PC), що координує дії усіх підсистем, керує траєкторіями, фіксує помилки, реалізує логіку автоматичних сценаріїв [69].
4. Сенсорні модулі включають:
 - інкрементні та абсолютні енкодери – вимірювання кутового положення;
 - індуктивні/оптичні кінцеві вимикачі – контроль граничних положень;
 - IMU (Inertial Measurement Unit) – інерційні датчики нахилу, прискорення та кутової швидкості;
 - тензодатчики – вимірювання зусиль стискання/розтягнення;
 - датчики струму, температури та вібрацій – моніторинг стану приводів [70].
5. HMI (Human-Machine Interface) – сенсорний інтерфейс оператора, який забезпечує введення параметрів, запуск сценаріїв, перегляд стану пристрою, діагностику і логування [71].
6. Комунікаційні модулі – реалізовані на базі EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology) або PROFINET (Process Field Net) для високошвидкісного зв'язку між модулями. Для вищого рівня взаємодії (наприклад, із SCADA чи MES-системами) використовується OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) [72].

Алгоритм роботи ОПП у контурі управління складається з наступних етапів:

1. Оператор через HMI задає параметри руху – кути обертання, швидкість, тип сценарію (ручний, автоматичний).

2. Центральний модуль (CCU) обробляє дані, формує профіль руху з урахуванням динаміки системи (плавний старт/стоп, обмеження моменту) і надсилає команди до відповідних LCU.
3. LCU запускають виконавчі механізми – приводи отримують сигнали з контролера, реалізують рух, при цьому енкодери фіксують позицію і передають її назад у CCU.
4. У разі відхилення, CCU формує сигнал корекції та уточнює параметри руху.
5. Система зберігає логи усіх дій у SCADA-сервері для подальшого аналізу [73].

Таким чином реалізується замкнена петля керування (Closed-Loop Control), що дозволяє забезпечити точність позиціонування до $\pm 0,01^\circ$ [74].

Ключовим елементом взаємодії між людиною й ОПП є людино-машинний інтерфейс (HMI). У сучасному реалізаційному варіанті це або промислова сенсорна панель, або планшетна панель з програмним забезпеченням SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Через HMI користувач може:

- Вибирати та запускати робочі сценарії (наприклад, сценарій зварювання із п'яти точок із поворотом);
- Задавати параметри обертання: кут, вісь, швидкість, прискорення;
- Перемикати між режимами — ручний (джойстиковий контроль) та автоматичний;
- Отримувати інформацію про стан приводів, датчиків, температури та моменту навантаження;
- Проводити діагностику та обслуговування: запускати тестування, переглядати логи, зберігати параметри у внутрішню пам'ять чи на зовнішній сервер [75].

Для підвищення надійності роботи операторська панель забезпечується системою авторизації (логін/пароль), а всі дії реєструються у журналі подій. Це дозволяє відслідковувати послідовність налаштувань та уникати людських помилок.

Реакція системи на операторські команди відбувається в реальному часі. Після введення параметрів CCU (центральний контролер) виконує:

- Перевірку меж допустимих значень;
- Створення профілю переміщення (траєкторія S-крової);
- Надсилання параметрів у LCU (локальні модулі);
- Запуск виконавчих приводів із урахуванням обмежень прискорення та навантаження.

Завдяки замкненому контуру управління, що включає високоточні енкодери, відхилення від цільового положення не перевищують $0,01^\circ$ навіть при значному навантаженні. При досягненні положення, система автоматично блокує обертання гальмівним пристроєм (механічно або за допомогою утримуючого моменту серводвигуна) [76].

У разі виникнення аварійної ситуації (вихід температури за межі, зникнення сигналу з датчика, перевантаження), система переходить у безпечний режим — зупиняється рух, надсилається звуковий і світловий сигнал, на НМІ з'являється повідомлення з кодом помилки.

В умовах Smart Factory обертально-поворотний пристрій не функціонує ізольовано, а є повноправною частиною інтегрованої виробничої системи, яка керується через цифрові сервіси MES (Manufacturing Execution System), ERP (Enterprise Resource Planning) та SCADA.

Для досягнення цієї інтеграції ОПП оснащується:

- OPC UA-сервером для обміну структурованими даними між обладнанням;
- MQTT-протоколом (Message Queuing Telemetry Transport) для публікації та підписки на події;
- Промисловими шлюзами (Industrial Gateway), які забезпечують об'єднання протоколів (EtherCAT $\rightleftharpoons$ OPC UA) [77].

Сценарій інтеграції з роботизованою зварювальною системою:

1. MES-сервер формує завдання на зварювання.
2. Зварювальний робот (наприклад, KUKA або FANUC) отримує координати зварювальних точок.

3. Перед кожною зварювальною точкою робот надсилає сигнал у CCU ОПП: «Задати позицію X° , Y° ».
4. ОПП виконує поворот/нахил і надсилає підтвердження «Позиція досягнута».
5. Робот виконує зварювання і переходить до наступної точки.
6. Вся взаємодія відображається в SCADA у вигляді тривимірної візуалізації з історією подій [78].

Ключові переваги інтеграції:

- Точність і повторюваність: ОПП синхронізується з роботом до мілісекунд, що дозволяє уникати похибок;
- Адаптивність: зміна типу деталі не вимагає переналаштування всього виробничого циклу — достатньо змінити файл налаштувань;
- Взаємодія у реальному часі: використання OPC UA і MQTT дозволяє передавати не лише координати, але й статусні сигнали, повідомлення, діагностичні дані;
- Віддалений доступ: технолог може зі смартфона або ПК перевірити стан пристрою, запустити тест, змінити сценарій [79].

Система програмного керування обертально-поворотним пристроєм (ОПП), створеним на основі модульного принципу, є високотехнологічною, масштабованою та здатною до повної інтеграції у цифрову виробничу екосистему. Її архітектура, що базується на ієрархічному підході із використанням локальних модулів керування (LCU), центрального контролера (CCU), сенсорного забезпечення, комунікаційних протоколів (EtherCAT, OPC UA), а також інтерфейсу оператора (HMI), дозволяє ефективно управляти усіма ступенями свободи пристрою та адаптувати його до різноманітних виробничих завдань.

Реалізація замкненого контуру управління з використанням енкодерів, ІМУ, тензодатчиків та інших сенсорів забезпечує точне і стабільне позиціонування платформи у просторі з похибкою менше $0,01^\circ$, що відповідає сучасним вимогам високоточної зварювальної та обробної техніки. Надійність

системи посилюється завдяки наявності аварійних сценаріїв, самодіагностики та журналювання подій.

Особливе значення має модульність системи як апаратної, так і програмної частини: це дозволяє оперативно змінювати або модернізувати окремі вузли (приводи, сенсори, контролери), не впливаючи на загальну архітектуру пристрою. Такий підхід сприяє зниженню витрат на розробку та обслуговування, підвищенню гнучкості виробництва та масштабованості технологій.

Умови інтеграції ОПП у середовище Smart Factory реалізовані шляхом застосування відкритих промислових протоколів (OPC UA, MQTT), що забезпечують взаємодію з іншими компонентами виробничої системи — зокрема, зварювальними роботами, MES-системами, SCADA-панелями та ERP-модулями. Це створює умови для побудови дійсно адаптивного, динамічного виробництва із повною цифровою трансформацією.

На основі описаної системи програмного керування ОПП може ефективно функціонувати в умовах серійного, гнучкого або індивідуалізованого виробництва. Така система цілком відповідає вимогам інженерії майбутнього, і може бути з успіхом застосована в контексті роботизованих зварювальних клітин, інтелектуальних маніпуляційних платформ, а також у більш складних мехатронних системах. Вона є синтезом сучасних досягнень в області мехатроніки, автоматизації, робототехніки та промислових інформаційних технологій.

5. ДИНАМІКА ОБЕРТАЛЬНО – ПОВРОТНИХ ПРИСТРОЇВ

5.1. Основні положення динаміки

У галузі прикладної механіки, яка є базовою науковою платформою для проектування та розрахунку всіх технічних систем, динаміка посідає особливе місце як дисципліна, що визначає закономірності руху тіл під дією сил і моментів. Це наука про взаємозв'язок між зусиллями і рухом, яка дозволяє інженеру не лише описувати кінематичну поведінку системи, а й прогнозувати її реакцію на різноманітні силові впливи в реальних умовах експлуатації. Класичне формулювання динаміки спирається на праці Ньютона, Лагранжа, Ейлера та інших видатних вчених[80], які заклали фундаментальні принципи опису рухів матеріальних об'єктів. У своєму найширшому визначенні динаміка є розділом механіки, що вивчає закони і рівняння руху тіл під впливом зовнішніх та внутрішніх сил, а також вплив цих сил на зміну механічного стану тіл у часі.

З погляду класичної механіки, динамічний стан будь-якої матеріальної системи описується положенням її масових точок, швидкостями та прискореннями цих точок, а також зусиллями і моментами, що діють на них. Основоположним є другий закон Ньютона, який визначає залежність між сумарною діючою силою і прискоренням маси об'єкта. Цей закон математично виражається як:

$$F = m \cdot a, \quad (5.1)$$

де F — це рівнодійна всіх прикладених до тіла сил;

m — маса тіла;

a — прискорення.

У випадку обертального руху аналогічне співвідношення подається як:

$$M = J \cdot \alpha, \quad (5.2)$$

де M — момент сили;

J — момент інерції об'єкта відносно осі обертання;

α — кутове прискорення.

Ці залежності є базовими в інженерних розрахунках і використовуються, як основа для побудови математичних моделей реальних механізмів.

Призначення динаміки в інженерній практиці полягає в тому, щоб дати проектувантові можливість правильно оцінити і розрахувати навантаження, що виникають у механізмах під час їх функціонування, враховуючи реальні масо-інерційні характеристики, сили опору, тертя, гальмування, нерівномірність руху, імпульсні та циклічні навантаження. Це дозволяє не лише оптимізувати конструкцію під умови експлуатації, а й запобігти передчасному зносу, руйнуванню, аваріям, а також забезпечити енергетичну ефективність і стабільність роботи системи. У контексті обертально-поворотних пристроїв, які поєднують обертальні й нахильні рухи для позиціонування виробів у просторі, динаміка стає ключовим інструментом для визначення крутних моментів, навантажень на приводи і опори, вимог до гальмівних систем та енергетичних характеристик усього комплексу.

Одним з основних положень динаміки є врахування моментів інерції, які описують опір об'єкта до зміни свого обертального стану. Для суцільного циліндричного тіла момент інерції обчислюється за формулою:

$$J = (1/2) \cdot m \cdot r^2, \quad (5.3)$$

де m — маса тіла,

r — його радіус.

Це значення дозволяє інженеру визначити, який саме обертальний момент буде необхідний для прискорення або гальмування об'єкта з певною масою і геометрією. Прикладом є обертання платформи з деталлю на зварювальному позиціонері, де маса виробу і радіус платформи визначають необхідні зусилля на приводі.

Кінетична енергія обертального руху визначається як:

$$T = (1/2) \cdot J \cdot \omega^2, \quad (5.4)$$

де ω — кутова швидкість;

J — момент інерції.

Це дозволяє оцінити енергетичні втрати, розрахувати потужність приводів і визначити режими роботи пристрою з точки зору економії енергії. Важливим є також розрахунок потенціальної енергії, особливо для систем з нахилом, коли зміна висоти центра мас призводить до додаткових навантажень.

Закон збереження механічної енергії описується співвідношенням:

$$T + V = \text{const}, \quad (5.5)$$

де T — кінетична енергія системи;

V — потенціальна енергія системи.

Для складних багатоланкових механізмів, таких як обертально-поворотні пристрої, що мають декілька ступенів свободи, застосовується метод Лагранжа другого роду. Цей метод базується на енергетичних підходах і дозволяє формувати рівняння руху через узагальнені координати.

Загальний вигляд рівняння Лагранжа має форму:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial q'} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q \quad (5.6)$$

де L — функція Лагранжа, що визначається як різниця між кінетичною і потенціальною енергією системи;

q — узагальнені координати;

q' — їх похідні (швидкості);

Q — узагальнені сили системи.

Застосування цього підходу дозволяє аналізувати динаміку систем з довільною конфігурацією рухів і взаємодіючих мас.

У практичній діяльності динаміка застосовується для вирішення широкого спектра інженерних завдань. В автомобілебудуванні вона використовується для розрахунку навантажень на підвіску, гальмівні системи та трансмісію з урахуванням динаміки руху автомобіля[81]. В авіаційній промисловості вона дозволяє аналізувати поведінку турбін і лопатей двигунів при змінних навантаженнях, що є критичним для забезпечення безпеки польотів[82]. У робототехніці динаміка використовується для розрахунку зусиль і моментів, які виникають у маніпуляторах під час перенесення вантажів або виконання

технологічних операцій[83]. У промислових зварювальних системах динаміка є незамінною для правильного вибору приводів і гальмівних систем з урахуванням масо-інерційних характеристик виробів та конструкції самого позиціонера. Наприклад, при зварюванні довгомірних конструкцій важливо забезпечити синхронізацію обертання та нахилу з урахуванням змінної маси та положення центра ваги.

У фундаментальних наукових працях динаміка визначається як наука про рух під дією сил. Зокрема, у підручнику В.М. Короля "Основи проектування і розрахунку технологічної оснастки" динаміка подається як дисципліна, що описує закономірності руху механізмів під дією зусиль та моментів [84] з метою забезпечення їх функціональної надійності та енергетичної ефективності. У класичному виданні "Mechanical Engineering Design" авторів Shigley та Mischke динаміка трактується як основа для аналізу навантажень і рухів у машинобудівних конструкціях[85]. Norton у праці "Design of Machinery" підкреслює, що динаміка є ключем до розуміння реальної поведінки механізмів[86] і є критично важливою для їх оптимізації.

Варто окремо підкреслити значення динаміки в управлінні промисловими процесами, що базуються на використанні обертально-поворотних пристроїв. З огляду на вимоги до якості зварювального шва, досягнення високої точності позиціонування і стабільності руху платформи є критично важливими. Недостатнє врахування динамічних характеристик може призвести до вібрацій, коливань або навіть втрати стабільності, що неприпустимо при роботі з великогабаритними чи відповідальними виробами.

Динаміка дозволяє враховувати не лише миттєві значення сил і моментів, але й їхні зміни у часі, що важливо при виборі регулювання швидкості, прискорення і гальмування. Наприклад, під час зварювання довгих циліндричних виробів, що мають значний момент інерції, неправильне керування прискоренням може призвести до перевищення допустимих навантажень на редуктор або підшипники. Інженер, застосовуючи динамічні моделі, здатен

передбачити подібні ризики і закласти у конструкцію необхідні запас міцності та параметри приводів.

У багатьох сучасних виробництвах використовуються автоматизовані системи керування, що базуються на числовому програмному управлінні (ЧПУ) або інтегрованих програмно-апаратних рішеннях. Динаміка у цих системах враховується не лише на етапі проектування, але й у реальному часі під час роботи системи. Наприклад, за допомогою датчиків положення та зворотного зв'язку система коригує рухи відповідно до динамічної моделі, мінімізуючи вібрації та підвищуючи якість обробки чи зварювання.

Реалізація таких алгоритмів передбачає побудову математичних моделей, що враховують інерційні характеристики, масу виробів, жорсткість конструкцій, втрати на тертя та інші параметри. Наприклад, для платформи, яка здійснює обертання навколо вертикальної осі, розрахунок необхідного крутного моменту здійснюється з урахуванням моменту інерції, що залежить від маси і геометрії виробу. При цьому враховуються також коефіцієнти тертя у підшипникових вузлах і втрати в приводних механізмах. Сукупний крутний момент визначається як сума моментів, необхідних для подолання інерції, тертя та зовнішніх навантажень, з урахуванням коефіцієнтів запасу на надійність.

Динамічні розрахунки мають критичне значення для вибору типу приводу. Наприклад, для обертання важких конструкцій часто використовуються черв'ячні редуктори, які забезпечують не лише необхідне передаточне число, а й самогальмівні властивості, що дозволяє утримувати деталь у заданому положенні без додаткових гальм. Проте, такі редуктори мають низький ККД через втрати на тертя, що також повинно враховуватись у динамічних розрахунках при виборі двигуна.

Завдяки використанню динамічного аналізу вдається також оптимізувати масоінерційні характеристики конструкцій, зменшуючи зайву масу і тим самим знижуючи енергоспоживання. Наприклад, використання полегшених матеріалів або змінення геометрії елементів може суттєво знизити момент інерції без втрати

жорсткості, що забезпечує підвищення продуктивності і зниження навантаження на приводи.

Таким чином, динаміка є не лише фундаментальною науковою дисципліною, а й практичним інструментом інженера, що дозволяє забезпечити ефективність, надійність і довговічність механічних системах[87]. Її роль у проектуванні обертально-поворотних пристроїв є визначальною, оскільки саме динамічний аналіз дозволяє повністю розкрити потенціал цих систем, забезпечити високу якість технологічних процесів та оптимізувати енергетичні витрати виробництва.

5.2. Динамічні характеристики обертально – поворотного пристрою

Динамічні характеристики обертально-поворотного пристрою (ОПП) визначають його здатність забезпечувати контрольований обертальний і поворотний рух платформи з закріпленням виробом. Ці характеристики мають вирішальне значення для забезпечення точності позиціонування, стійкості системи під час роботи, енергоефективності приводу та надійності всієї конструкції. Динамічний аналіз дозволяє розраховувати сили, моменти та енергетичні параметри, що виникають під час руху, з урахуванням реальних масо-інерційних властивостей пристрою та встановленого на ньому вантажу.

Основним параметром, що безпосередньо впливає на всі динамічні характеристики – це маса вантажу (m , кг). Вона визначає величини інерційних і гравітаційних сил, що виникають у системі під час її роботи. Маса вантажу є базовим значенням для розрахунку моментів інерції, сил тертя, відцентрових та інерційних сил, а також для визначення необхідної потужності приводу.

Однією з найважливіших характеристик обертального руху є момент інерції (J , кг·м²), що відображає здатність системи чинити опір змінам стану обертання. Його значення залежить від геометрії та маси вантажу. Для диска масою m і радіусом r він обчислюється за класичною формулою:

$$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2, \quad (5.7)$$

де J — момент інерції ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$);

m — маса диска (кг);

r — радіус диска (м).

У випадку прямокутної платформи момент інерції визначається як:

$$J = \frac{1}{12} \cdot m \cdot (l^2 + b^2), \quad (5.8)$$

де l — довжина платформи (м);

b — ширина платформи (м).

Якщо центр мас вантажу зміщений відносно осі обертання на відстань d , застосовується теорема Гюйгенса-Штейнера:

$$J_p = J_c + m \cdot d^2, \quad (5.9)$$

де J_p — момент інерції відносно нової осі ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$);

J_c — момент інерції відносно осі, що проходить через центр мас ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$);

d — відстань від центра мас до осі обертання (м).

Під час обертання вантажу виникає відцентрова сила (F_c , Н), що визначається як:

$$F_c = m \cdot \omega^2 \cdot r, \quad (5.10)$$

де ω — кутова швидкість обертання (рад/с);

r — відстань від осі обертання до центра мас (м).

Відцентрова сила прямо пропорційна масі та квадрату кутової швидкості, що особливо важливо враховувати при високошвидкісному обертанні великих вантажів.

Під час розгону або зупинки виникає інерційна сила (F_i , Н):

$$F_i = m \cdot \alpha \cdot r, \quad (5.11)$$

де α — кутове прискорення (рад/с^2).

Ця сила є визначальним чинником для вибору приводу, оскільки саме вона обумовлює імпульсні навантаження на механізми при пусках і зупинках.

Щоб забезпечити потрібне прискорення, привід повинен створювати крутний момент (M , Н·м), що обчислюється як:

$$M = J \cdot \alpha, \quad (5.12)$$

Де J — момент інерції (кг·м²);

α — кутове прискорення (рад/с²).

Системи обертання зазвичай мають механічні втрати через тертя в опорах і передавальних механізмах. Сила тертя (F_f , Н) розраховується за формулою:

$$F_f = \mu \cdot m \cdot g, \quad (5.13)$$

Іє μ — коефіцієнт тертя (безрозмірна величина),

g — прискорення вільного падіння (9,81 м/с²).

Сумарний крутний момент, що враховує подолання інерційних і фрикційних навантажень, визначається як:

$$M_{\text{сум}} = J \cdot \alpha + \mu \cdot m \cdot g \cdot r. \quad (5.14)$$

Для забезпечення обертання з постійною швидкістю потрібна потужність приводу (P , Вт), що розраховується як:

$$P = M \cdot \omega, \quad (5.15)$$

де M — крутний момент (Н·м);

ω — кутова швидкість (рад/с).

Кінетична енергія обертального руху (E_k , Дж) визначається як:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2, \quad (5.16)$$

де J — момент інерції (кг·м²);

ω — кутова швидкість (рад/с).

При використанні черв'ячної передачі, яка забезпечує фіксацію платформи без додаткових гальмівних пристроїв, важливим параметром є її ККД (η). Він визначається як:

$$\eta = \frac{\tan \gamma}{(\tan \gamma + \mu)}, \quad (5.17)$$

де γ — кут підйому гвинтової лінії (рад або градуси);

μ — коефіцієнт тертя (безрозмірна величина).

Фактична потужність приводу з урахуванням ККД:

$$P_f = \frac{P}{\eta} \quad (5.18)$$

Для забезпечення стабільної роботи необхідно оцінювати власні частоти системи (f_0 , Гц):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (5.19)$$

де k — жорсткість системи (Н/м);

m — маса вантажу (кг).

Щоб оцінити здатність системи до затухання коливань, використовується коефіцієнт демпфування (ξ):

$$\xi = \frac{c}{2 \cdot \sqrt{m \cdot k}}, \quad (5.20)$$

де c — коефіцієнт в'язкого демпфування (Н·с/м);

m — маса вантажу (кг);

k — жорсткість системи (Н/м).

5.3. Модель динамічного навантаження.

Стабільна і передбачувана робота обертально-поворотного пристрою значною мірою залежить від здатності привідної системи компенсувати змінні навантаження та забезпечувати точне позиціонування у реальному часі. Для забезпечення такого рівня керованості було розроблено розширену аналітичну модель, яка описує поведінку системи за чотирма ступенями свободи з урахуванням впливу пружних деформацій, тертя, демпфування і передаточного відношення приводу.

У моделі враховано наступні компоненти:

- електродвигун, що генерує крутний момент;
- передавальний механізм з пружними і демпфуючими властивостями;
- оберտальна платформа;
- зовнішнє навантаження у вигляді виробу.

Структура моделі показана на рис. 5.1

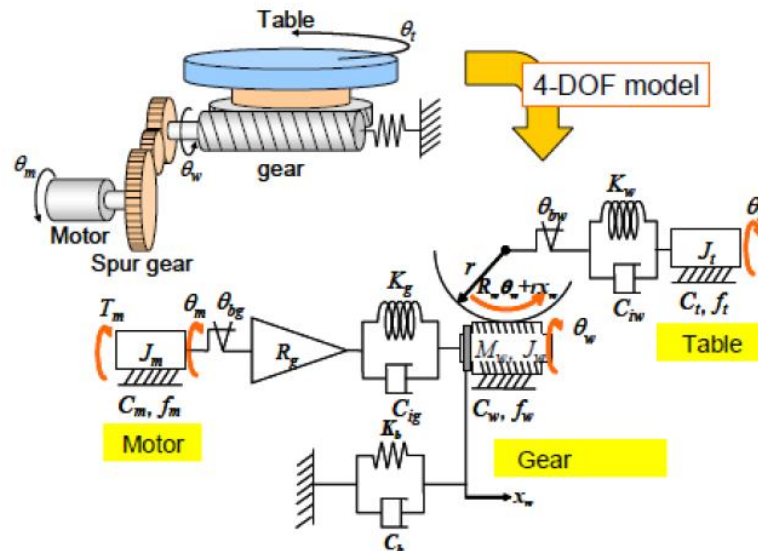


Рисунок 5.1 - Узагальнена динамічна модель з урахуванням інерції, жорсткості та демпфування [88]

Динаміка обертового блоку описується системою диференціальних рівнянь:

$$J_m \ddot{\theta}_m + C_m \dot{\theta}_m + f_{cm} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_m) + R_g (J_m \ddot{\theta}_m + C_m \dot{\theta}_m + f_{cm} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_m) + K_\omega (\theta_\omega R_g - \theta_\omega)) = T_m \quad (5.21)$$

$$J_\omega \ddot{\theta}_\omega + C_\omega \dot{\theta}_\omega + f_{c\omega} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_\omega) + K_\omega (\theta_m R_g - \theta_\omega) + K_b x_\omega + C_b \dot{x}_\omega = 0 \quad (5.22)$$

$$J_t \ddot{\theta}_t + C_t \dot{\theta}_t + f_{ct} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_t) - K_b x_\omega - C_b \dot{x}_\omega = 0 \quad (5.23)$$

де: J_m, J_ω, J_t — моменти інерції двигуна, приводу та платформи;

C_m, C_ω, C_t — коефіцієнти демпфування;

f_m, f_ω, f_t — сухе тертя;

R_g — передаточне відношення;

K_ω, K_b — жорсткість з'єднань;

C_b — демпфування між механізмами;

$\dot{x}_\omega$ — пружне зміщення;

$\theta_\omega, \theta_m, \theta_t$ — кути обертання;

T_m — момент двигуна.

У цих рівняннях момент тертя Кулона f для двигуна (f_m), приводного механізму (f_ω) та столу (f_t) визначається відповідно, як наведено нижче (у формулі це вже зазначено).

$$f_m = f_{cm} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_m), \quad (5.24)$$

$$f_\omega = f_{c\omega} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_\omega), \quad (5.25)$$

$$f_t = f_{ct} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_t), \quad (5.26)$$

У межах аналітичного підходу було змодельовано і порівняно дві конструктивні схеми привідного механізму:

- Черв'ячний привід (Worm Gear Mechanism)
- Роликовий кулачковий привід (Roller Gear Cam Mechanism)

Ці дві схеми (рис.5.2 і 5.3) мають суттєві відмінності з точки зору механічної жорсткості, точності позиціювання, демпфування і стійкості до люфтів. Для візуалізації конструктивних рішень і для подальшого аналізу обидві схеми були представлені у вигляді структурних схем.

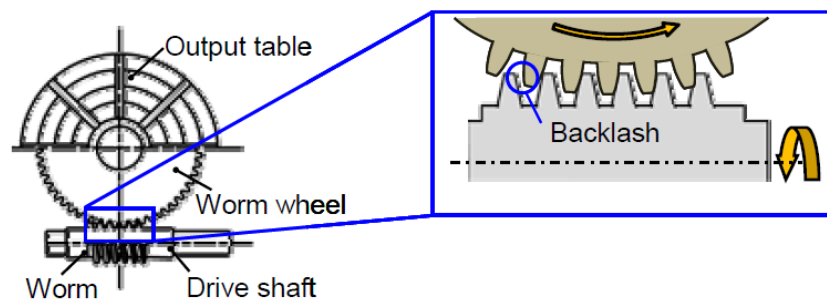


Рисунок 5.2 -Основні елементи черв'ячного приводу з позначенням напрямку передачі моменту.[88]

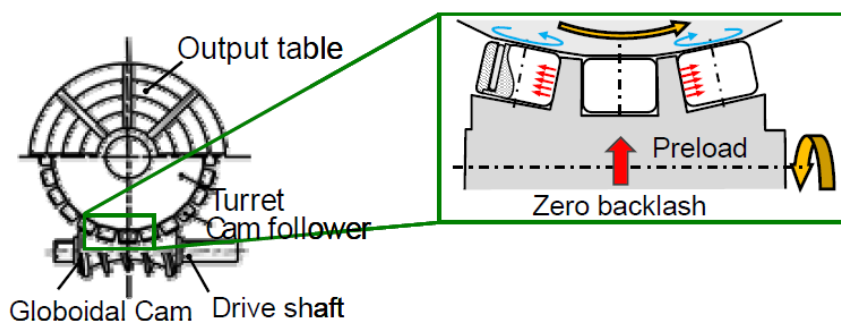


Рисунок 5.3- Конструкція роликового кулачкового механізму, що забезпечує передачу без люфту з підвищеною жорсткістю.[88]

Черв'ячний привід забезпечує простоту конструкції, здатність до самогальмування і меншу вартість виготовлення, однак поступається за точністю та жорсткістю через наявність люфту і пружних деформацій у парі зчеплення.

Роликовий кулачковий привід демонструє високу жорсткість, відсутність люфту та плавне передавання моменту, що є критично важливим для високоточної роботи. Разом з тим він вимагає більш високих допусків на виготовлення і складнішої системи змащення та обслуговування.

Аналітичне порівняння підтвердило доцільність використання роликового приводу для систем, де пріоритетом є висока точність, стабільність і відсутність зворотного ходу. Черв'ячний привід залишається прийнятним рішенням для менш вимогливих систем, де важливіші вартість і простота.

Детальна аналітична оцінка поведінки системи в частотній області дозволила виявити ключові відмінності між черв'ячним та роликовим кулачковим приводами з точки зору резонансних частот і стабільності роботи в широкому діапазоні швидкостей.

Розрахунок амплітудно-частотних характеристик було здійснено на основі аналітичної моделі динаміки, яка враховує масо-інерційні параметри, жорсткість і демпфування кожного елемента системи. Результати моделювання дозволили побудувати графіки частотної поведінки обох типів приводів (рис.5.4).

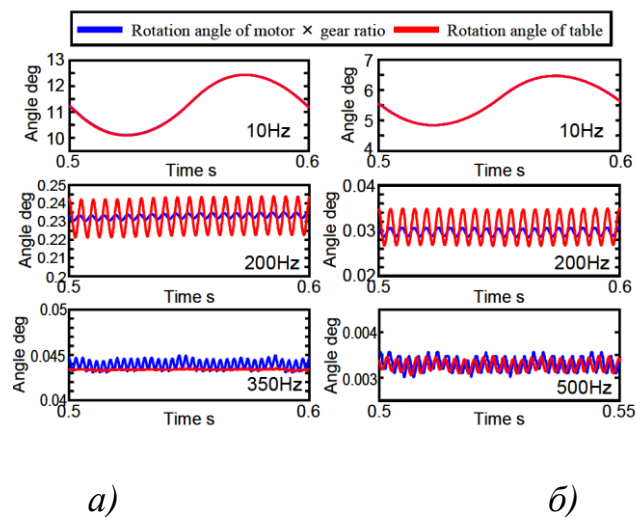


Рисунок 5.4 - Графіки амплітудно-частотних характеристик обох конструктивних рішень приводу.

а) - Черв'ячний привід б) - Роликово кулачковий привід

Для черв'ячного приводу моделювання показало наявність основної резонансної зони в межах 230–280 Гц, що суттєво обмежує допустимий діапазон робочих швидкостей без ризику резонансних явищ.

Для роликового кулачкового механізму розрахунки показали зсув резонансних частот у вищий діапазон 270–430 Гц, що значно розширює можливості системи працювати на більш високих швидкостях з меншими ризиками втрати стабільності.

Аналітичні дослідження частотних властивостей підтвердили доцільність вибору роликового кулачкового приводу для систем, що потребують:

- широкого діапазону робочих швидкостей;
- підвищеної стійкості до резонансних явищ;
- стабільної роботи при змінних навантаженнях.

Пристрої з черв'ячною передачею залишаються актуальними для застосувань, де основними вимогами є компактність, низька вартість і простота технічного обслуговування.

5.4 Аналітична модель оцінки впливу орієнтації виробу на динамічні характеристики обертально-поворотного пристрою

У процесі створення високоточних обертально-поворотних пристроїв особливу увагу слід приділяти оцінці впливу орієнтації виробу на динамічні властивості системи. Від положення платформи у просторі залежить не лише ефективність виконання технологічних операцій, але й навантаження на привід, стабільність руху та якість позиціонування. Саме тому у межах нашого дослідження було розроблено аналітичний підхід до визначення просторової орієнтації виробу та її впливу на кінематичні й динамічні характеристики обертального блоку.

На першому етапі розробляється аналітична модель, що описує положення виробу на платформі з двома ступенями свободи (рис.5.5): обертання навколо вертикальної осі (кут φ) і нахил навколо горизонтальної осі (кут θ). Математично

положення будь-якої точки p виробу у глобальній системі координат описується через комбінацію матриць повороту:

$$P = R_z(\varphi) \cdot R_x(\theta) \cdot p, \quad (5.27)$$

де P — положення точки у глобальній системі координат;

p — положення точки у локальній системі координат виробу;

$R_z(\varphi)$ — матриця обертання на кут φ навколо вертикальної осі Z ;

$R_x(\theta)$ — матриця нахилу на кут θ навколо горизонтальної осі X .

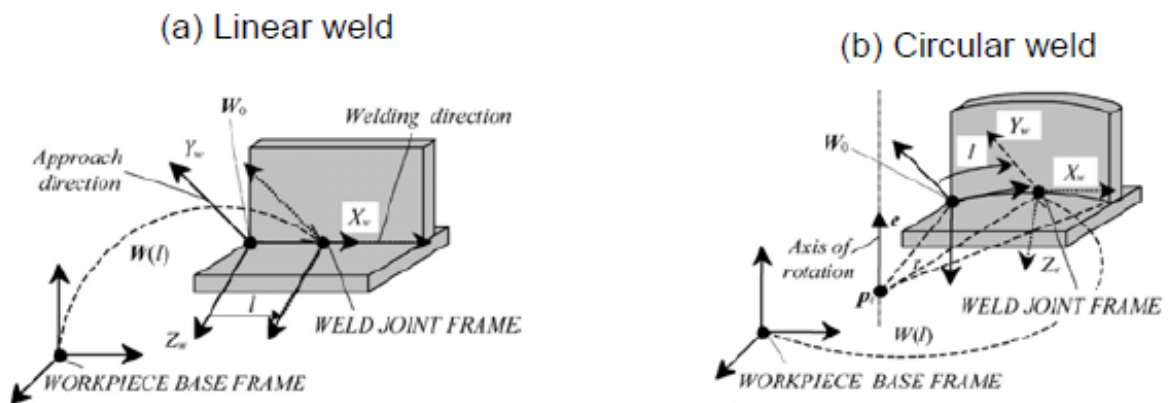


Рисунок 5.5 - просторове розташування платформи і виробу з позначенням осей та кутів орієнтації[89].

Далі, для оцінки орієнтації поверхні виробу відносно гравітаційного поля, було введено два ключових параметри (рис.5.6):

Кут нахилу платформи θ , що визначається як:

$$\theta = \arctan2(-n_z, \sqrt{n_x^2 + n_y^2}) \quad (5.28)$$

Кут повороту платформи ξ , що обчислюється за формулою:

$$\xi = \arctan2(s_y, s_x) \quad (5.29)$$

де: n_z, n_x, n_y — компоненти вектора нормалі до поверхні виробу;

s_y, s_x — компоненти вектора подачі інструменту.

Таким чином, цей підхід дозволяє формалізувати задачу орієнтації виробу на платформі та визначити оптимальні положення для виконання технологічних операцій, враховуючи гравітаційні та кінематичні обмеження.

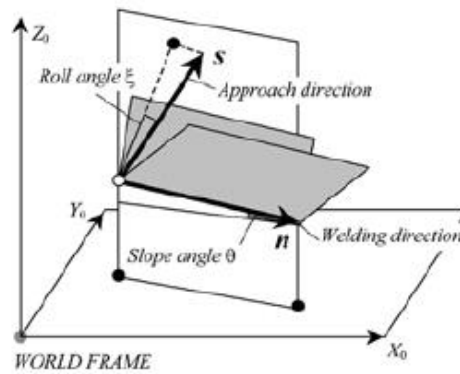


Рисунок 5.6- Просторові кути нахилу і повороту поверхні виробу відносно гравітаційного вектора[89].

Розуміння кінематичних особливостей руху платформи є необхідною умовою для забезпечення її стабільної роботи в різних режимах експлуатації. Платформа, яка має два ступені свободи, рухається за рахунок обертання навколо вертикальної осі та нахилу навколо горизонтальної. Ці рухи супроводжуються зміною просторового положення центра мас, що безпосередньо впливає на динамічні навантаження, які повинні компенсувати приводи обертального блоку. Під час аналізу використовувалася узагальнена схема будови роботизованої клітини з обертально-поворотним столом, яка ілюструє розташування платформи, осі обертання та зони досяжності (рис.5.7).

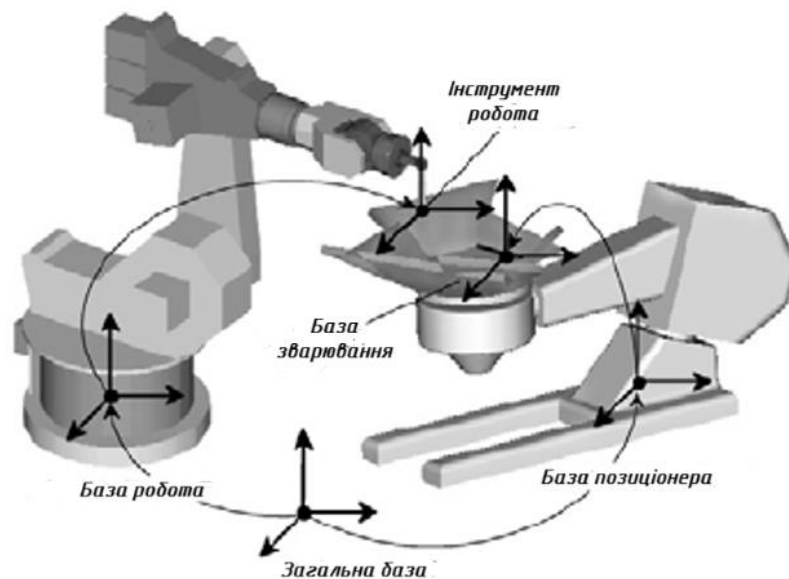


Рисунок 5.7 - Візуалізація основних елементів кінематичної побудови обертального блоку в загальній структурі клітини

Швидкість руху платформи визначається як сукупність обертального руху навколо вертикальної осі та нахилу навколо горизонтальної осі. Вектор кутової швидкості платформи математично описується рівнянням:

$$\vec{\omega} = \dot{\phi} k_z + \dot{\theta} k_x, \quad (5.30)$$

де: $\vec{\omega}$ — вектор кутової швидкості;

$\dot{\phi}$ — швидкість обертання платформи навколо вертикальної осі;

$\dot{\theta}$ — швидкість нахилу платформи навколо горизонтальної осі;

k_z — одиничний вектор уздовж осі Z;

k_x — одиничний вектор уздовж осі X у нахиленому положенні.

Це рівняння дозволяє визначати моментальні швидкості платформи у будь-якому її положенні, що є базою для розрахунку навантажень на привід.

Обертальний момент, який повинен забезпечити привід для виконання руху, визначається залежністю:

$$M = J \cdot \dot{\omega} \quad (5.31)$$

де: M — крутний момент;

J — момент інерції платформи з урахуванням положення виробу;

$\dot{\omega}$ — кутове прискорення.

Варто зазначити, що момент інерції J змінюється залежно від положення платформи і орієнтації виробу, що підтверджує необхідність постійного перерахунку навантажень у реальному часі. Зміщення центра мас при зміні кута нахилу платформи значно впливає на величину інерційного навантаження. Наприклад, коли виріб віддаляється від осі обертання, збільшується важіль дії сили, що відповідно підвищує момент, який повинен бути компенсований приводом.

Таким чином, отримувані кінематичні моделі дозволяють не лише описати рух платформи, а й формалізувати залежність навантаження приводу від орієнтації виробу. Це є ключовим етапом для подальшої оптимізації керування і забезпечення енергетичної ефективності обертального блоку.

Щоб зменшити загальні навантаження на систему, варто кластеризувати орієнтацію за схожими кінематичними властивостями. Це дозволяє зменшити кількість великих переміщень і стабілізувати поведінку платформи (рис.5.8).

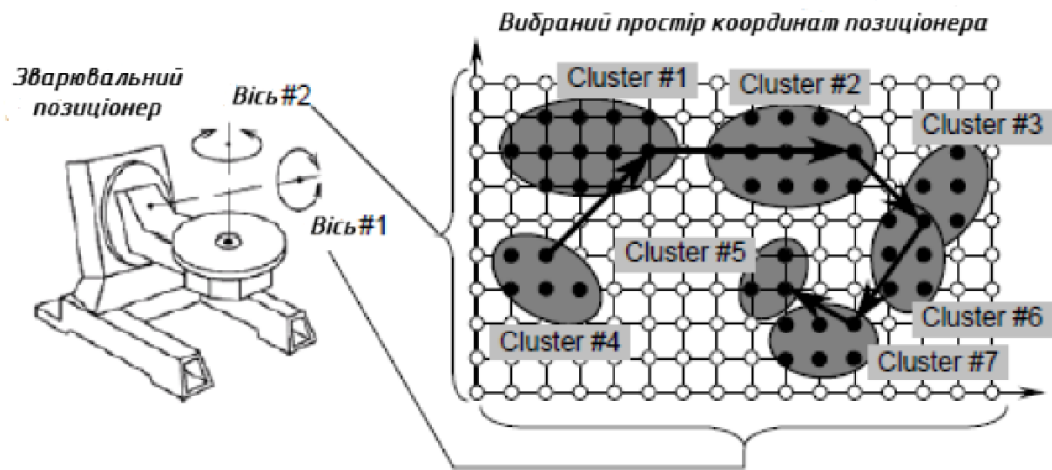


Рисунок 5.8- Угрупування послідовностей рухів платформи для зменшення амплітуд переміщень

Після кластеризації послідовностей орієнтацій постає задача розробки ефективного алгоритму планування рухів платформи, який дозволяв би мінімізувати зайві переміщення, зменшити енергетичні витрати та забезпечити стабільність позиціонування. Варто сформував багаторівневий алгоритм оптимізації, який виконує вибір оптимального маршруту руху платформи в межах кластерів.

В основі алгоритму лежить розрахунок вагової функції орієнтації, яка оцінює вплив кожного положення платформи на якість процесу та навантаження на систему. Вагова функція враховує орієнтацію нормалі до поверхні виробу відносно гравітаційного вектора:

$$\omega(\theta, \phi) = \| n(\theta, \phi) \cdot \vec{g} \| \quad (5.32)$$

де: $\omega(\theta, \phi)$ — вагова функція орієнтації;

$n(\theta, \phi)$ — нормаль до поверхні виробу залежно від кутів θ і ϕ ;

$\vec{g}$ — гравітаційний вектор.

Це дозволяє мінімізувати вплив гравітаційних сил на процес, знизити навантаження на привід і підвищити стабільність руху.

В результаті реалізації алгоритму отримуються оптимальні послідовності рухів платформи, які зменшують кількість зайвих переміщень, забезпечують стабільне положення виробу та мінімізують енергетичні витрати (рис.5.9 і 5.10). Це підтверджує ефективність розробленої методики для реальних виробничих умов.

Ця аналітична модель застосовується для формування прогнозованих карт поведінки обертально-поворотного пристрою з метою підвищення точності планування технологічних операцій. На основі аналізу кутових конфігурацій платформи (нахилу та обертання) будуються карти орієнтації, які дозволяють виявляти зони стабільної роботи та критичні області.

Першим кроком є створення карти досяжності, що ілюструє всі допустимі комбінації кутів нахилу та обертання платформи, які забезпечують дотримання технологічних допусків орієнтації.

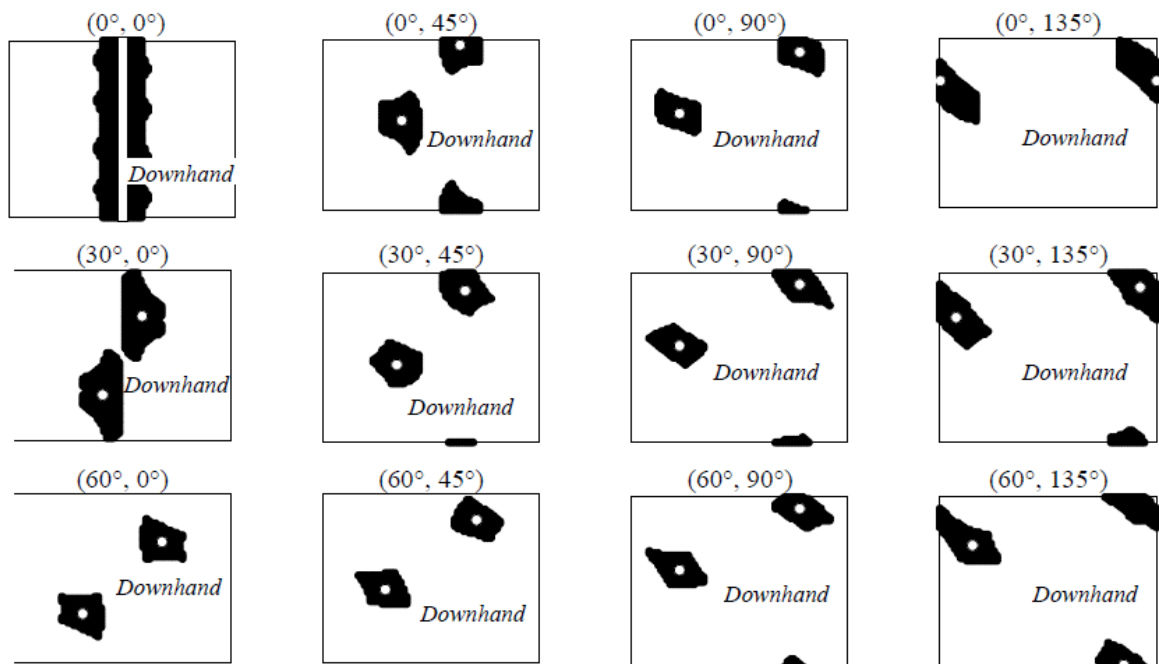


Рисунок 5.9 - Демонстрація області допустимих положень платформи для різних початкових орієнтацій виробу[89].

Це моделювання дозволяє виявити оптимальні послідовності переходів між кластерами орієнтацій, що мінімізують час переналадки та забезпечують прийнятні умови зварювання. Результати представлені у вигляді схем оптимальних маршрутів[89].

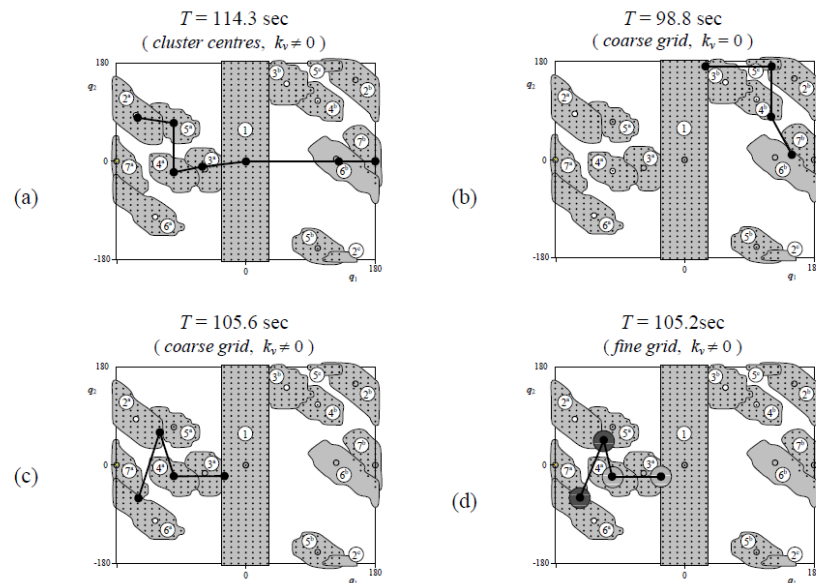


Рисунок 5.10 - Стратегії переміщення платформи між кластерами орієнтацій із зазначенням часу виконання.

Результати аналізу узагальнюються у вигляді карти стабільності, що дозволяє візуально визначити найбільш сприятливі області для виконання технологічних операцій.

На основі отриманих карт та маршрутів формуються таблиці, які містять:

- допустимі діапазони кутів орієнтації;
- очікувані навантаження на привід;
- рекомендовані шляхи переходів між кластерами;
- часи виконання технологічних операцій.

Такі таблиці дозволяють впровадити результати аналізу у програмне забезпечення для автоматичного керування ОПП.

Таким чином, карти поведінки, оптимальні маршрути та таблиці характеристик дозволяють:

- забезпечити передбачувану і стабільну роботу обертового блоку;
- мінімізувати енергетичні втрати;
- зменшити навантаження на привідні механізми;
- інтегрувати аналітичні моделі у системи реального керування.

Отримані результати відкривають перспективи для подальшого вдосконалення керування ОПП на основі моделей поведінки, орієнтованих на конкретні технологічні завдання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Міжнародна федерація робототехніки (IFR) – World Robotics Report 2023. Офіційний сайт. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ifr.org/worldrobotics> (дата звернення: 24 березня 2025 р.)
2. Американське зварювальне товариство (AWS) – Welding Research. Офіційний сайт. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.aws.org/welding-research> (дата звернення: 24 березня 2025 р.)
3. Markets and Markets – Robot Welding Market Forecast 2028. Офіційний сайт. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.marketsandmarkets.com/report-search-page.asp?rpt=robotic-welding-market> (дата звернення: 26 березня 2025 р.)
4. Occupational Safety and Health Administration (OSHA). Офіційний сайт. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.osha.gov/safety-management> (дата звернення: 26 березня 2025 р.)
5. Кузнецов Ю. М., Саленко О. Ф., Харченко О. О., Щетинін В. Т. Технологічне обладнання з ЧПК: механізми і оснащення: Навч. Посібник для студентів вищих навчальних закладів / Ю. М. Кузнецов, О. Ф. Саленко, О. О. Харченко, В. Т. Щетинін. – Київ-Кременчук-Севастополь: Вид-во «Точка», 2014 – 500 с.: іл.
6. Markets and Markets. Modular Automation Market by Component, Function, Industry – Global Forecast to 2027 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/modular-automation-market-254021991.html> . – (дата звернення: 23 березня 2025 р.)
7. Lincoln Electric. ANNEX Robotic Positioners [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.lincolnelectric.com/en/Products/Automation/ANNEX-Robotic-Positioners>. – (дата звернення: 24 березня 2025 р.)
8. International Federation of Robotics. World Robotics 2023 Report: Asia ahead of Europe and the Americas [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

- <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/world-robotics-2023-report-asia-ahead-of-europe-and-the-americas>. – (дата звернення: 24 березня 2025 р.)
9. Rheinmetall AG. ARTEC GmbH – Joint Venture for Military Vehicles [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.rheinmetall.com/de/unternehmen/tochtergesellschaften/artec>. – (дата звернення: 25 березня 2025 р.)
 10. Airbus. FAST Magazine Issue 41: In-Service Enhancement Package (ISEP) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://aircraft.airbus.com/sites/g/files/jlcbta126/files/2022-04/FAST41.pdf>. – (дата звернення: 25 березня 2025 р.)
 11. Intuitive Surgical. da Vinci Products and Services [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.intuitive.com/en-us/products-and-services/da-vinci>. – (дата звернення: 27 березня 2025 р.)
 12. Fronius International GmbH. Зварювальні технології: продукти [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.fronius.com/uk-ua/ukraine/zvaryvalni-tekhnologiyi/produkty>. – (дата звернення: 27 березня 2025 р.)
 13. Yaskawa Motoman. Welding cell systems [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.motoman.com/en-us/applications/arc-welding/welding-cell-systems>. – (дата звернення: 3 квітня 2025 р.)
 14. METSOL. Модульні системи з роботом [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.metsol.ru/info/articles/modulnye-sistemy-s-robotom/>. – (дата звернення: 4 квітня 2025 р.)
 15. Weldering.com. Промышленное оборудование: зажимные приспособления, кондукторы [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://weldering.com/promyshlennoe-oborudovanie-zazhimnye-prisposobleniya-konduktory>. – (дата звернення: 4 квітня 2025 р.)
 16. Карпенко А.С. Технологічна оснастка у зварювальному виробництві/2-ге видання, переробл. та доповн.: Навч. посібник. - К.: Арістей, 2006.- 272с.
 17. ДСТУ 3575-97. Патентні дослідження. Основні положення та порядок проведення. – Київ: Держстандарт України, 1998. – 16 с.

- 18.Espacenet Patent Search – European Patent Office. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://worldwide.espacenet.com/> (дата звернення: 11 квітня 2025 р.)
- 19.ДП «Український інститут інтелектуальної власності»(Укрпатент) – Офіційний сайт. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ukrpatent.org/uk> (дата звернення: 14 квітня 2025 р.)
- 20.Севбо П.И. Конструирование и расчет механического сварочного оборудования / П.И. Севбо. – К.: Наук. думка, 1978. –400 с.
- 21.Тимченко В.А., Сухомлин А.А. Роботизация сварочного производства -К.: Техника, 1988.-175 с.
- 22.Patentscope – WIPO Patent DataBase. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.wipo.int/en/web/patentscope> (дата звернення: 14 квітня 2025 р.)
- 23.WO2011045078A1. Device for positioning and rotating workpieces [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/WO2011045078A1/en>. – (дата звернення: 15 квітня 2025 р.)
- 24.Гришин В.А. Поворотные устройства в автоматизированном производстве / В.А. Гришин. – М.: Машиностроение, 2015. – 216 с.
- 25.Патент України №116543. Обертально-поворотний пристрій / заявник та власник: ТОВ «Зварювальні технології». – Опубліковано 25.11.2020.
- 26.C. Zhang, Y. Wang. Modular Positioning System for Robotic Welding / Journal of Manufacturing Systems. – 2020. – Vol. 56. – P. 82-91.
- 27.Zuev A.S. Analysis and Classification of Rotary-Tilting Devices / Engineering Journal of Advanced Technologies. – 2019. – No. 4(73). – P.44-49.
- 28.Воронов І, Б. Сучасні зварювальні маніпулятори: технічні рішення та перспективи / І.Б. Воронов, С. О. Мартинюк. – К.: Техніка, 2022. – 178с.
- 29.Huang Y., Li M. Smart Fixtures with Sensor Integration for Precision Welding/ Robotics and Computer – Integrated Manufacturin. – 2021. – Vol. 68 – P. 101.

30. Патент США № US 10828345 B2. Modular Welding Positioner / заявник: Lincoln Electric Company. – Опубліковано: 17.11.2020.
31. ISO 17916:2016 Safety requirements for mechanized plasma and laser cutting of metals. – International Organization for Standardization, 2016. – 32p.
32. Zwicky, F. (1969) Discovery, Invention, Research - Through the Morphological Approach, Toronto: The Macmillan Company.
33. Кузнецов Ю. М. Основи технічної творчості: Нав. Посіб. – К.: Видавництво «Політехніка», 2004. – 256 с.
34. Кузнецов Ю.М. Моделювання технічних систем: підручник. -К.:КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2008. – 316 с.
35. Рижов В. М. Системний підхід до вирішення інженерних задач. – Дніпро: Університетська книга, 2001. – 199 с.
36. Кулешов С. П. Методика розробки технічних систем: Навчальний посібник. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – 152 с.
37. Баженов В.А., Назаренко Ю.П. Методи інженерної творчості. – К.: Наука 2015.
38. Тимченко, В.О. Роботизація зварювального виробництва [Текст]/В.А. Тимченко, О.О. Сухомлін. - К.: Техніка, 1988. - 175 с.: Іл. ; 23,5 см. – Бібліогр.: с. 171-173. - 6000 прим. - ISBN 5-335-00103-8.
39. Биковський О.Г. Довідник зварника/ О.Г. Биковський, І.В. Пінковський К.: Техніка (2002) 336 с.
40. Кузнецов Ю.М. Теорія вирішення творчих задач, К.: ТОВ «ЗМОК»-ПП «ГНОЗИС» (2003) 294 с.
41. Кузнецов Ю.Н., Хамуєла З.А. Герра, Хамуєла Т.О. Морфологічний синтез верстатів та їх механізмів /за ред. Ю.Н. Кузнецова. К.: ТОВ «Гнозис» (2012) 416 с.
42. Врагов Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков.- М.: Машиностроение, 1978.- 208 с.

43. Підгорний, Н. А. Універсальний обертально-поворотний зварювальний пристрій : дипломний проект ... бакалавра : 131 Прикладна механіка / Підгорний Назар Андрійович. – Київ, 2023. – 104 с.
44. Теорія технічних систем в аспектах досліджень та технічної творчості = Theory of Technical Systems in Aspects of Research and Technical Creativity : підручник для здобувачів освітніх рівнів бакалавра, магістра та доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка»/ Ю. М. Кузнєцов, Б. І. Придальний. - Луцьк : Вежа-Друк, 2023. – 284 с.
45. Koike Aronson, Inc. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.koike.com>. – (дата звернення: 22 квітня 2025 р.)
46. Schuler Group GmbH. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.schulergroup.com>. – (дата звернення: 26 квітня 2025 р.)
47. Fronius International GmbH. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.fronius.com/en/>. – (дата звернення: 27 квітня 2025 р.)
48. KUKA AG. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.kuka.com>. – (дата звернення: 01 травня 2025 р.)
49. Weldlogic, Inc. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://weldlogic.com>. – (дата звернення: 01 травня 2025 р.)
50. Petrov V., Shlapak V. Modular Rotary Positioners: Design and Control Concepts. // Journal of Engineering Systems. – 2021. – №3(45). – С. 120–128.
51. ISO 12100:2010 – Safety of machinery – General principles for design.
52. ГОСТ 2.103-68. ЄСКД. Стадії розробки. – М.: Стандартінформ, 2012.
53. Кузнєцов В.І. Системи координат і конфігурації обертальних пристроїв // Механіка і автоматизація машинобудування. —2017. – №4. – С.56-61.
54. Борисенко С. Л. Модульне проектування поворотних столів: аналіз і перспективи // Наукові праці ОНАХТ. – 2018. - № 24. – С. 99-104.
55. Швець М. О. Приводи для обертально-поворотних пристроїв: класифікація і вибір // Техніка і технології АПК. – 2019. - №2. – С. 112-117.
56. Волков А. М. Черв'ячні редуктори в конструкціях ОПП // Сучасне машинобудування. – 2015. - №1. – С. 27-31.

57. Air-Hydraulics, Inc. How do rotary indexing tables work? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www-airhydraulics-com.translate.goog/blog/how-do-rotary-indexing-tables-work/?_x_tr_sl=auto&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=uk. – (дата звернення: 02 травня 2025 р.)
58. Allenair Corporation. Allenair product catalog [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://allenair.com/wp-content/uploads/2022/09/Allenair-Catalog-New-Pages-final.pdf#page=83>. – (дата звернення: 02 травня 2025 р.)
59. ZOLLERN GmbH & Co. KG. Hydrostatic bearing technology [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.zollern.com/fileadmin/data/ZHA_Hydrostatik/files/en/ZOLLERN-Broschuere_Hydrostatik_ENG.pdf. – (дата звернення: 04 травня 2025 р.)
60. ZOLLERN GmbH & Co. KG. ZOLLERN rotary table systems [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.zollern.com/fileadmin/data/ZHA_Rundtische/files/en/ZOLLERN-Rundtischsysteme_Rueckle_ENG.pdf. – (дата звернення: 04 травня 2025 р.)
61. WEISS GmbH. TW Rotary Table with Hybrid Drive [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.weiss-world.com/gb-en/products/rotary-indexing-tables-44/rotary-table-with-hybrid-drive-112>. – (дата звернення: 04 травня 2025 р.)
62. ДСТУ ISO 3834-2:2021. Вимоги до якості при зварюванні металевих матеріалів. Частина 2. – К.: УкрНДНЦ, 2021.
63. Стельмах І. В. Конструкції фіксуючих механізмів для зварювання трубопровідних заготовок // Збірка наукових праць ХНУМГ. – 2020. - №28. – С. 83 – 88.
64. ДСТУ EN ISO 12100:2020. Безпечність машин. Загальні принципи проектування. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків. – К.: УкрНДНЦ, 2020.
65. Руденко Л. О. Інтеграція модульних ОПП у виробничі лінії з ЧПК // Вісник машинобудування та транспорту. – 2021. - №3. – С. 41-46.

- 66.ISO 23273-2:2013 – Robotics — Performance criteria.
- 67.Petrov V., Shlapak V. Modular Rotary Positioners: Control Concepts. // Journal of Engineering Systems. – 2021.
- 68.Siemens Drive Technology – Catalog D 81.1.
- 69.Beckhoff Automation GmbH & Co. KG. EtherCAT Technology Overview [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.beckhoff.com>. – (дата звернення: 06 травня 2025 р.)
- 70.STMicroelectronics. STM32 MCU documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.st.com>. – (дата звернення: 06 травня 2025 р.)
- 71.WinCC Unified System Manual – Siemens AG.
- 72.OPC Foundation. OPC UA Specifications [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://opcfoundation.org>. – (дата звернення: 06 травня 2025 р.)
- 73.Fronius International GmbH. Welding Automation: Positioners & Controllers [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.fronius.com>. – (дата звернення: 06 травня 2025 р.)
- 74.National Instruments. PID Theory Explained [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ni.com>. – (дата звернення: 06 травня 2025 р.)
- 75.ISO/TS 15066:2016 – Robots and robotic devices – Collaborative robots.
- 76.Kitagawa Europe. Positioning Tables: Technical Data [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.kitagawaeurope.com>. – (дата звернення: 06 травня 2025 р.)
- 77.KUKA AG. Industrial intelligence 4.0 – beyond automation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.kuka.com>. – (дата звернення: 06 травня 2025 р.)
- 78.HiveMQ. Unlock the value of your data with MQTT [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.hivemq.com>. – (дата звернення: 07 травня 2025р.).
- 79.OPC Programmers' Connection. OLE for Process Control [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.opcconnect.com>. – (дата звернення: 07 травня 2025 р.).

80. Малахов В. Н. Теоретична механіка. – К.: Вища школа, 2005. – 472 с.
81. Gillespie T. Fundamentals of Vehicle Dynamics. – Warrendale: SAE International, 1992. – 512 p.
82. Kroes M., Wild T. Aircraft Powerplants. – New York: McGraw-Hill, 2013. – 800 p.
83. Sciavicco L., Siciliano B. Modelling and Control of Robot Manipulators. – London: Springer, 2000. – 392 p.
84. Король В. М. Основи проектування і розрахунку технологічної оснастки. – К.: КНУТД, 2020. – 214 с.
85. Shigley J. E., Mischke C. R. Mechanical Engineering Design. – New York: McGraw-Hill, 2015. – 1088 p.
86. Norton R. L. Design of Machinery: An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines. – New York: McGraw-Hill, 2020. – 864 p.
87. Воробйов М. Ф. Динаміка машин. – Харків: ХНАДУ, 2016. – 389 с.
88. Dassanayake K.M.M., Tsutsumi M., Sato R., Ito H. Motion Characteristics of High Performance Rotary Tables for CNC Machines // Proceedings of the ASME 2008 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE2008). – October 31 – November 6, 2008. – Boston, Massachusetts, USA. – Paper No. IMECE2008-66108. – DOI: <https://doi.org/10.1115/IMECE2008-66108>. – Available at: <https://www.researchgate.net/publication/267590547> – (дата звернення: 07 травня 2025 р.)
89. Dolgui, A., & Pashkevich, A. (2004). Cluster-level operations planning in arc-welding robot cell with positioning table. *Research report 2004-500-002, Division for Industrial Engineering and Computer Sciences (G2I), École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, France.* 31 p. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/237244138> – (дата звернення: 07 травня 2025 р.).

ДОДАТОК А

Приклад слайдів презентації до захисту дисертації



КПІ ім. Ігоря Сікорського, НН ММІ,
кафедра конструювання машин

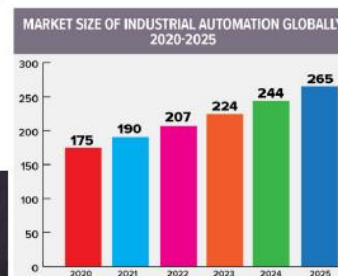
Магістерська дисертація на тему: Створення та дослідження обертально-поворотного пристрою на модульному принципі

Студент групи МК-31мн
Підгорний Назар Андрійович
Науковий керівник:
Кузнецов Юрій Миколайович

Київ 2025

Актуальність теми дослідження

- ◇ Понад 30% дефектів зварювання – через погане позиціонування деталей
- ◇ Світовий ринок зварювального обладнання у 2024 – понад \$20,3 млрд
- ◇ Модульний принцип дозволяє зменшити простоту до 60%
- ◇ Зниження травматизму до 35% завдяки автоматизації повороту
- ◇ Підвищення точності, швидкості та ефективності зварювальних операцій



ДОДАТОК Б

Технічне завдання на наукову роботу

Затверджую:

Директор

«28» листопада 2025р.

М. П.



Акт приймання робіт науково-дослідній роботі

«Створення і дослідження оберально – поворотних пристроїв на модульному принципі»

В результаті виконання робіт з створення та дослідження оберально – поворотних пристроїв, виконавець надав:

- Пакет документів з аналізом існуючих оберально – поворотних пристроїв;
- Пакет файлів з результатами морфологічного аналізу по темі оберально – поворотних пристроїв;

Рекомендації щодо конструкцій та методики проектування оберально – поворотних пристроїв з використанням модульного

Результати роботи планується реалізувати у виробництві.

Від Замовника

Заступник директора
ПрАТ «НВО «ПРАКТИКА»



Кривий В. І.

Від Виконавця

Завідувач кафедру КМ

Данильченко Ю. М.

Науковий керівник

Кузнєцов Ю.М.

Студент групи МК – 31мн

Підгорний Н. А.

Затверджую:

Директор

"03" вересня 2024 р.

М. П.



Технічне завдання

на науково-дослідну роботу

«Створення і дослідження обертально – поворотних пристроїв на модульному принципі»

Замовник:

Заступник директора

ПрАТ «НВО «ПРАКТИКА»



Кривий В. І.



Виконавець:

Завідувач кафедру КМ



Данильченко Ю. М.

Науковий керівник



Кузнецов Ю. М.

Студент групи МК – 31мн



Підгорний Н.А.

Київ 2025

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Повна назва розробки та її умовне позначення

Створення і дослідження оберально – поворотного пристрою на модульному принципі.

1.2 Назви підприємств розробника та замовника системи та їх реквізити

Замовник:

Підприємство ПрАТ «НВО «Практика»

Виконавець:

Кафедра конструювання машин НН
ММІ КПІ ім. Ігоря Сікорського

1.3 Порядок оформлення та пред'явлення замовникові результатів робіт

По закінченню роботи подається:

- Пакет документів з аналізом існуючих оберально – поворотних пристроїв.
- Пакет файлів з використанням морфологічного аналізу по темі оберально – поворотних пристроїв.
- 6.3 Рекомендації щодо конструкцій та методики проектування оберально – поворотних пристроїв.

2 МЕТА ТА ВИХІДНІ ДАНІ

2.1 Мета створення розробки

Створення і дослідження оберально – поворотного пристрою з використання модульного принципу .

2.2 Вихідні дані

Дослідні потребу у використанні оберально – поворотних пристроїв на підприємствах машинобудування України. Конструкції пристроїв, що успішно використовуються.

3 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ РОБОТИ

3.1. При розробці концептів оберально – поворотних пристроїв враховувати можливість інтеграції їх у виробничі процеси підприємства.

3.2. Обробка та проектування даних відбувається в будь-якій CAD системі зручній для виконавця проекту.

4 ЕТАПИ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Етап та його зміст	Термін виконання	Результат
Аналіз модульного підходу до проектування обладнання		Перелік модулів оберально – поворотних пристроїв
Проведення патентно-інформаційних досліджень		Результати патентного пошуку об'єкту дослідження
Проведення морфологічного аналізу		Варіантиз оберально – поворотних пристроїв на модульному принципі»
Розробка концепту оберально – поворотного пристрою		Плакати та креслення
Опис системи керування		Керуючі програми
Методика дослідження динаміки оберально – поворотних пристроїв		Розрахункова схема і динамічні моделі

5 ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

5.1 Розробка концепту оберально – поворотного пристрою для зварювання корпусних деталей.

5.2 Варіанти оберально – поворотних пристроїв на модульному принципі»

6 МАТЕРІАЛИ, ЩО НАДАЮТЬСЯ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ

6.1 Пакет документів з аналізом існуючих оберально – поворотних пристроїв.

6.2 Пакет файлів з результатами морфологічного аналізу по темі оберально – поворотних пристроїв.

6.3 Рекомендації щодо конструкцій та проектування оберально – поворотних пристроїв з використанням модульного пристрою.

7 ПОРЯДОК РОЗГЛЯДУ ТА ПРИЙМАННЯ РОБОТИ

7.1 Результати роботи передаються по акту приймання робіт.

ДОДАТОК В

Динамічні характеристики обертально-поворотного пристрою

№	Характеристика	Позн.	Од. вим.	Формула	Розшифрування
1	Маса вантажу	m	кг·м ²	-	—
2	Момент інерції (диск)	J	кг·м ²	$\frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2$	m – маса, r – радіус
3	Момент інерції (платформа)	J	кг·м ²	$\frac{1}{12} \cdot m \cdot (l^2 + b^2)$	m – маса, l – довжина, b – ширина
4	Момент інерції (зміщення)	J_p	Н	$J_c + m \cdot d^2$	J_c – інерція через центр мас, d – відстань
5	Відцентрова сила	F_c	Н	$m \cdot \omega^2 \cdot r$	ω – кутова швидкість, r – радіус
6	Інерційна сила	F_i	Н	$m \cdot \alpha \cdot r$	α – кутове прискорення, r – радіус
7	Сила тертя	F_f	Н·м	$\mu \cdot m \cdot g$	μ – коефіцієнт тертя, g – сила тяжіння, 9,81 м/с ²
8	Крутний момент	M	Н·м	$J \cdot \alpha$	J – інерція, α – прискорення
9	Сумарний крутний момент	$M_{\text{сум}}$	Вт	$J \cdot \alpha + \mu \cdot m \cdot g \cdot r$	—
10	Потужність	P	Дж	$M \cdot \omega$	M – момент, ω – швидкість
11	Кінетична енергія	E_k	—	$\frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$	J – інерція, ω – швидкість
12	ККД черв'ячної передачі	η	Вт	$\frac{\tan \gamma}{(\tan \gamma + \mu)}$	γ – кут підйому, μ – тертя
13	Потужність з урахуванням ККД	P_f	Гц	$\frac{P}{\eta}$	P – потужність, η – ККД
14	Власна частота	f_0	—	$\frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}$	k – жорсткість, m – маса
15	Коефіцієнт демпфування	ξ	—	$\frac{c}{2 \cdot \sqrt{m \cdot k}}$	c – демпфування, m – маса, k – жорсткість

ДОДАТОК Г

Список публікацій

Підгорного Назара Андрійовича

1. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ 3D-ПРИНТЕРІВ /Підгорний Н.А., науки в Україні: сучасні тенденції розвитку: Матеріали Кузнєцов Ю.М. //Технічні ІІІ Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції м. Ізмаїл-Київ, 18–19.11.2021 р. – С.73-75.
2. 1186. Столярчук Д. П.,_Підгорний Н. А.,_Кузнєцов Ю.М. МОБІЛЬНІ УСТАНОВКИ ДЛЯ ГРУП ШВИДКОГО РЕАГУВАННЯ ППО // ІІ Міжнародна науково-практична конференція здобувачів вищої освіти, викладачів та науковців «СУЧАСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ: ТРАНСПОРТНА ІНФРАСТРУКТУРА ТА ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ», 29-30 листопада 2023р.
3. Кузнєцов Ю.М., Підгорний Н.А. УНІВЕРСАЛЬНИЙ ЗВАРЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ //XX міжнародний форум «Молодь і Індустрія 4.0 в ХХІ столітті», 4-5.04.2024 р., Харків
4. Кузнєцов Ю.М., Підгорний Н.А., Столярчук Д. П. РОБОТИЗАЦІЯ ТА ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ В ІНДУСТРІЇ 4.0 //International Youth Scientific and Technical Conference "YOUNG SCIENCE – ROBOTICS AND NANO-TECHNOLOGYOF MODERN MECHANICAL ENGINEERING" April 10-12, 2024 using Internet platforms. Kramatorsk - Vinnytsia – Ternopil, Ukraine c/ 188-192 ISSN 978-617-7889-69-87
5. Підгорний Н.А., Солнцев О.В., Кузнєцов Ю.М. ПАРАМЕТРИЗАЦІЯ МОДЕЛЕЙ РУХУ СИСТЕМ ТВЕРДИХ ТІЛ СКЛАДНИХ МЕХАНІЗМІВ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ СТРУКТУРОЮ ДЛЯ БАГАТОФАКТОРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ЇХ ТОЧНОСТІ ПОЗИЦІОНУВАННЯ //Науково-практична конф. «Інновації молоді в машинобудуванні» (ІММ-2024)
6. Н. А. Підгорний, О. В. Солнцев Ю. М. Кузнєцов ПАРАМЕТРИЗАЦІЯ МОДЕЛЕЙ РУХУ СИСТЕМ ТВЕРДИХ ТІЛ СКЛАДНИХ МЕХАНІЗМІВ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ СТРУКТУРОЮ ДЛЯ БАГАТОФАКТОНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ЇХ ТОЧНОСТІ ПОЗИЦІОНУВАННЯ //Науково-практична конф. «Інновації молоді в машинобудуванні» (ІММ-2024)
7. Підгорний Н.А., Кузнєцов Ю.М., ВИКОРИСТАННЯ АГРЕГАТНО-МОДУЛЬНОГО ПРИНЦИПУ В РІЗНИХ ГАЛУЗЯХ // Всеукраїнська науково-практична on-line конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених „Перспективи розвитку машинобудівної інженерії та транспортних технологій” (присвячена Дню науки), «Житомирська політехніка» 14.05.2025р.м.Житомир

8. Yuriy Kuznetsov, Nazar Pidgorniy Dynamic analusis and control of modular universal rotary welding device // Journal of the Technical University of Gabrovo, vol., 70, 2025, p.p..1-4.
9. Кузнєцов Ю. М. , Підгорний Н.А. ДИНАМІКА ОБЕРТАЛЬНО-ПОВОРОТНИХ ПРИСТРОЇВ : матеріали XVI Міжнар. наук.-техн. конф. молодих вчених та студентів «Інновації молоді в машинобудуванні», м. Київ, 12-16 трав. 2025 р. / КПІ імені Ігоря Сікорського, Київ, 2025. <file:///E:/FireFox/33245-81995-1-PB-1.pdf>.

Приклад слайдів презентації до захисту магістерської дисертації



КПІ ім. Ігоря Сікорського, НН ММІ,
кафедра конструювання машин

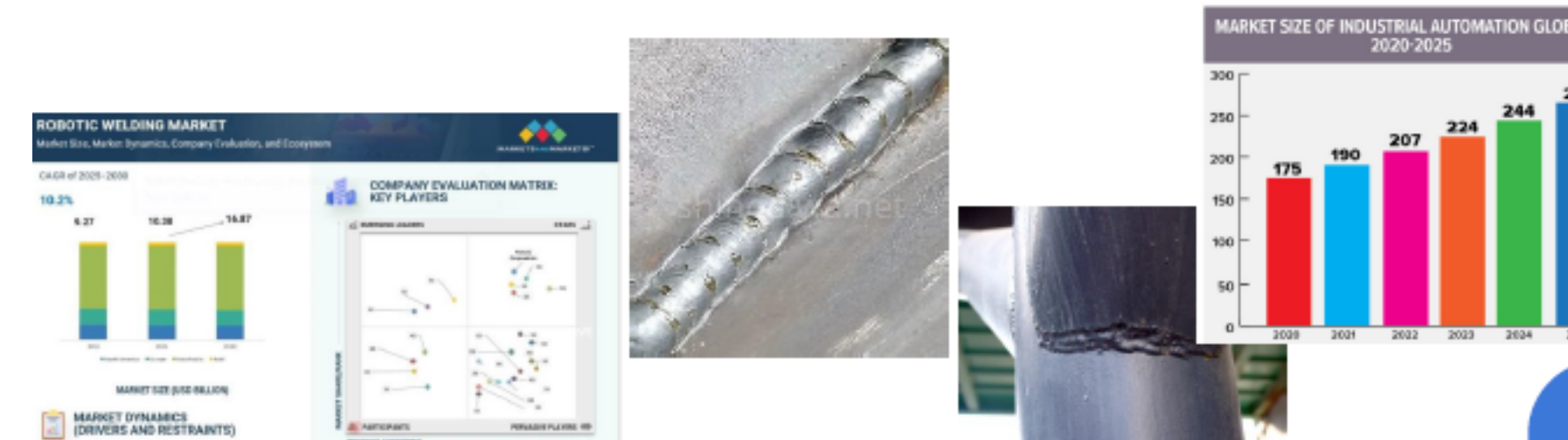
Магістерська дисертація на тему: Створення та дослідження обертально-поворотного пристрою на модульному принципі

Студент групи МК-31мн
Підгорний Назар Андрійович
Науковий керівник:
Кузнецов Юрій Миколайович

Київ 2025

Актуальність теми дослідження

- Понад 30% дефектів зварювання – через погане позиціонування деталей
- Світовий ринок зварювального обладнання у 2024 – понад \$20,3 млрд
- Модульний принцип дозволяє зменшити простір до 60%
- Зниження травматизму до 35% завдяки автоматизації повороту
- Підвищення точності, швидкості та ефективності зварювальних операцій



Мета та завдання дослідження

Метою дисертації було визначено створення обертально-поворотного пристрою з модульною архітектурою

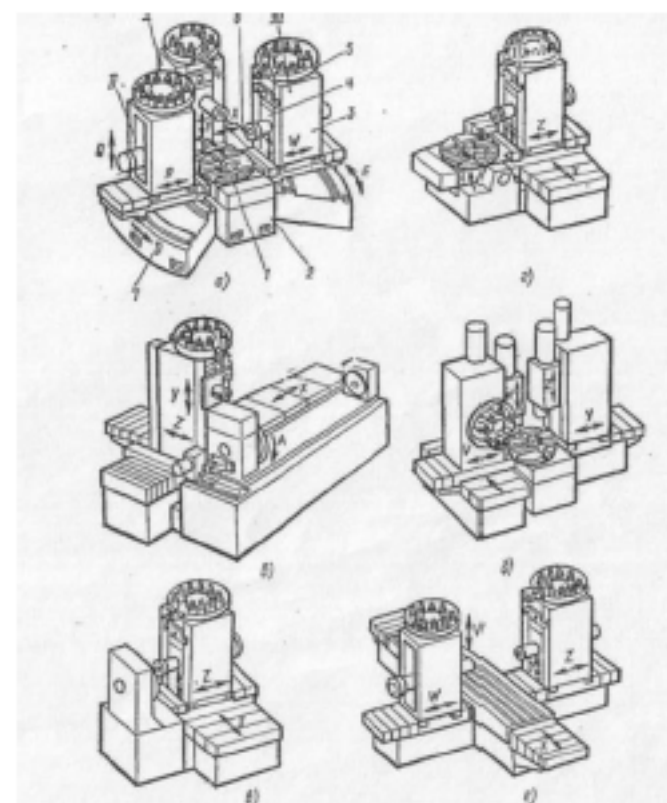


Завдання:

- Проаналізувати існуючі ОПП
- Визначити вимоги до сучасного пристрою
- Провести патентно-інформаційне дослідження
- Побудувати морфологічну таблицю
- Розробити 3D-конструкцію
- Провести функціонально-вартісний аналіз
- Сформулювати рекомендації щодо застосування

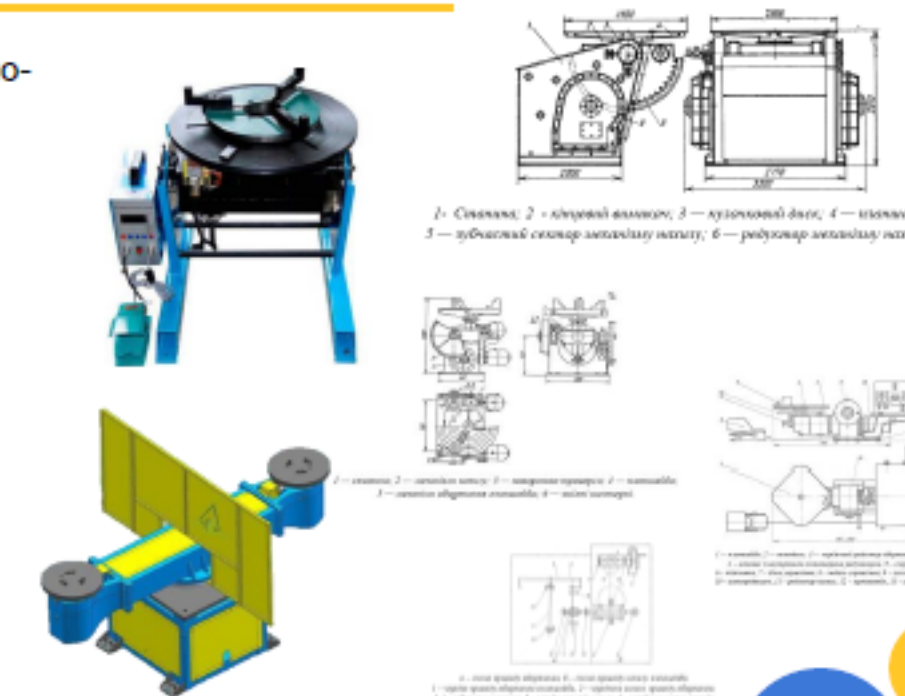
Теоретичні основи та аналіз предметної області

- Агрегатно-модульний принцип — основа гнучкого виробництва
- Системний підхід до побудови обладнання
- Визначено 4 базових функціональних елементи пристрою
- Сформульовано вимоги до обертально-поворотного пристрою:
 - надійність
 - ремонтпридатність
 - уніфікованість
 - сумісність з ПЛК



Патентно-інформаційні дослідження

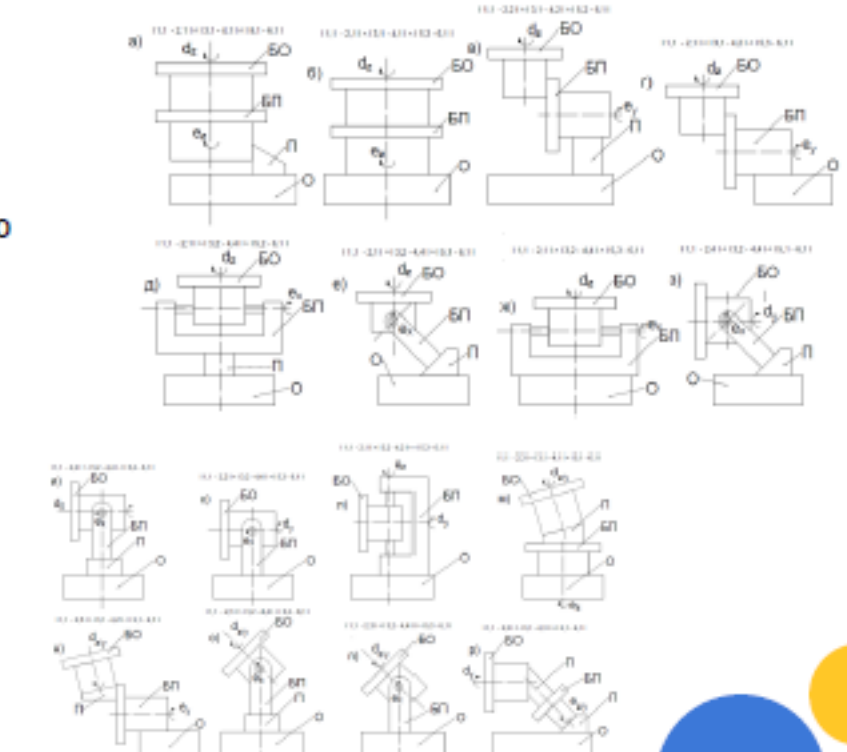
- Аналіз 20+ патентів за темою обертально-поворотних пристроїв
- Виявлено 3 основні типи конструкцій:
 - з фіксованим кутом
 - з ручним регулюванням
 - з автоматичним керуванням
- Визначено недоліки існуючих рішень:
 - обмежена гнучкість
 - складність обслуговування
 - відсутність модульності



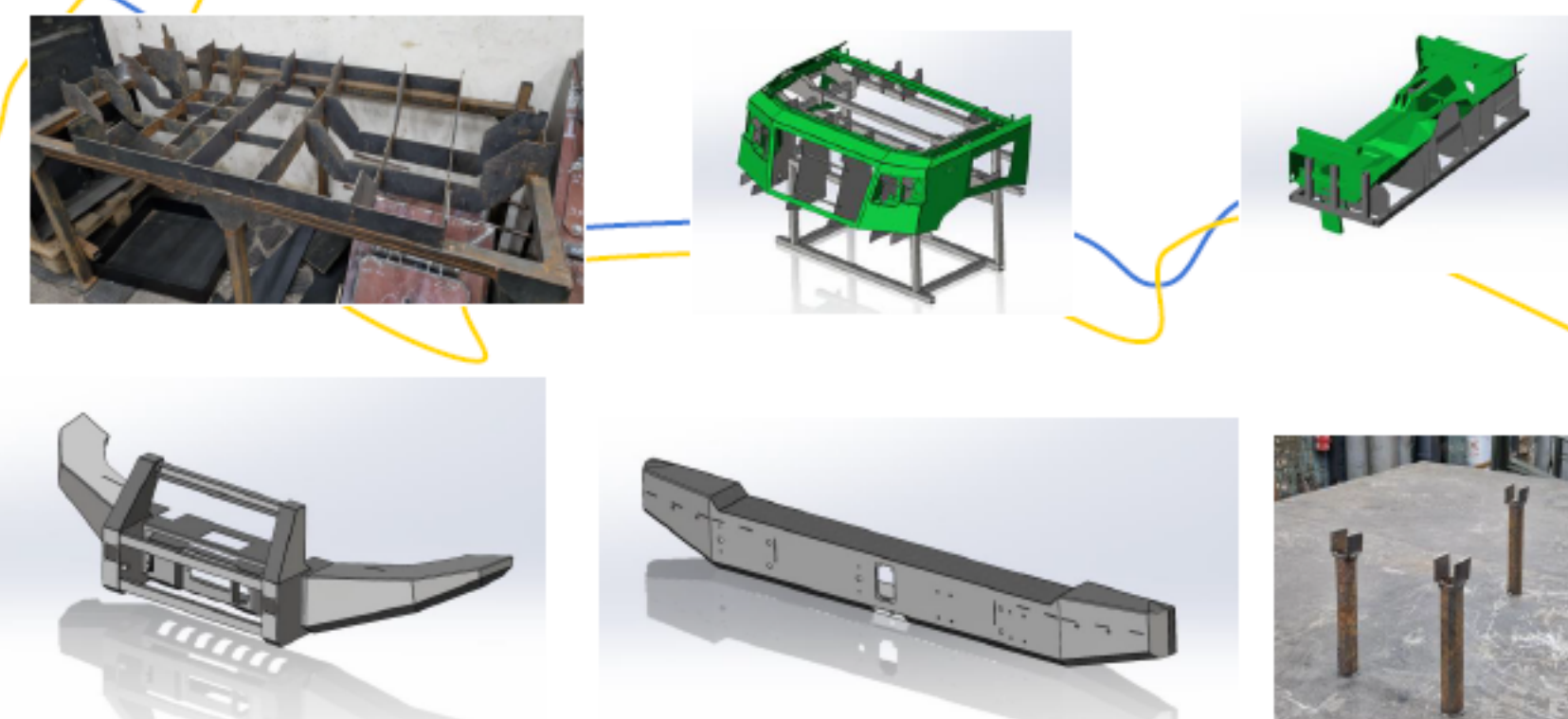
Морфологічний аналіз конструкцій

- Визначення основних функцій пристрою
- Ідентифікація можливих реалізацій кожної функції
- Побудова морфологічної матриці
- Оцінка та вибір оптимальних комбінацій
- Формування концептуальної моделі пристрою

Морфологічна матриця	
Функція	Вариант
1. Обертання	1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 1.10, 1.11, 1.12, 1.13, 1.14, 1.15, 1.16, 1.17, 1.18, 1.19, 1.20
2. Поворот	2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 2.11, 2.12, 2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17, 2.18, 2.19, 2.20
3. Регулювання	3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19, 3.20
4. Керування	4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20

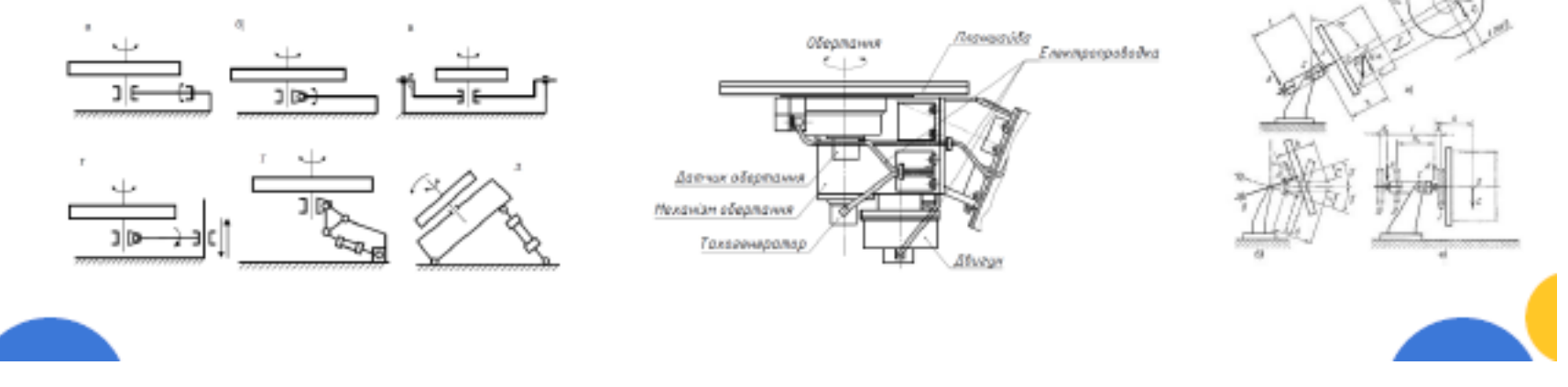


АНАЛІЗ ПОТРЕБИ СУЧАСНОГО МАШИНОБУДУВАННЯ В ОБЕРТАЛЬНО – ПОВОРОТНИХ ПРИСТРОЯХ

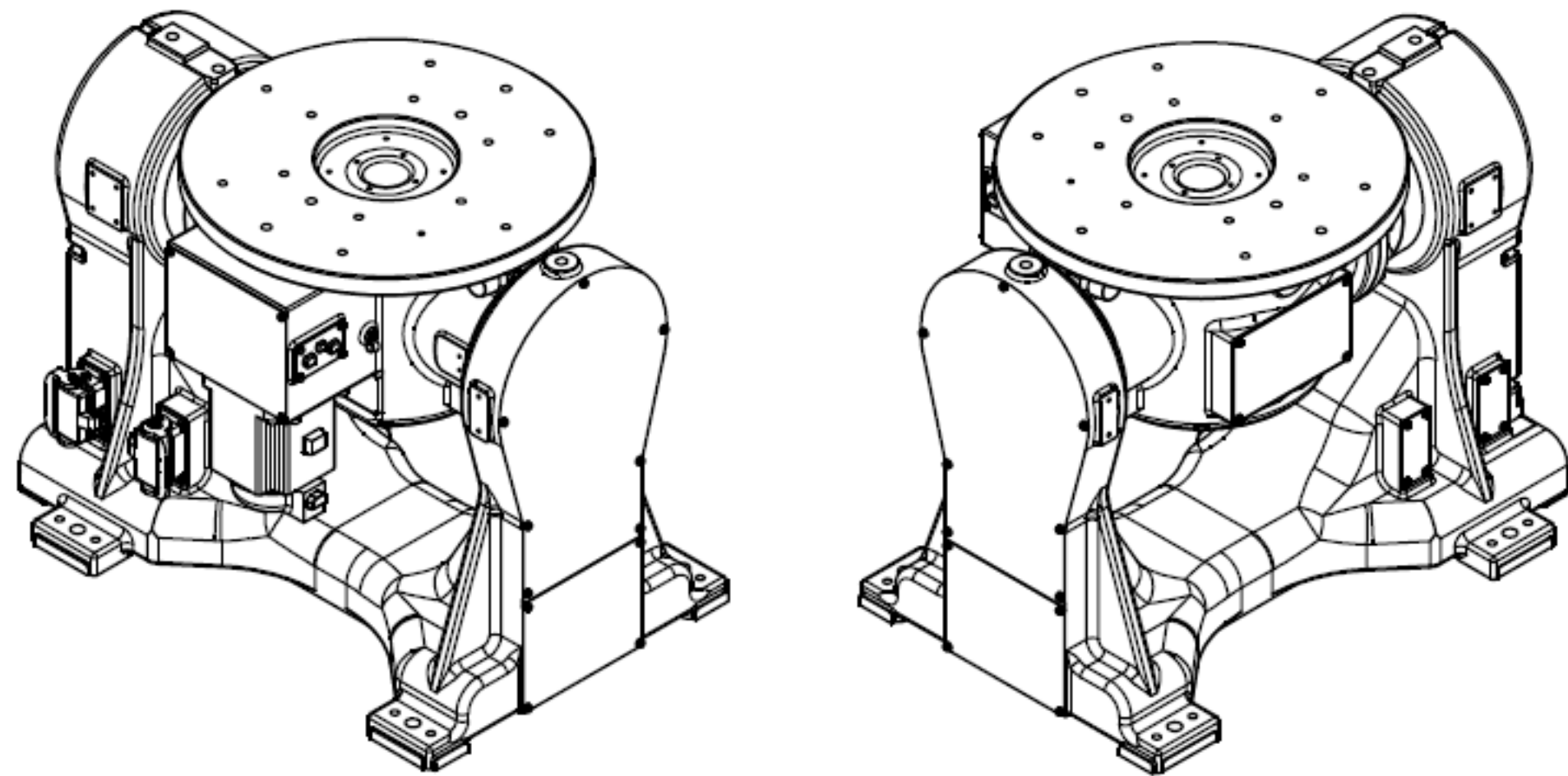


Динамічний аналіз ОПП

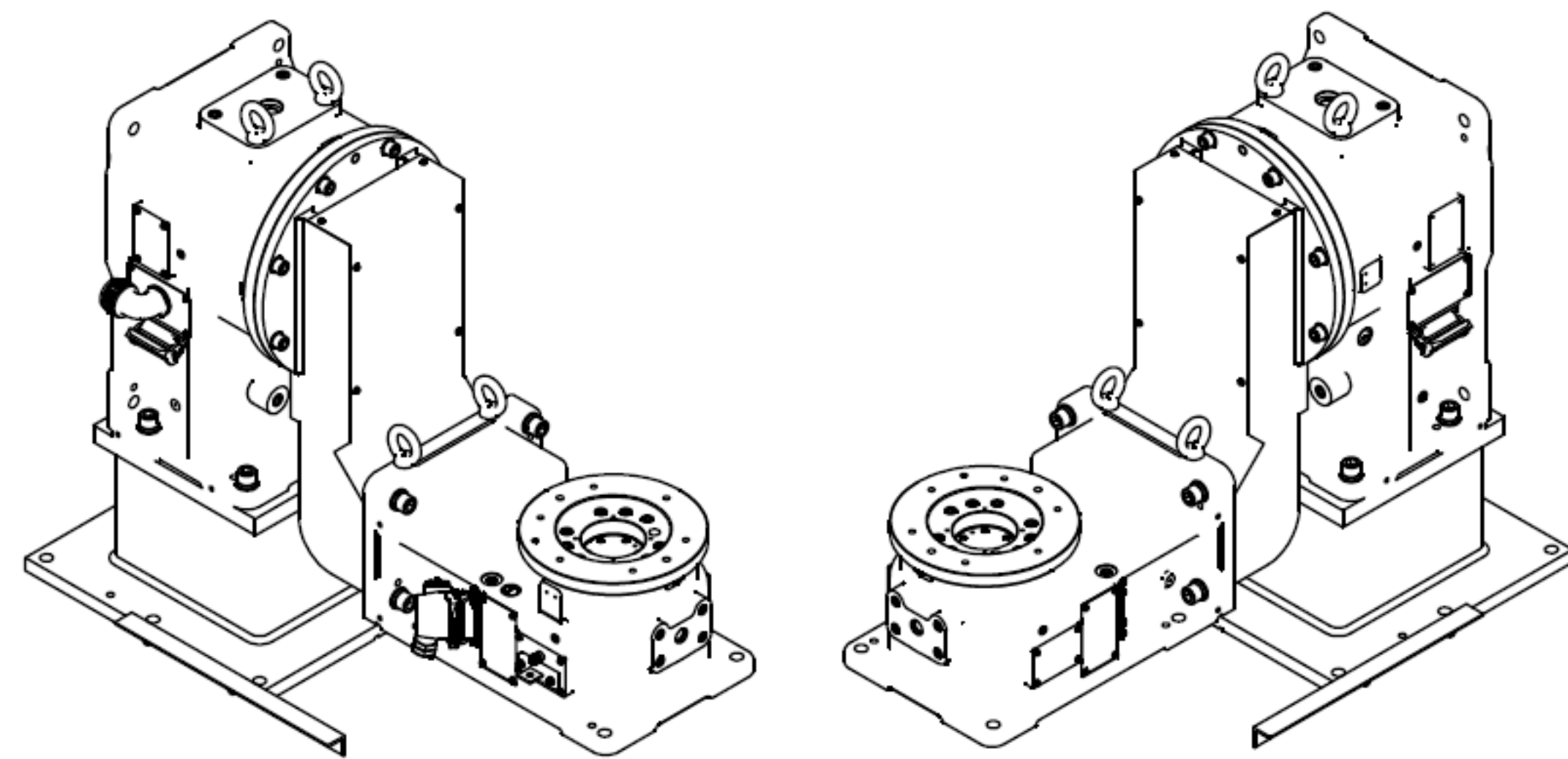
- Оцінка динамічної поведінки пристрою в процесі роботи
- Визначення потенційних джерел навантажень і вібрацій
- Врахування інерційних характеристик системи
- Обґрунтування вибору режимів обертання і гальмування
- Перспективи подальшого математичного та симуляційного аналізу



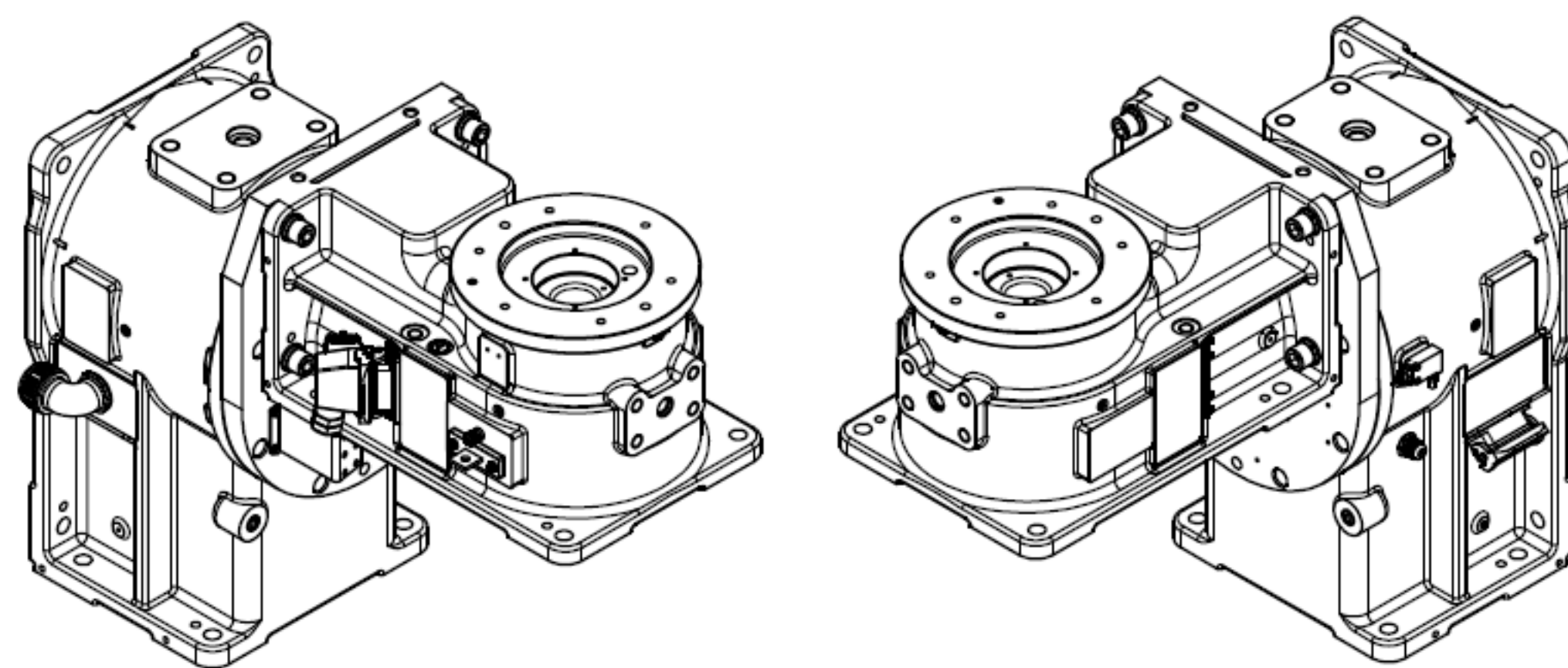
Найпоширеніші конструкції ОПП



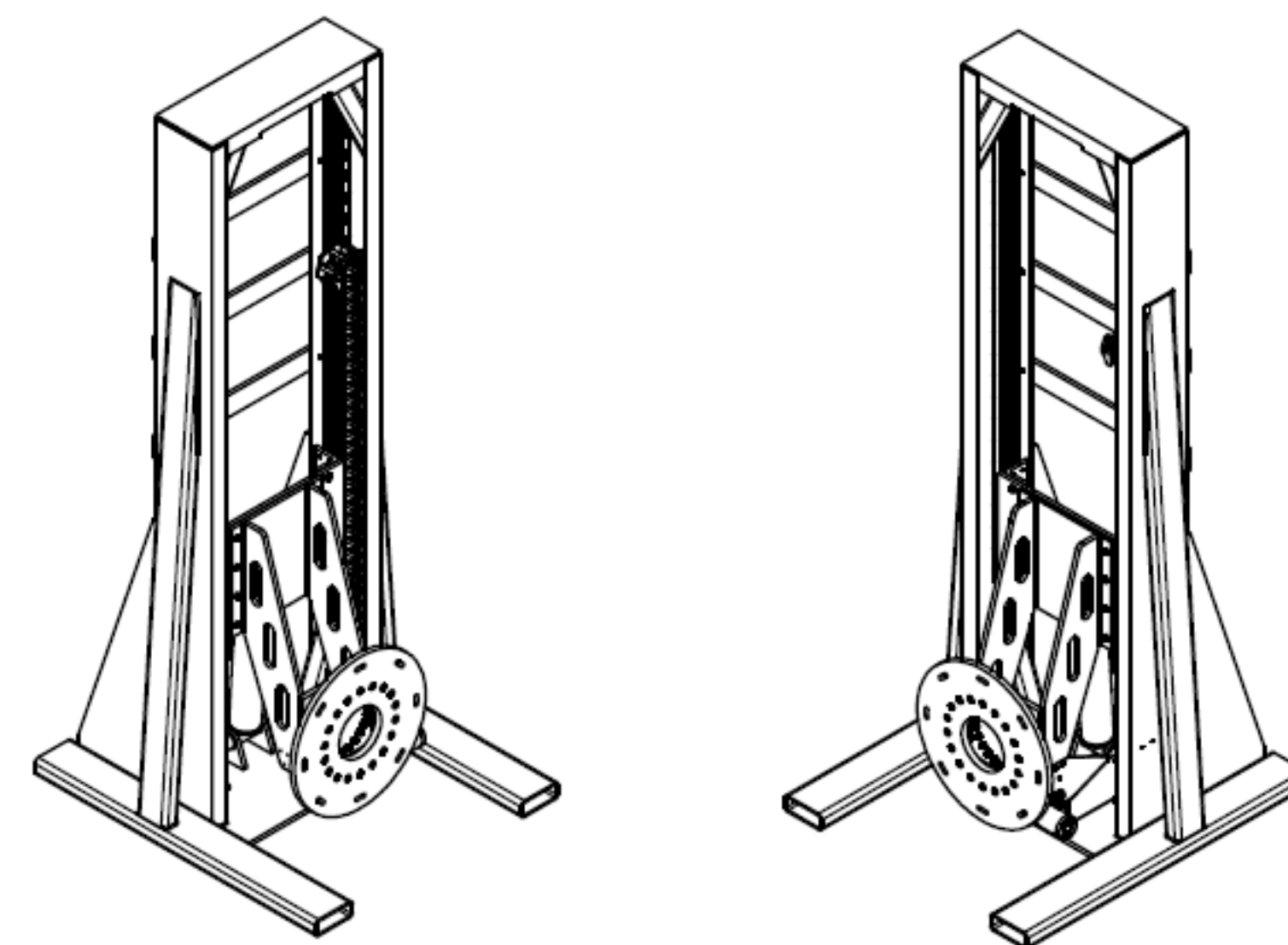
Конструкція 1



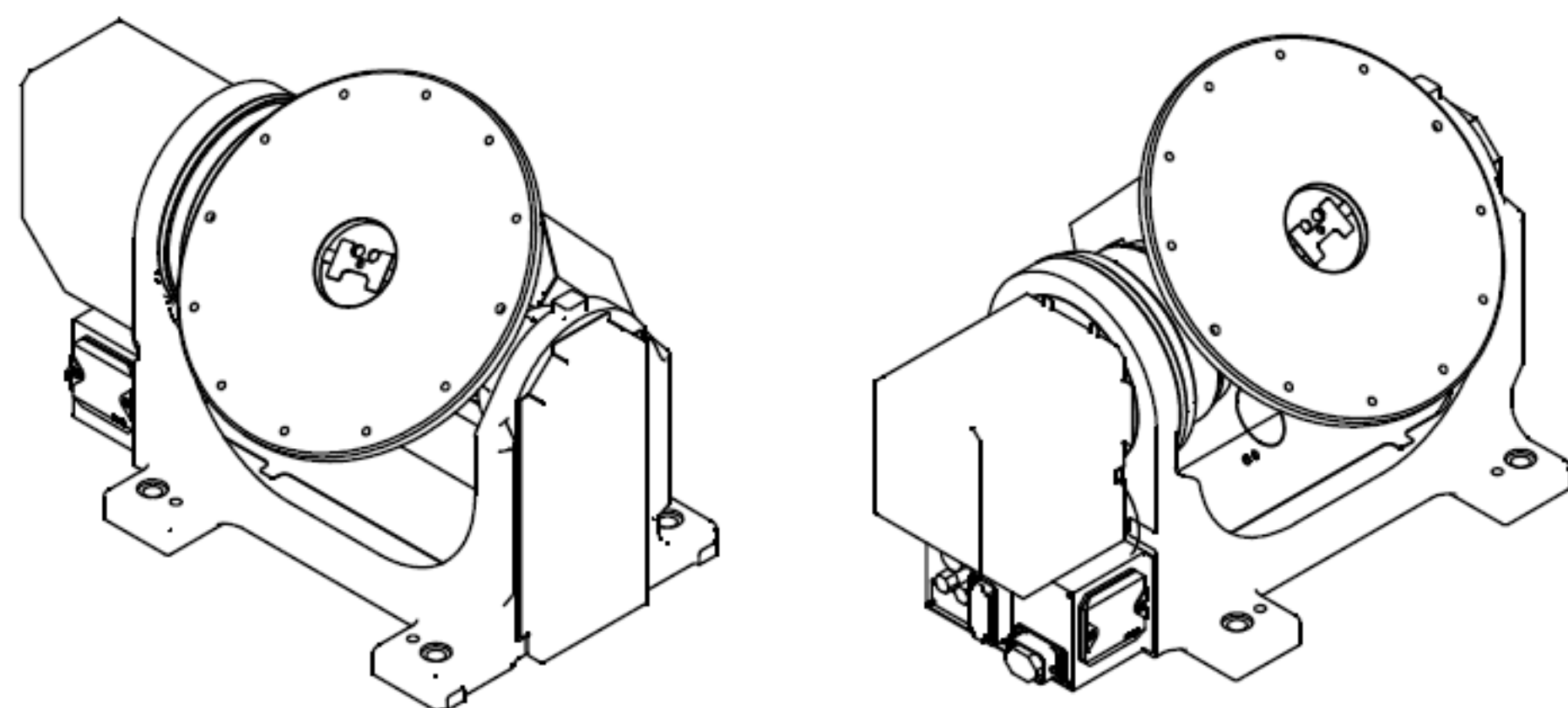
Конструкція 2



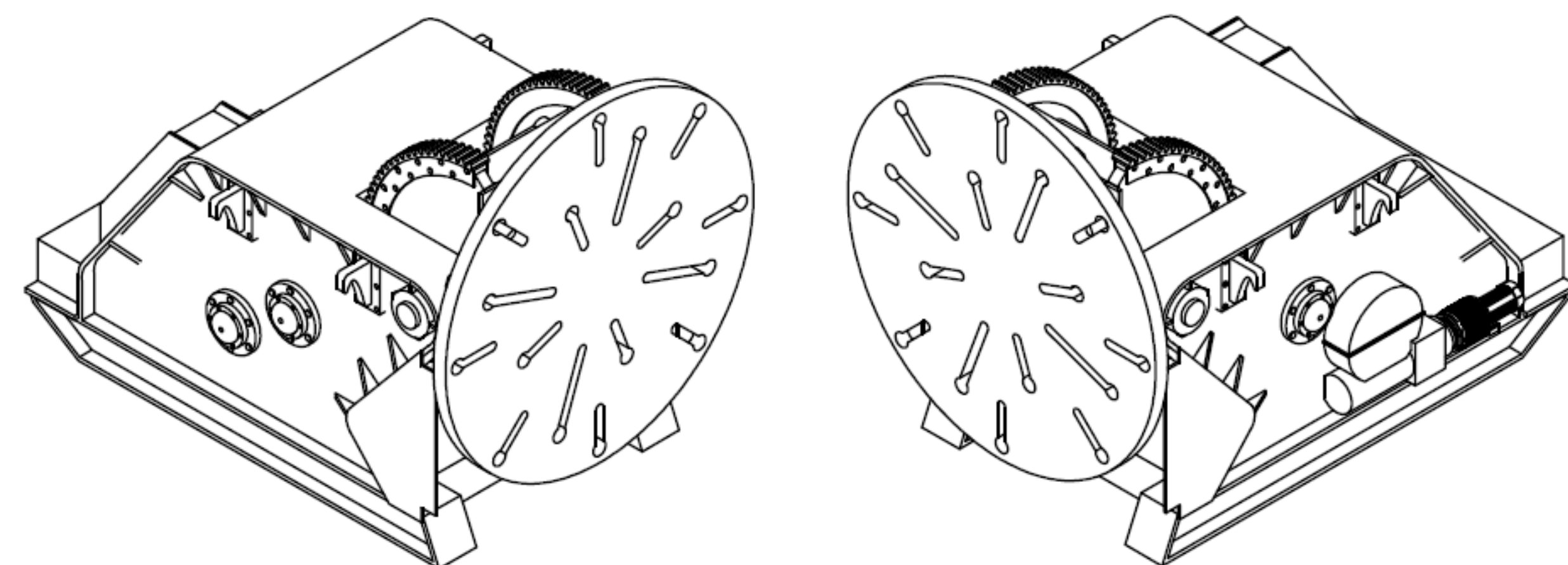
Конструкція 3



Конструкція 4



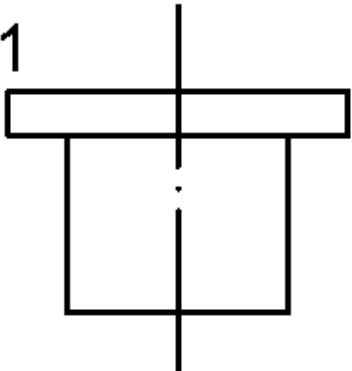
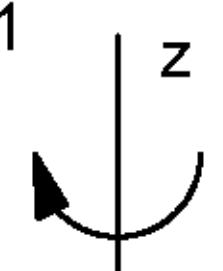
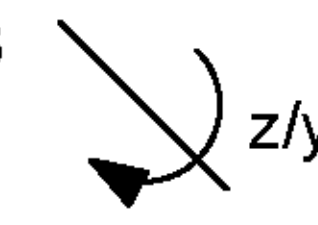
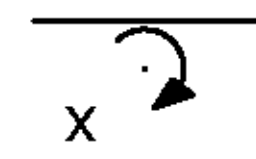
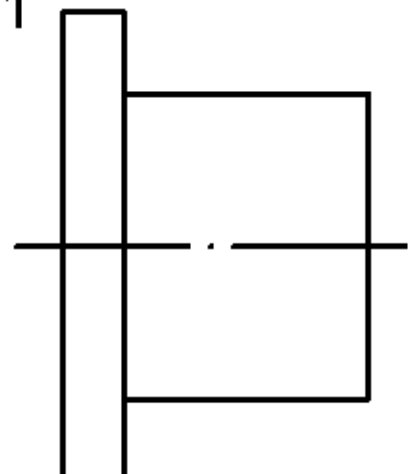
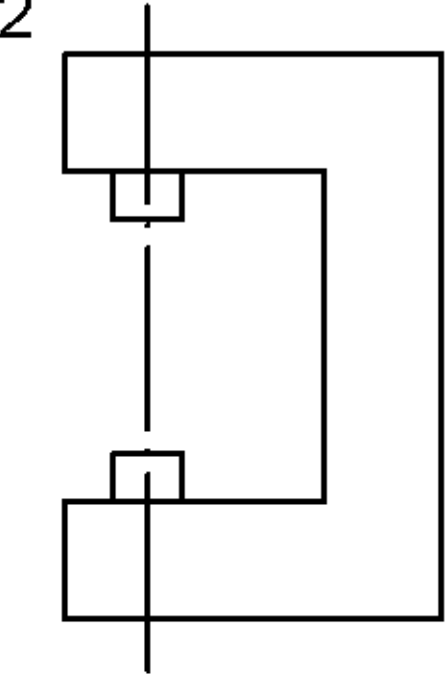
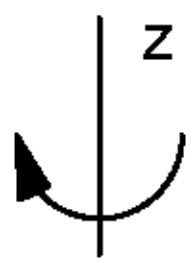
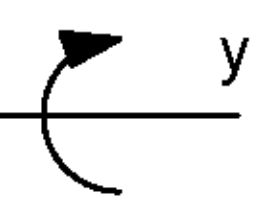
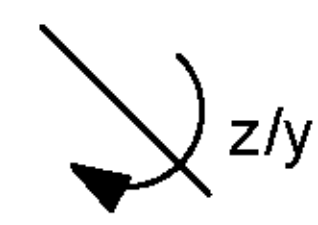
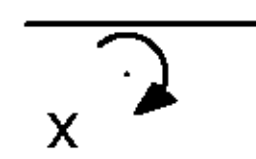
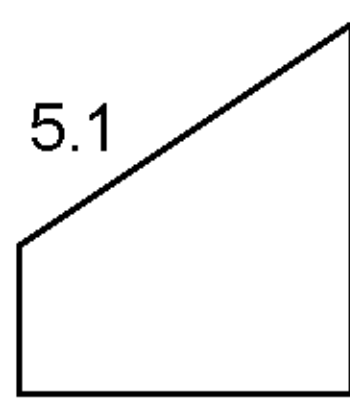
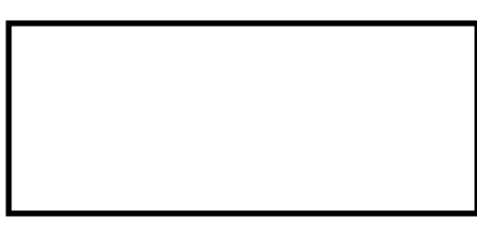
Конструкція 5



Конструкція 6

Морфологічна модель ОПП

Таблиця 1 - Морфологічна таблиця УОПЗП

Блок обертальний (БО)		Блок поворотний (БП)		Нерухомі частини (НЧ)	
1.Форма виконання	2.Рух	3. Форма виконання	4.Рух	5.Перехідник(П)	6.Основа(О)
1.1 	2.1  2.2  2.3  2.4 	3.1  3.2 	4.1  4.2  4.3  4.4 	5.1  5.2  5.3 Немає	6.1 

Морфологічна таблиця УОПЗП
Розгорнута

M _K =	1.1	2.1		4.1		5.1	6.1
		2.2		3.1 4.2		5.2	
		2.3		3.2 4.3		5.3	
		2.4		4.4			

Таблиця 2 - Морфологічні формули та координатні структурні формули компонок УОПЗП

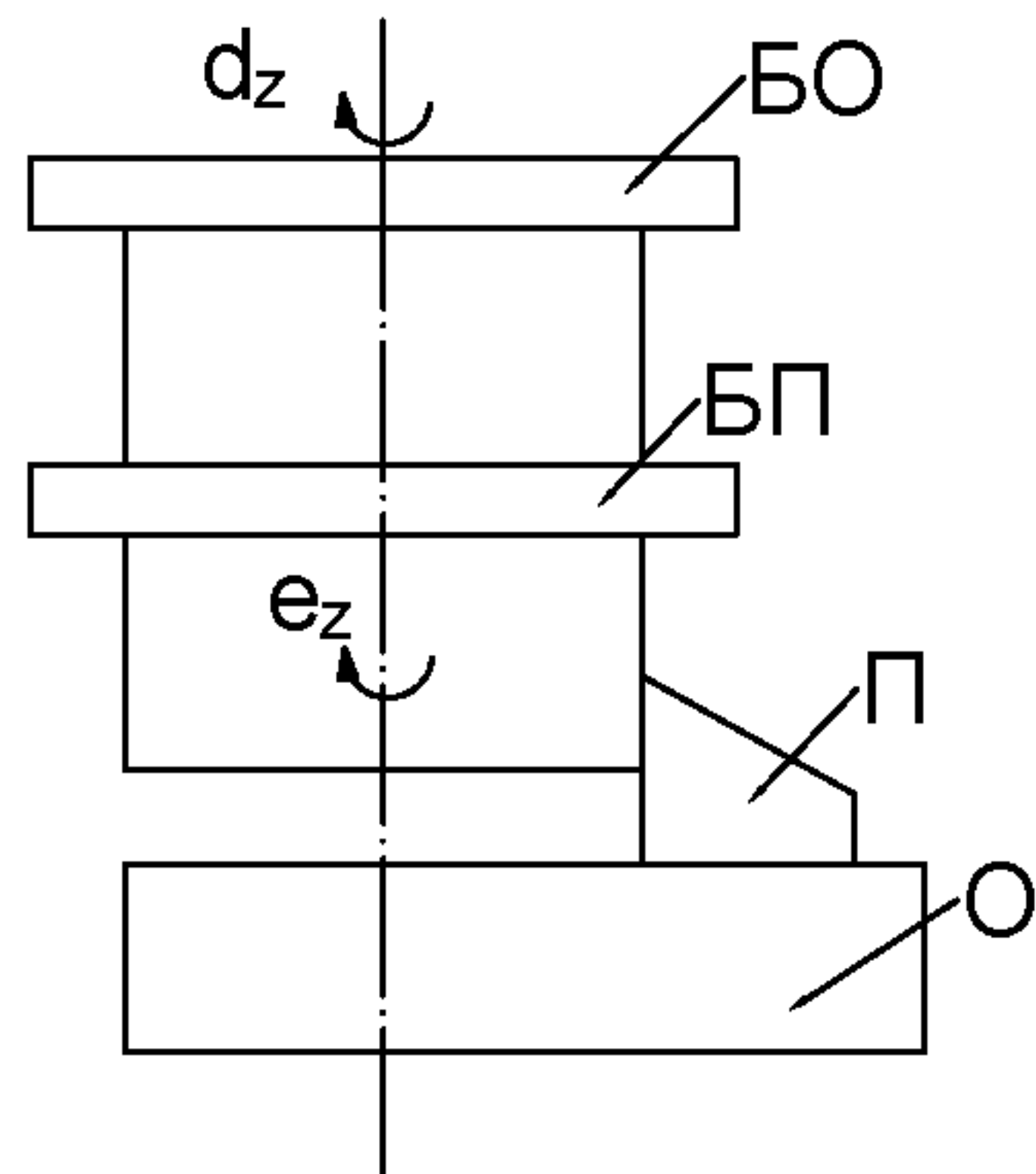
№ Варіанта	Морфологічна формула	Структурна формула
1	2	3
X ₁	1,1 - 2,1 ^ 3,1 - 4,1 ^ 5,1 - 6,1	d _z e _z O
X ₂	1,1 - 2,1 ^ 3,1 - 4,1 ^ 5,3 - 6,1	d _z e _z O
X ₃	1,1 - 2,2 ^ 3,1 - 4,2 ^ 5,2 - 6,1	d _z e _y O
X ₄	1,1 - 2,1 ^ 3,1 - 4,2 ^ 5,3 - 6,1	d _z e _y O
X ₅	1,1 - 2,1 ^ 3,2 - 4,4 ^ 5,2 - 6,1	d _z e _x O
X ₆	1,1 - 2,1 ^ 3,2 - 4,4 ^ 5,1 - 6,1	d _z e _x O
X ₇	1,1 - 2,1 ^ 3,2 - 4,4 ^ 5,3 - 6,1	d _z e _x O
X ₈	1,1 - 2,4 ^ 3,2 - 4,4 ^ 5,1 - 6,1	d _y e _x O
X ₉	1,1 - 2,2 ^ 3,2 - 4,4 ^ 5,2 - 6,1	d _y e _x O
X ₁₀	1,1 - 2,2 ^ 3,2 - 4,4 ^ 5,3 - 6,1	d _y e _x O
X ₁₁	1,1 - 2,1 ^ 3,2 - 4,2 ^ 5,3 - 6,1	d _y e _z O
X ₁₂	1,1 - 2,3 ^ 3,1 - 4,1 ^ 5,1 - 6,1	d _{z/y} e _z O
X ₁₃	1,1 - 2,3 ^ 3,1 - 4,2 ^ 5,1 - 6,1	d _{z/y} e _y O
X ₁₄	1,1 - 2,3 ^ 3,2 - 4,4 ^ 5,2 - 6,1	d _{z/y} e _x O
X ₁₅	1,1 - 2,3 ^ 3,2 - 4,4 ^ 5,3 - 6,1	d _{z/y} e _x O
X ₁₆	1,1 - 2,2 ^ 3,1 - 4,3 ^ 5,1 - 6,1	d _y e _{z/y} O

Примітка :Жирним виділені альтернативи ознак у варіантах X₂ - X₁₆, які відрізняються від X₁

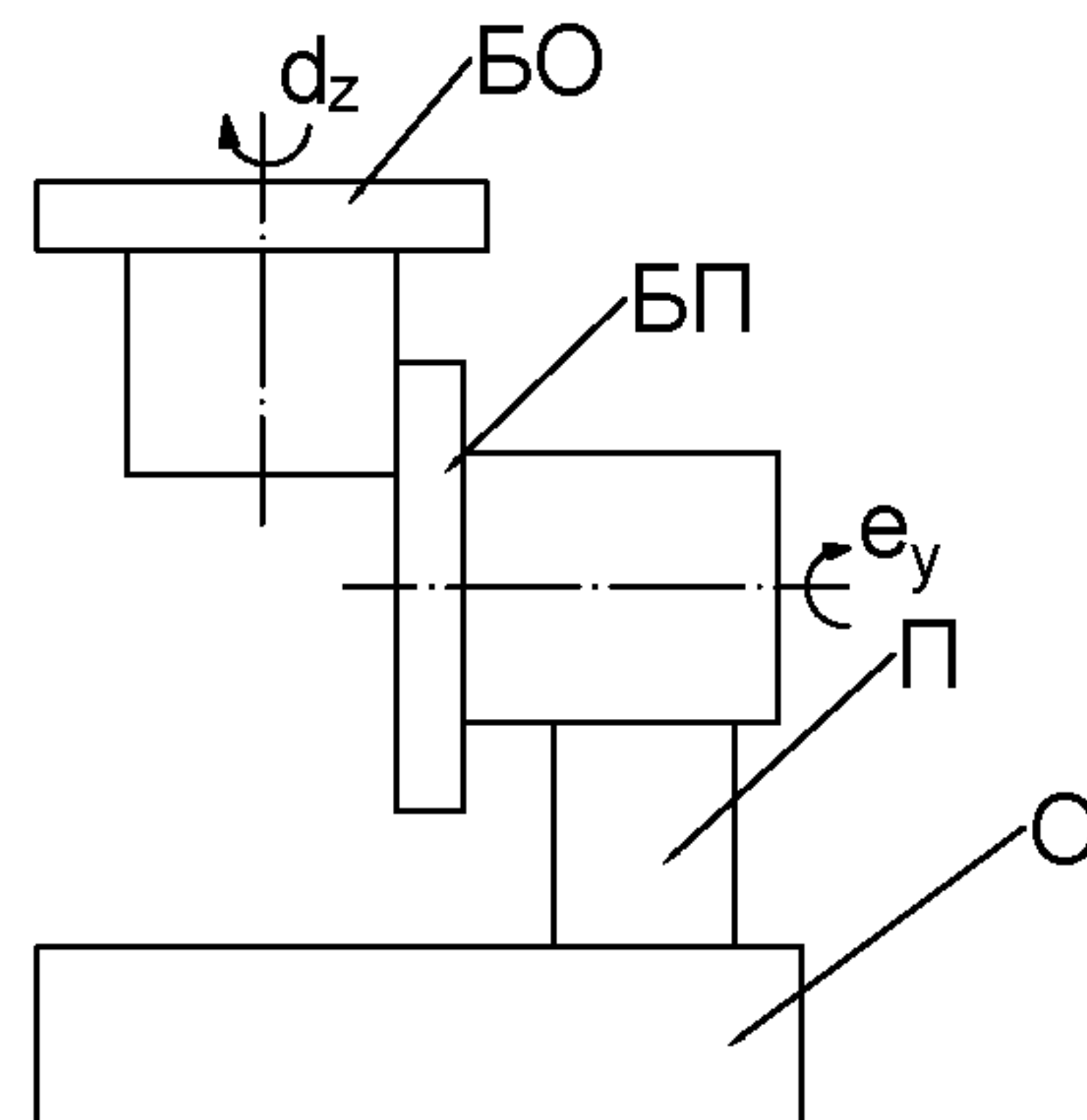
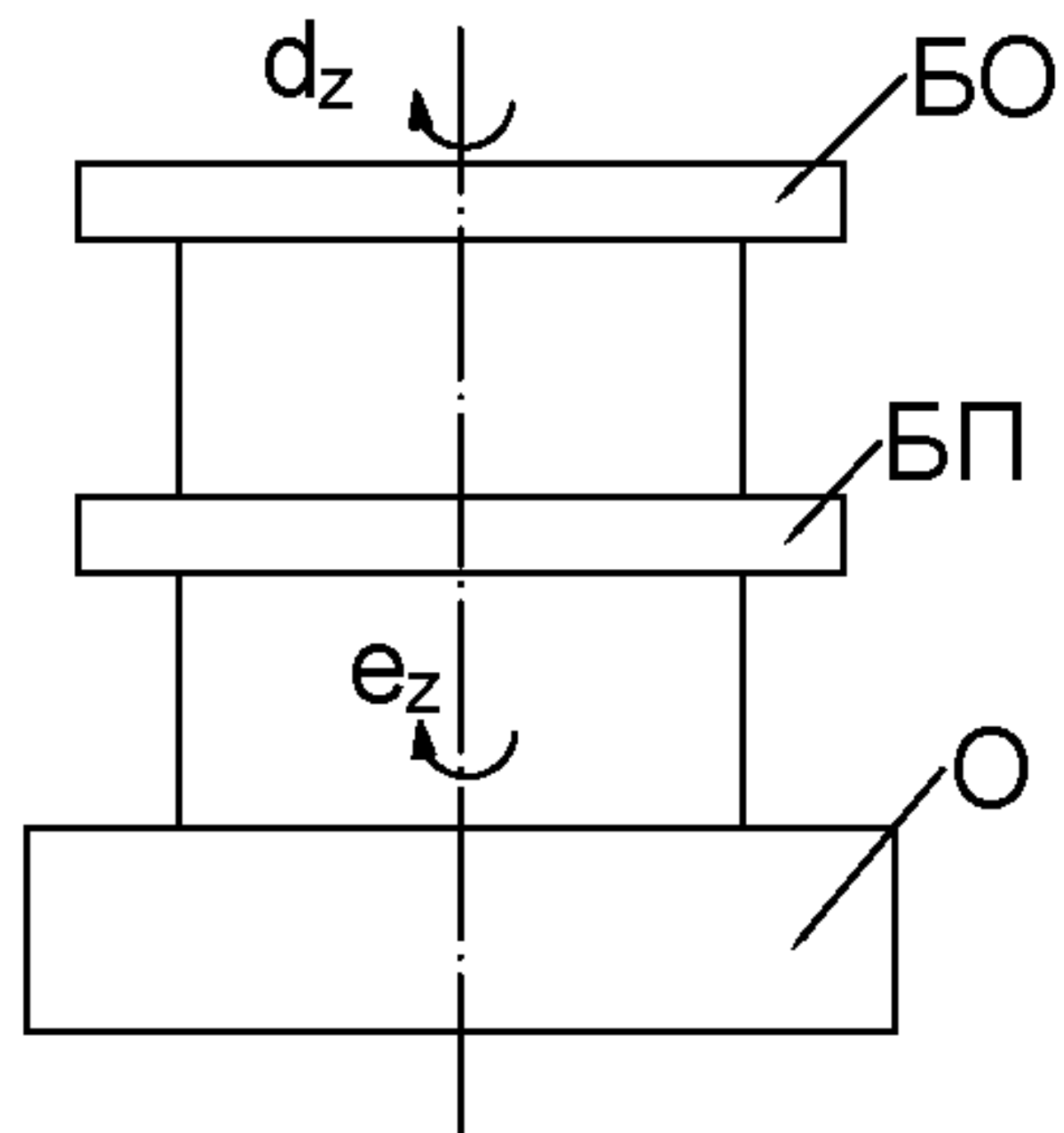
Синтезовані компоновки ОПП

11,1 - 2,2 | 3,1 - 4,2 | 5,2 - 6,1 |

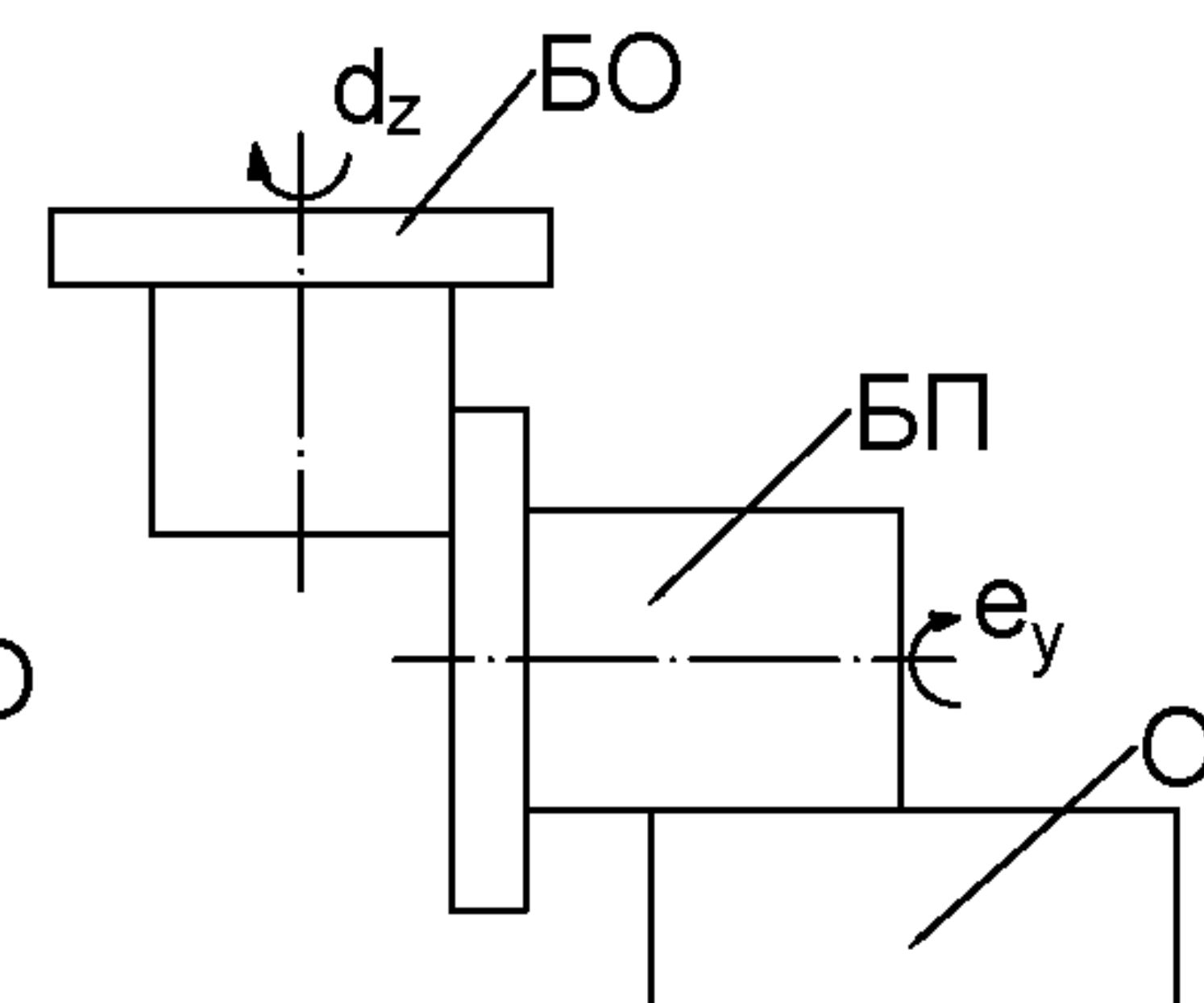
11,1 - 2,1 | 3,1 - 4,1 | 5,1 - 6,1 |



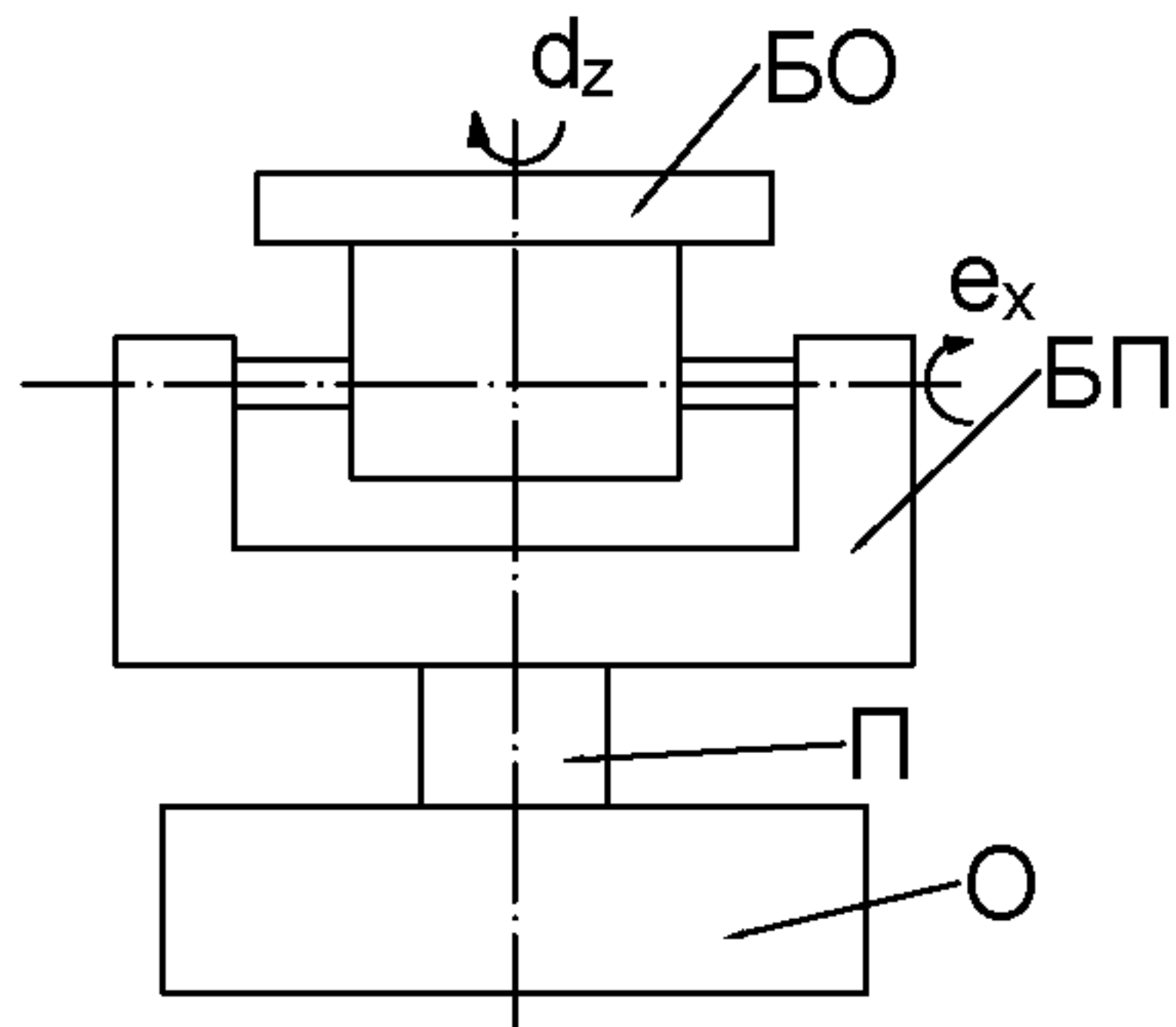
11,1 - 2,1 | 3,1 - 4,1 | 5,3 - 6,1 |



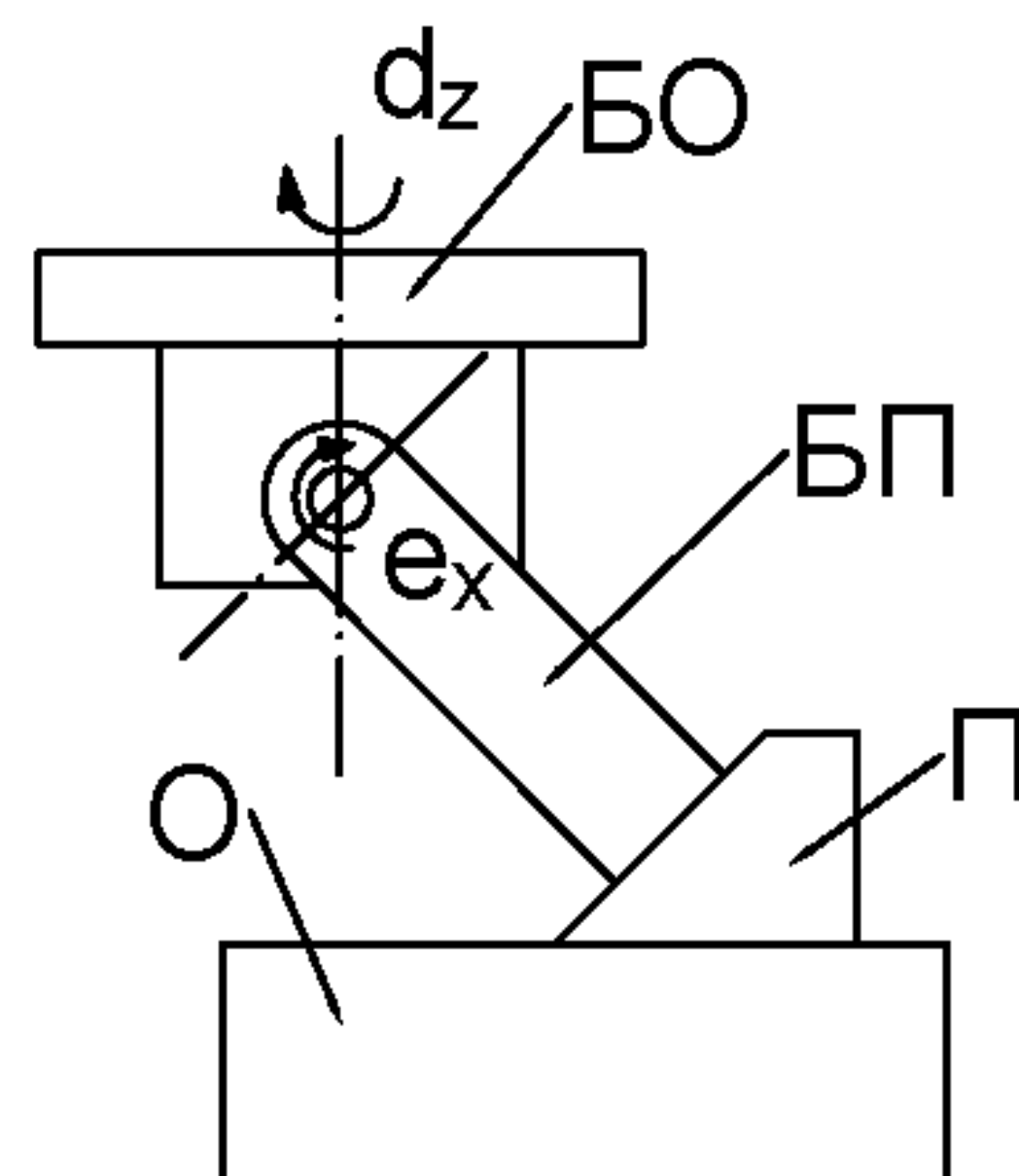
11,1 - 2,1 | 3,1 - 4,2 | 5,3 - 6,1 |



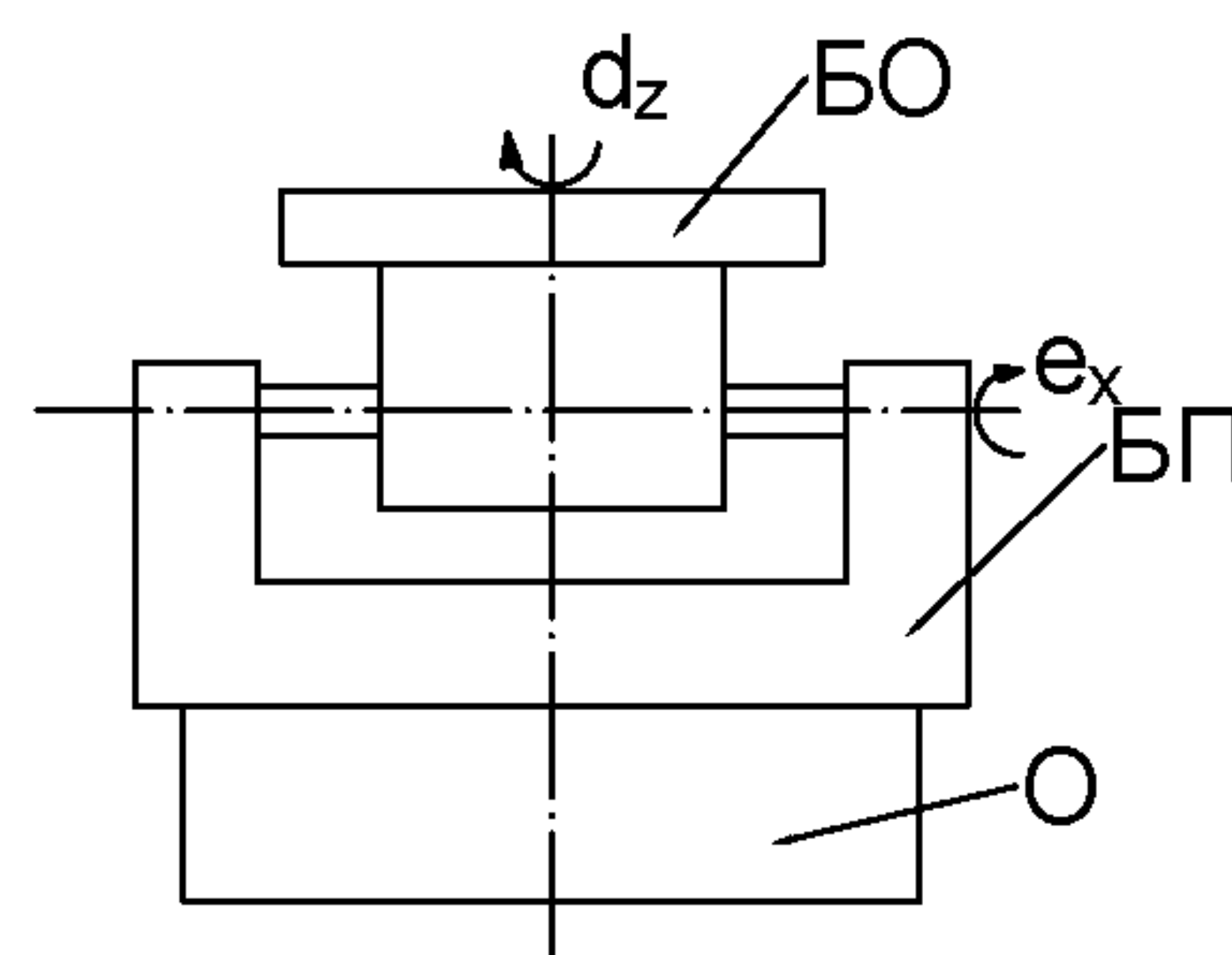
11,1 - 2,1 | 3,2 - 4,4 | 5,2 - 6,1 |



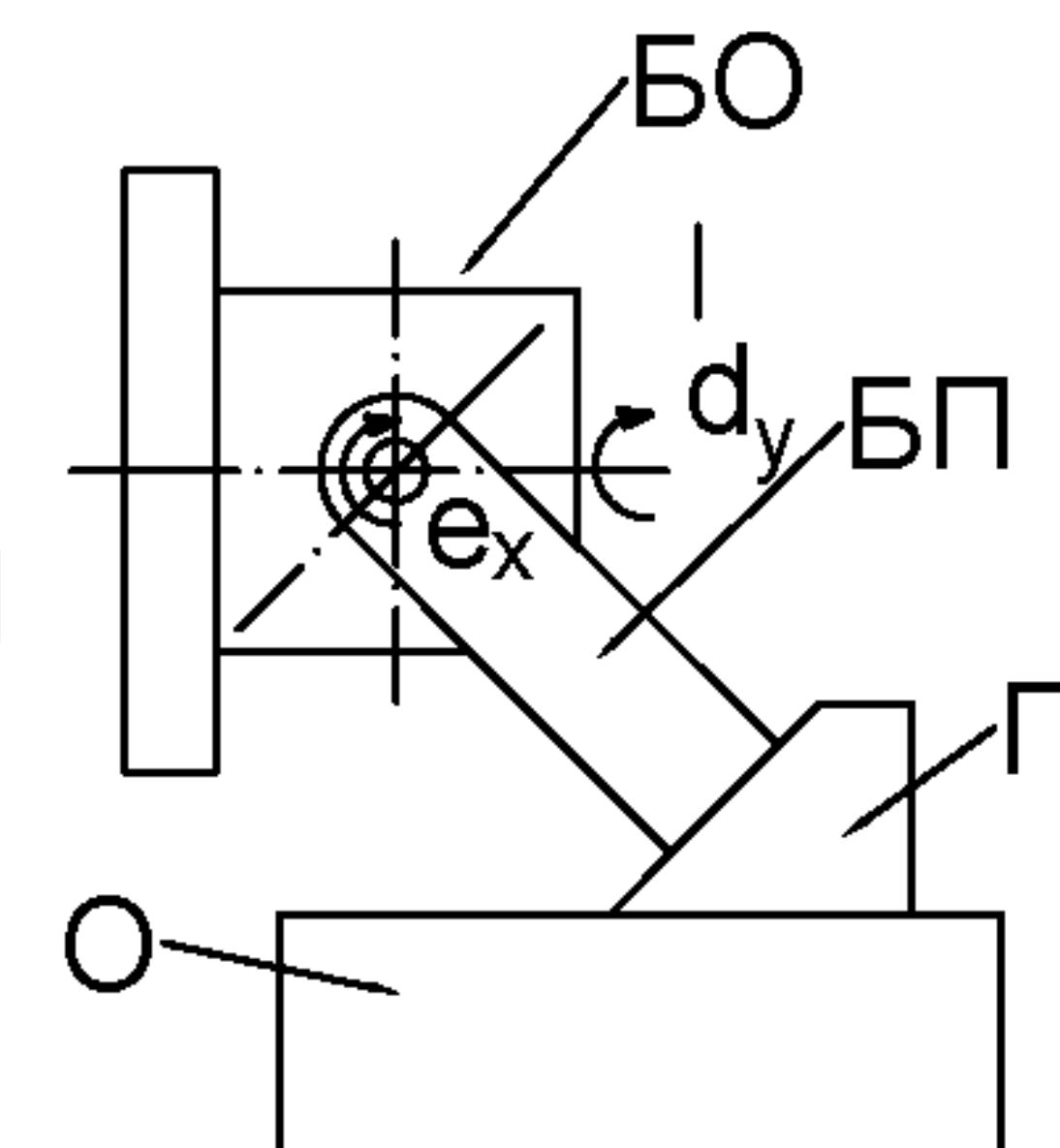
11,1 - 2,1 | 3,2 - 4,4 | 5,1 - 6,1 |



11,1 - 2,1 | 3,2 - 4,4 | 5,3 - 6,1 |

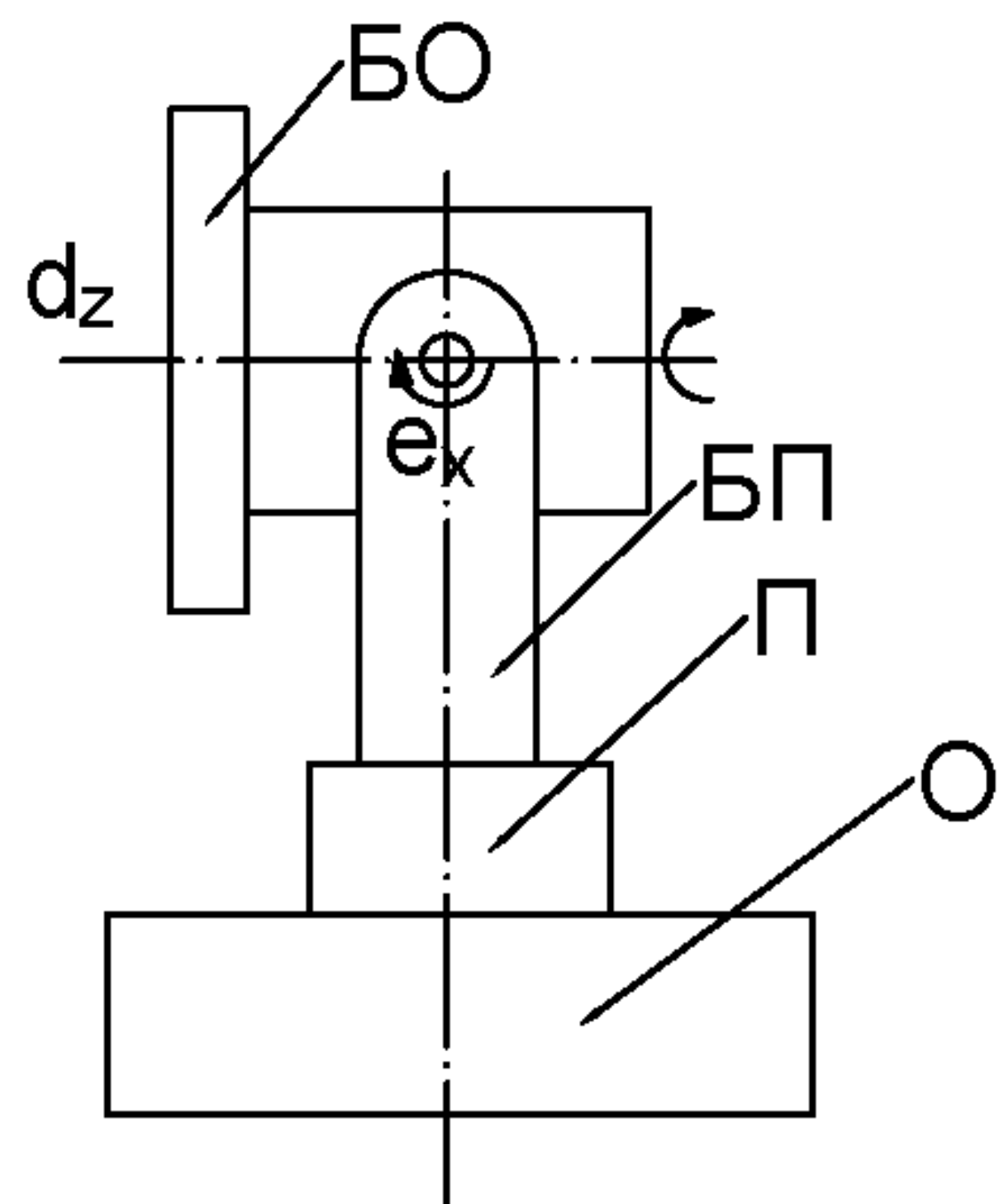


11,1 - 2,4 | 3,2 - 4,4 | 5,1 - 6,1 |

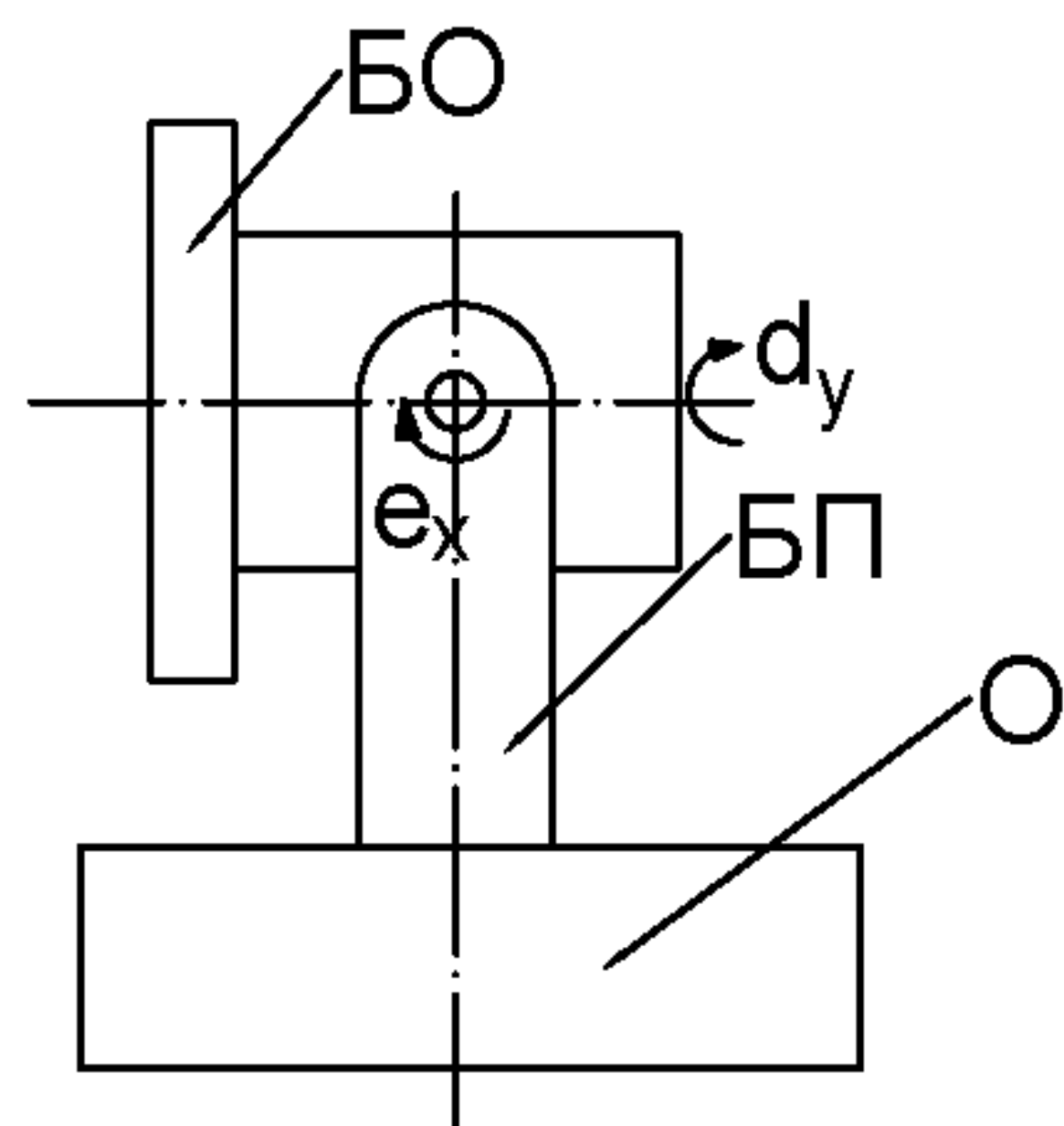


Синтезовані компоновки ОПП

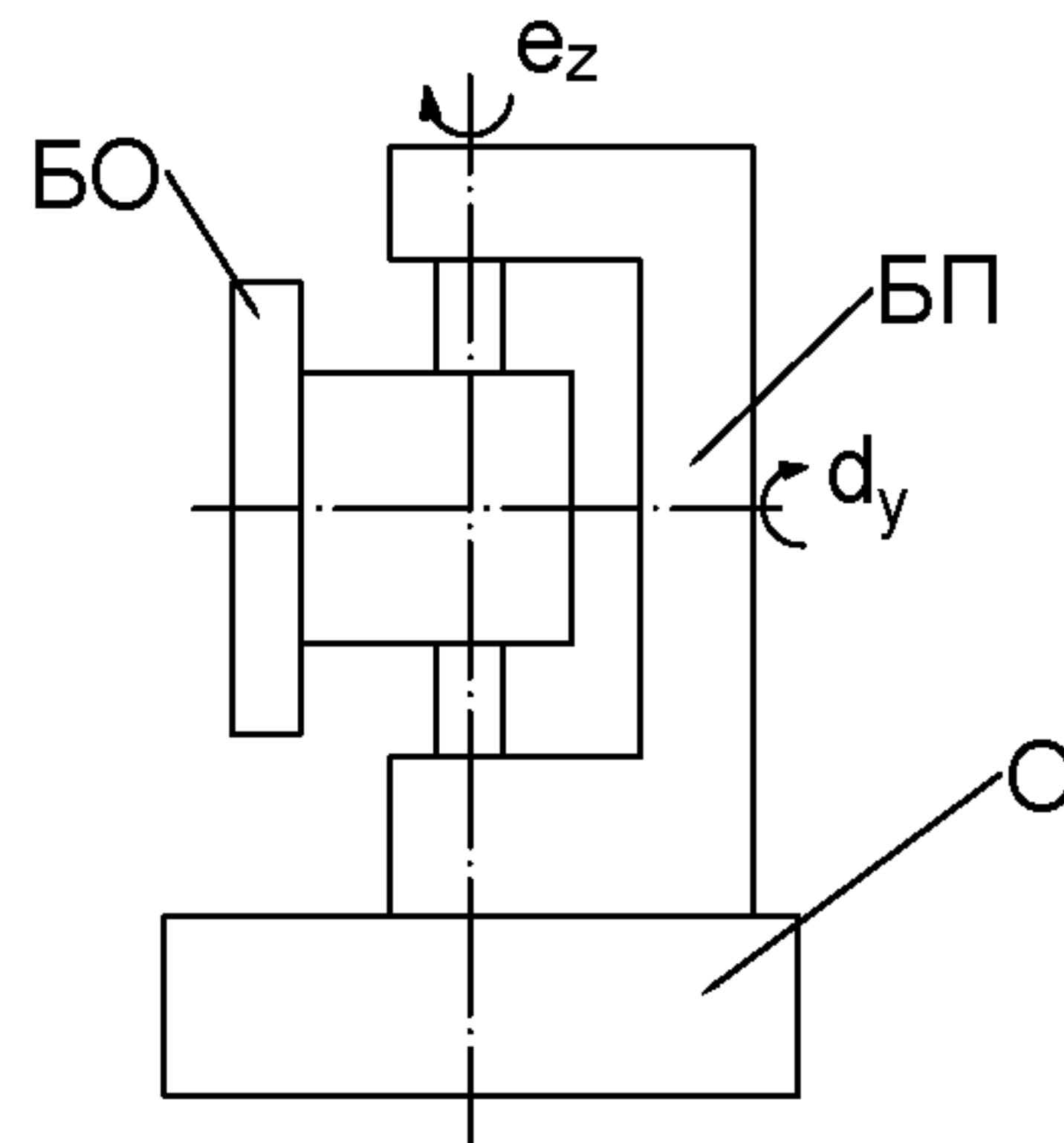
I 1,1 - 2,2 | $\wedge$ | 3,2 - 4,4 | $\wedge$ | 5,2 - 6,1 |



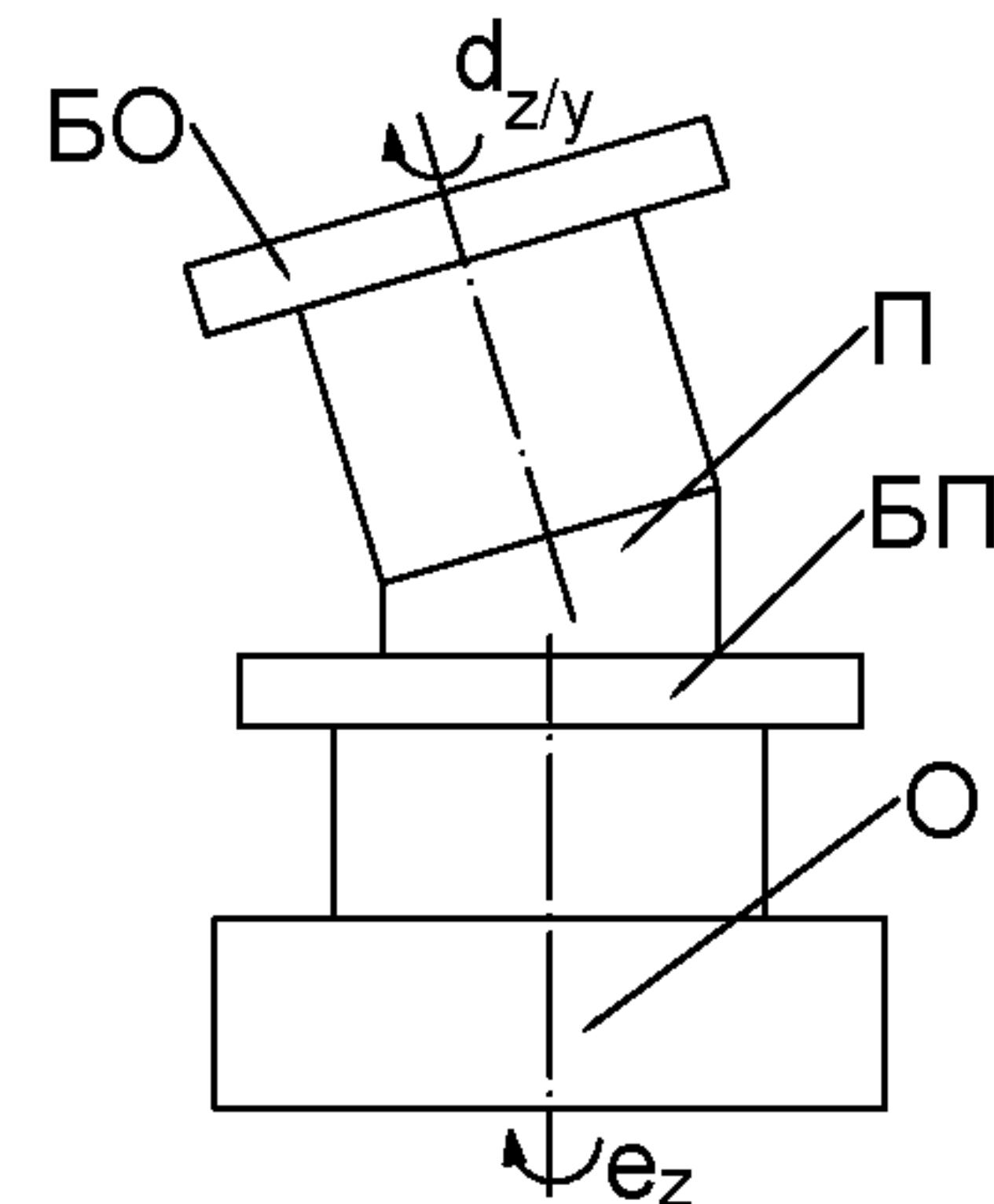
I 1,1 - 2,2 | $\wedge$ | 3,2 - 4,4 | $\wedge$ | 5,3 - 6,1 |



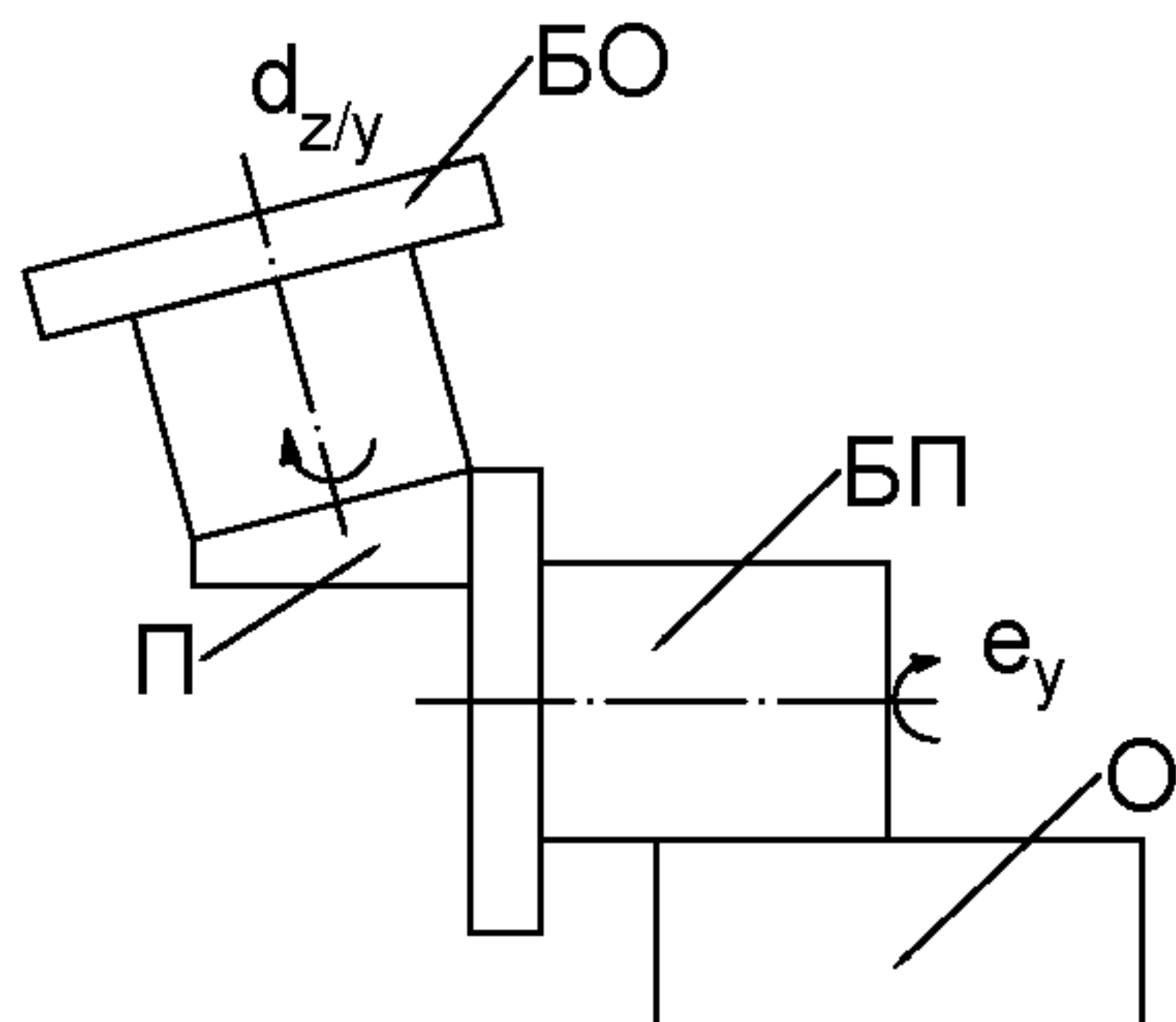
I 1,1 - 2,1 | $\wedge$ | 3,2 - 4,2 | $\wedge$ | 5,3 - 6,1 |



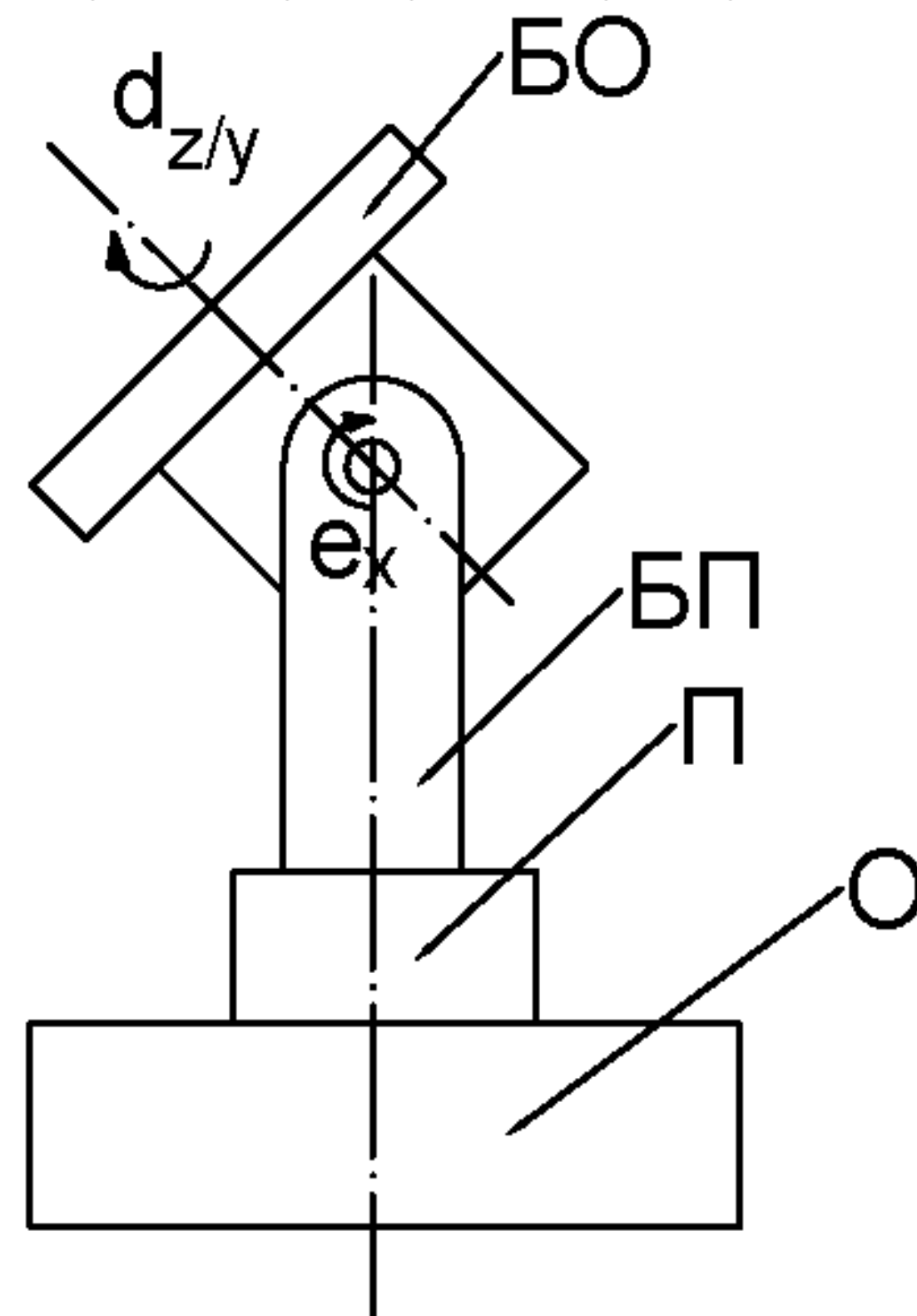
I 1,1 - 2,3 | $\wedge$ | 3,1 - 4,1 | $\wedge$ | 5,1 - 6,1 |



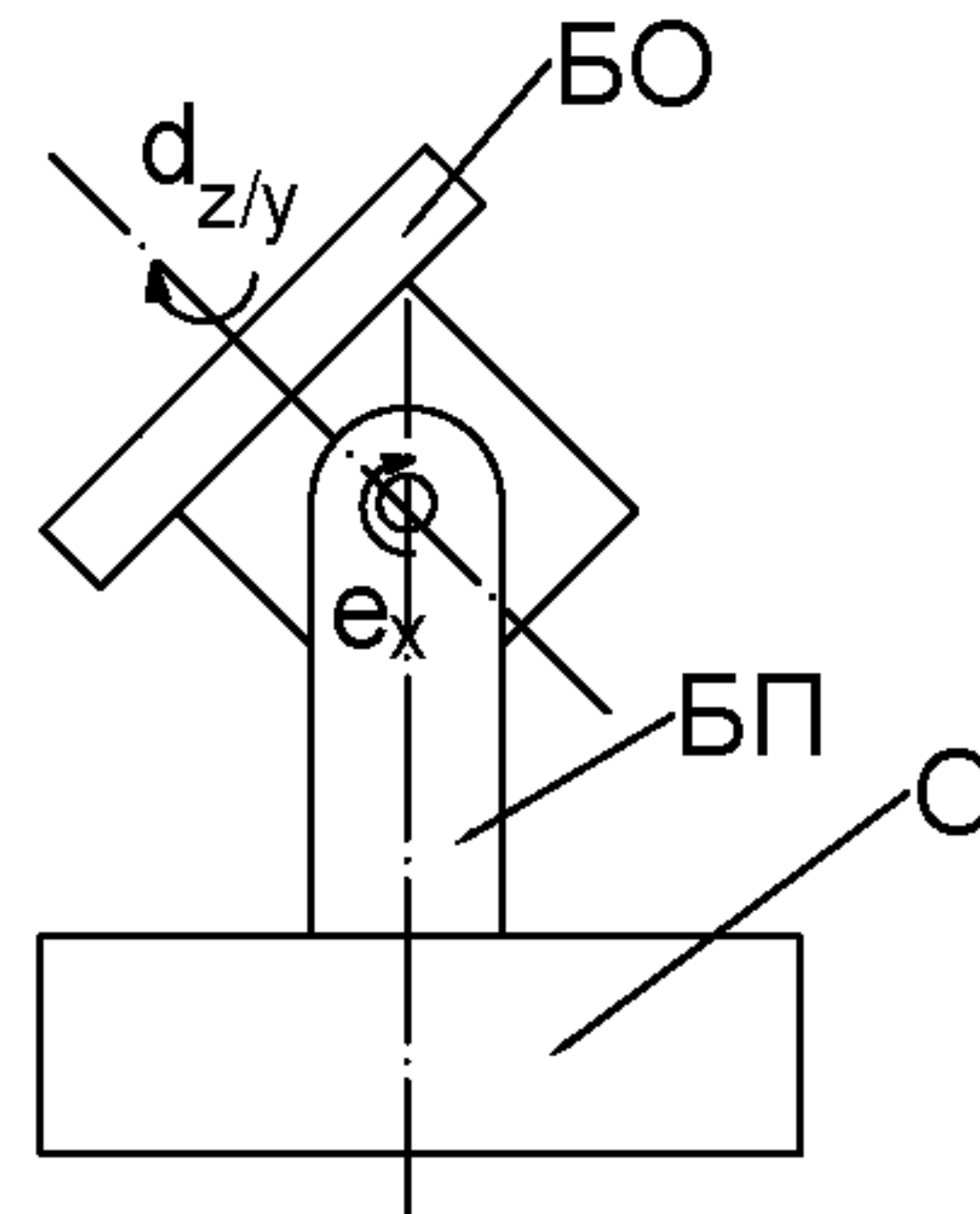
I 1,1 - 2,3 | $\wedge$ | 3,1 - 4,2 | $\wedge$ | 5,1 - 6,1 |



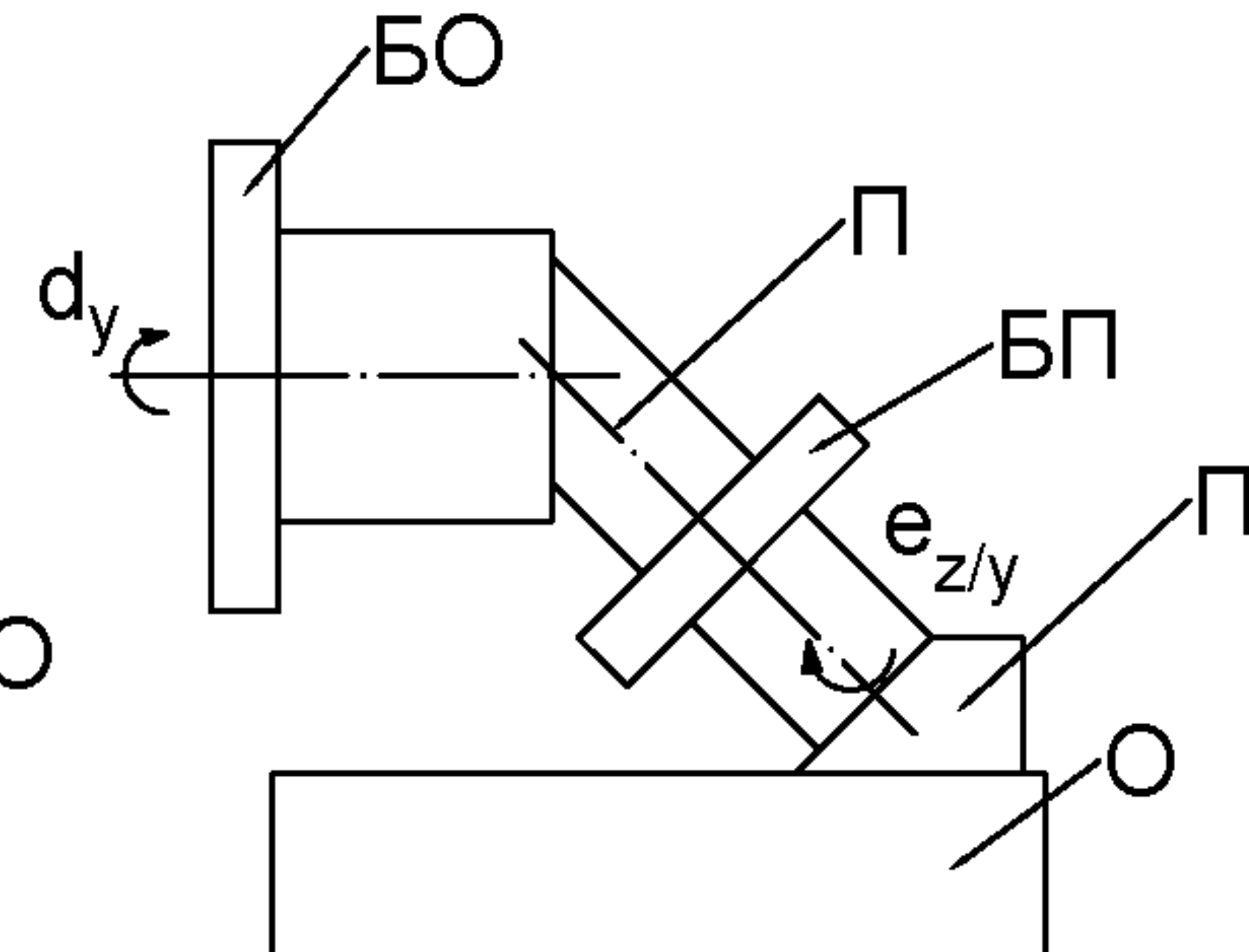
I 1,1 - 2,3 | $\wedge$ | 3,2 - 4,4 | $\wedge$ | 5,2 - 6,1 |

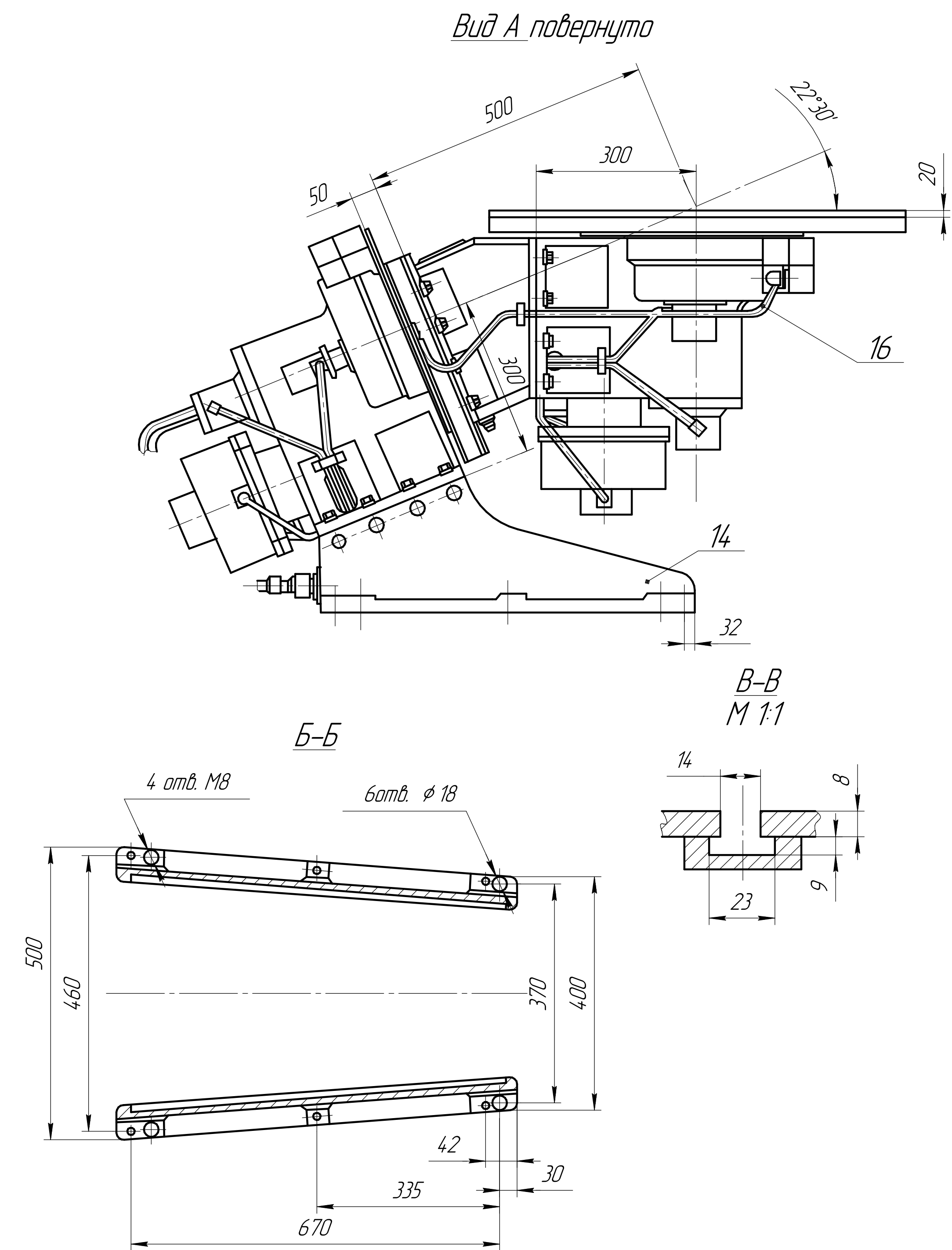
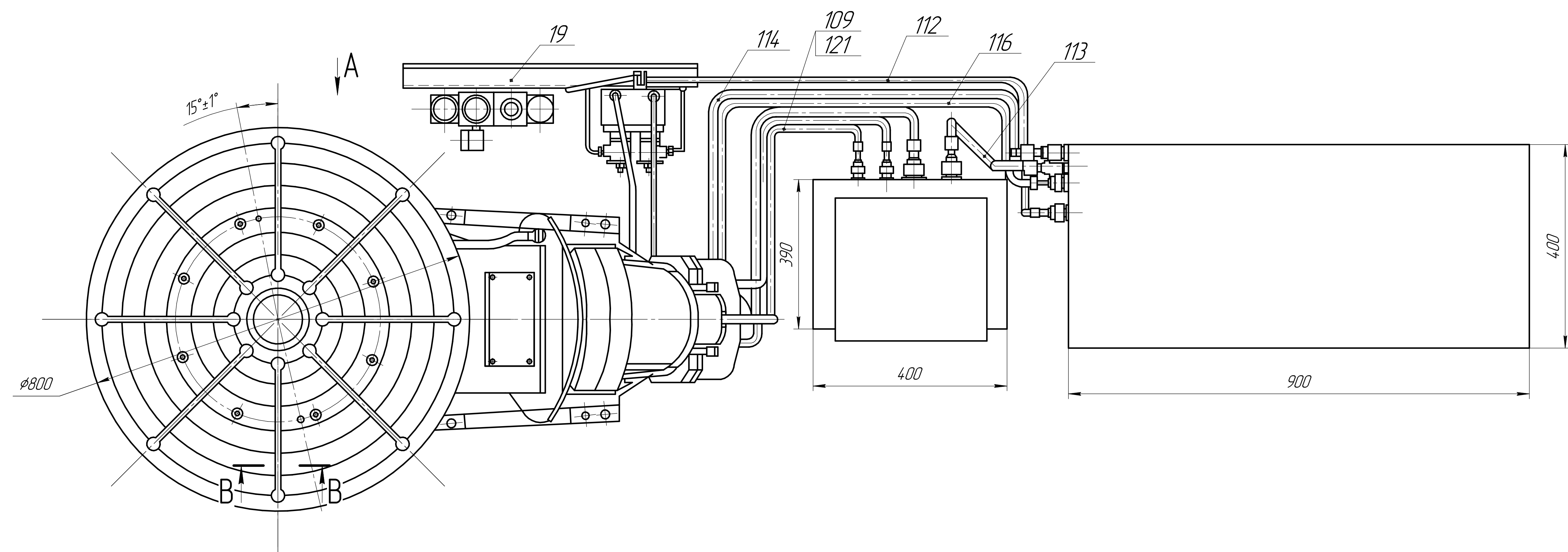
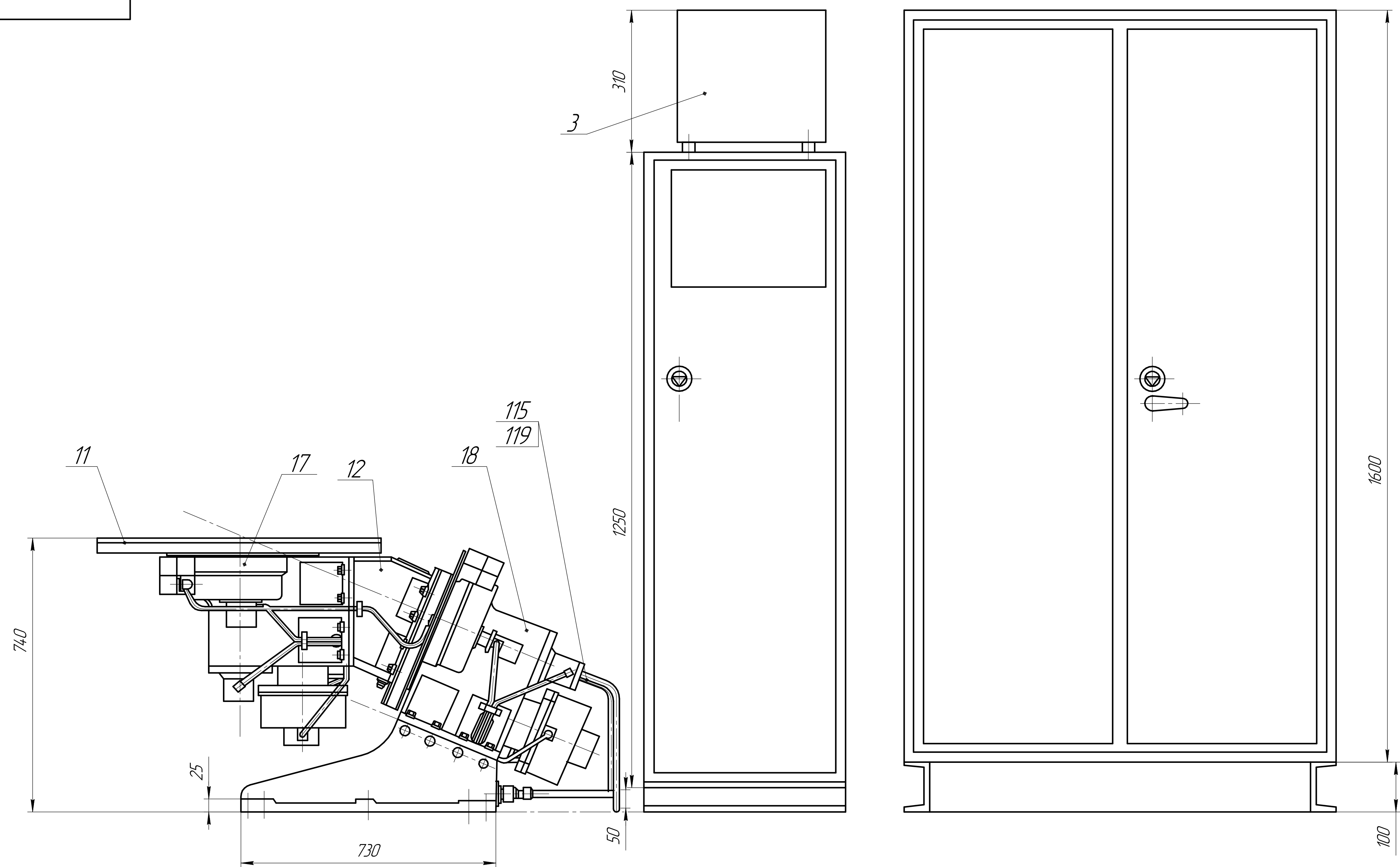


I 1,1 - 2,3 | $\wedge$ | 3,2 - 4,4 | $\wedge$ | 5,3 - 6,1 |



I 1,1 - 2,2 | $\wedge$ | 3,1 - 4,3 | $\wedge$ | 5,1 - 6,1 |

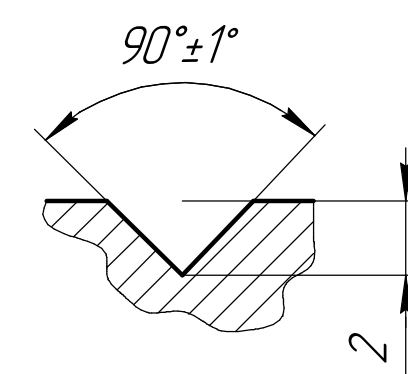
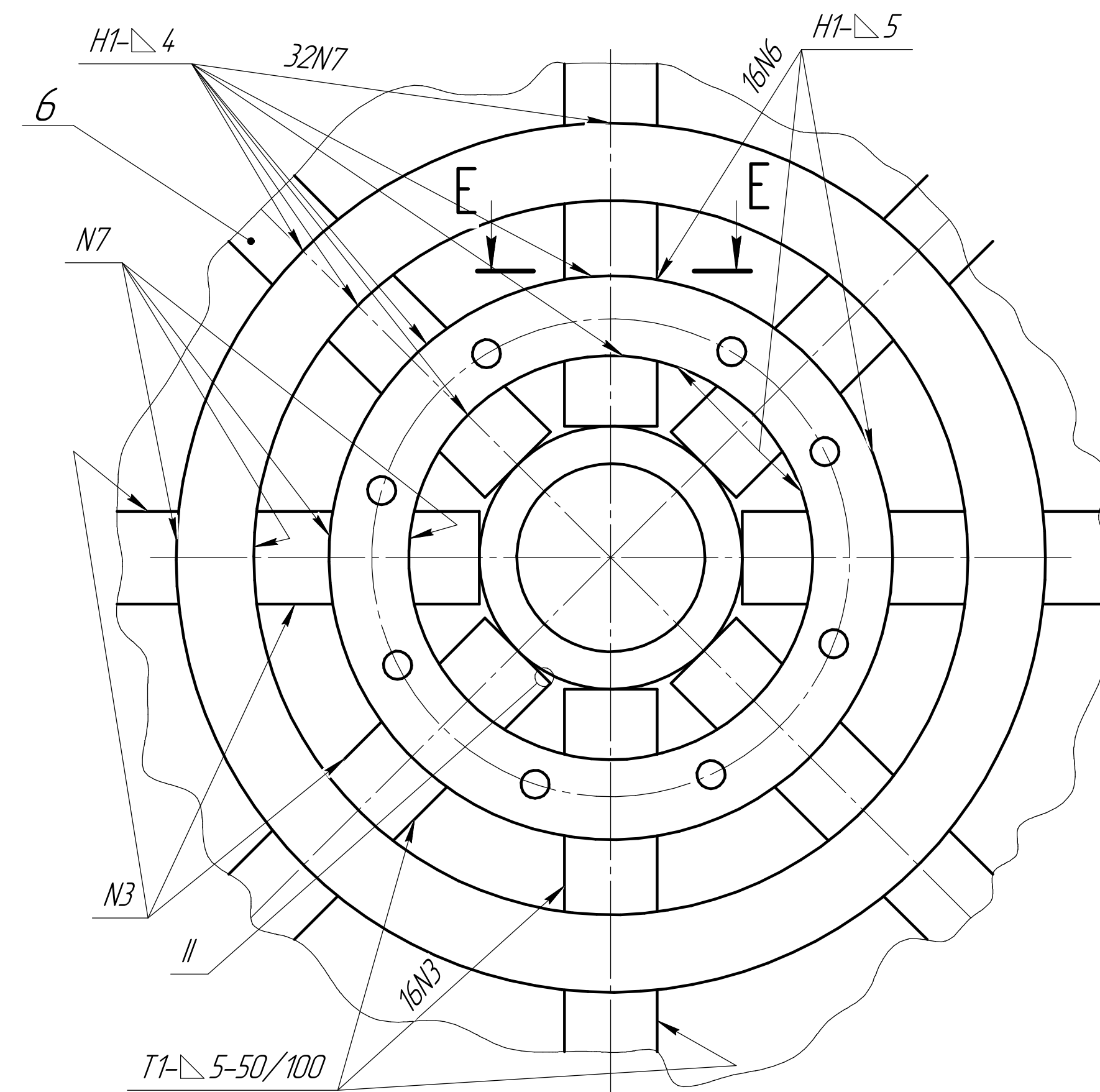
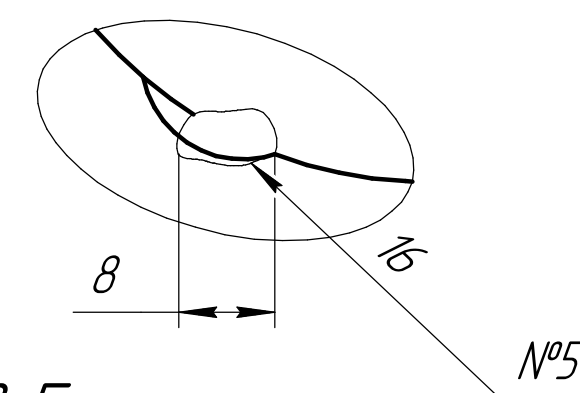
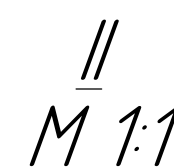
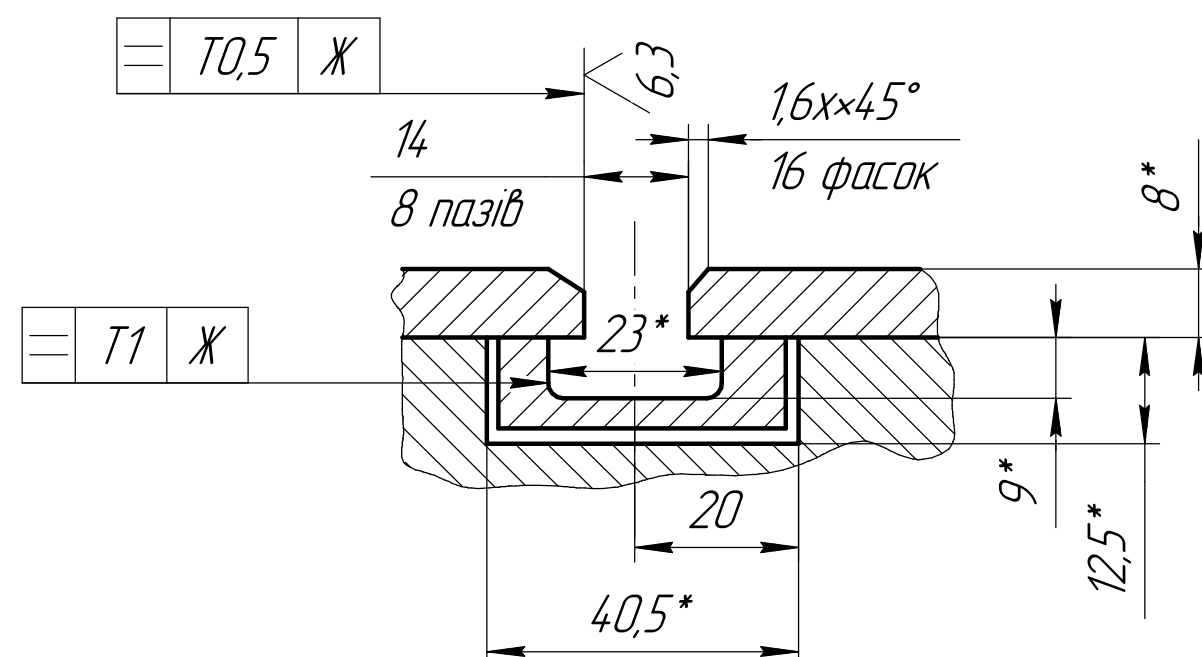
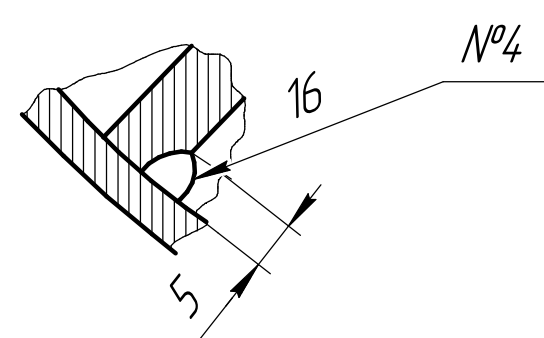
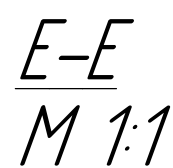
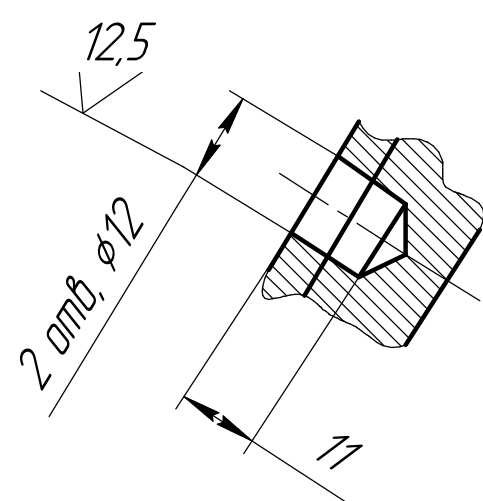
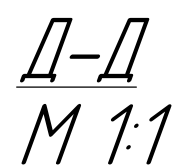




1. Клей 88Н ТУ38-1091061-87.
2. *Розміри виконавчі, інші для довідок.
3. При встановленні забезпечити відхилення від горизонтальності планшайди поз. 11 в початковому положенні не більше 0,1 мм.
4. Довжина кабелів між кранштейном поз.15 та роз'ємом блоку обертання поз.17 не менше 500 мм.
5. Довжина кабелів між кранштейном поз.15 та кришкою поз. 32 повинна забезпечувати вільний поворот шпинделя на кут не менше 335°.
6. Електропроводку виконати згідно схеми електричної з'єднань М150.40.000.00.0.000 ТЕ4.
7. Різьбові з'єднання деталей поз. 43 та 44 покрити смазкою ЦИАТИМ203 ГОСТ 8773-73.

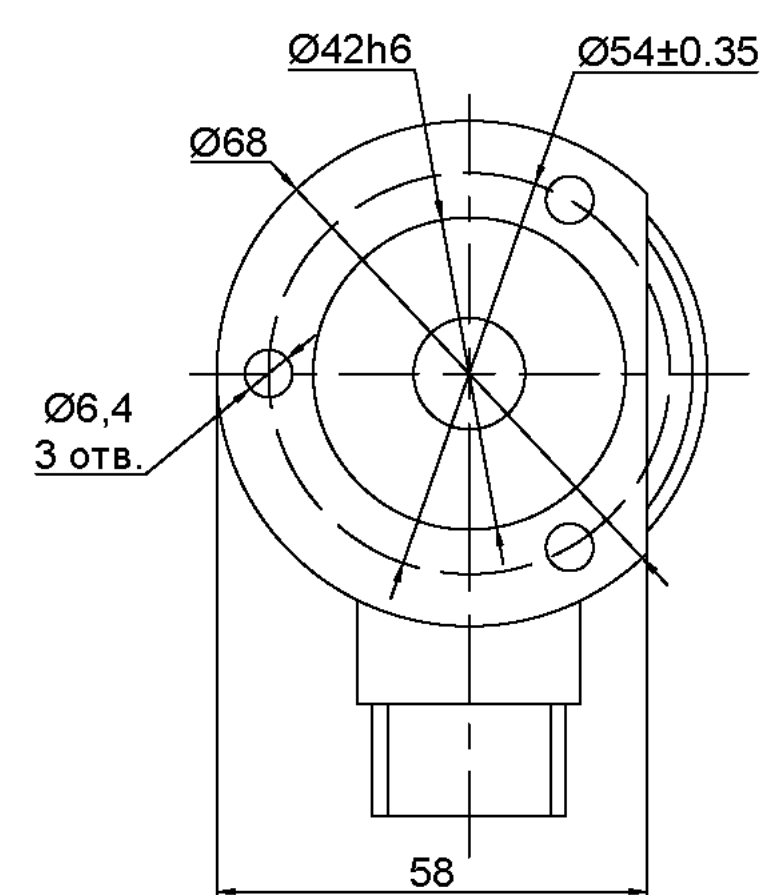
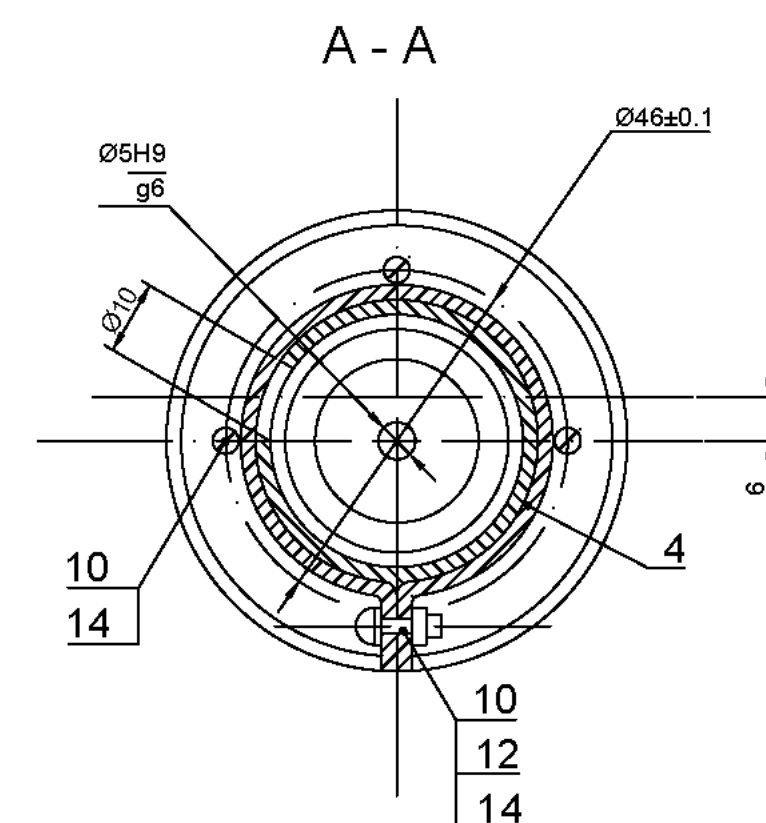
[illegible]

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инд. №	Инд. № дубл.	Подп. и дата

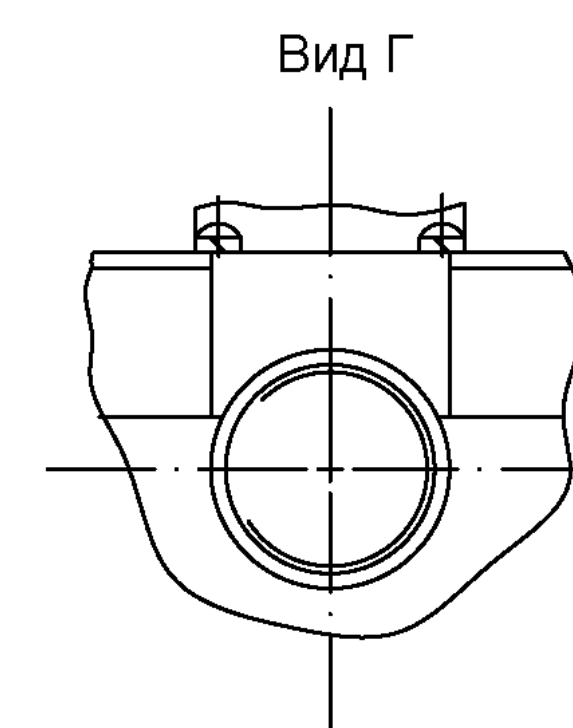
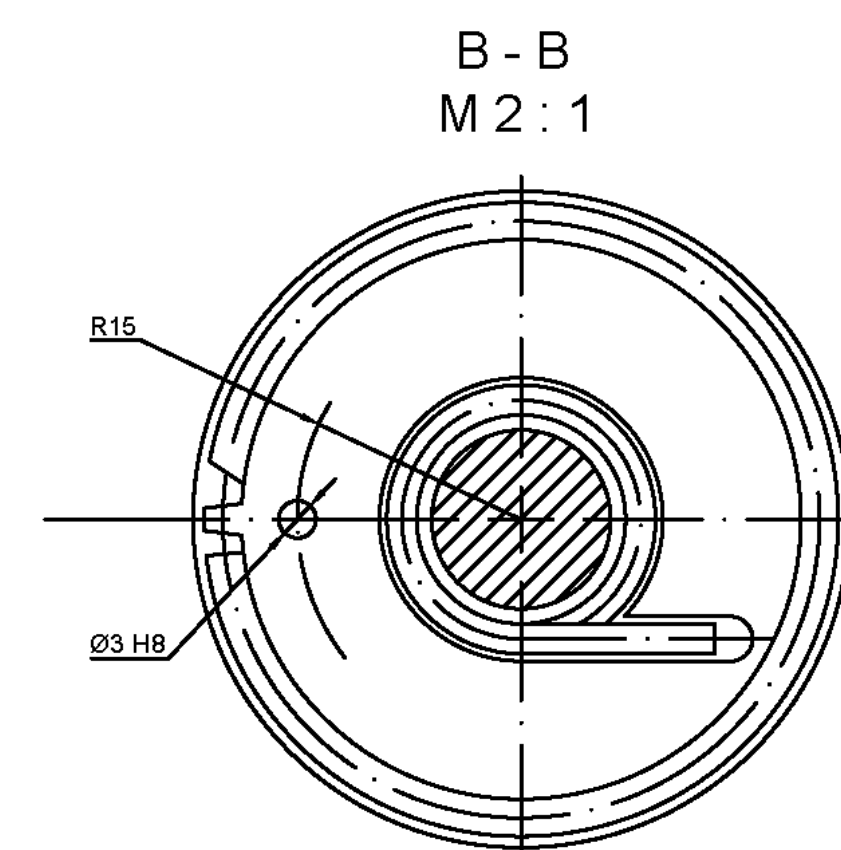
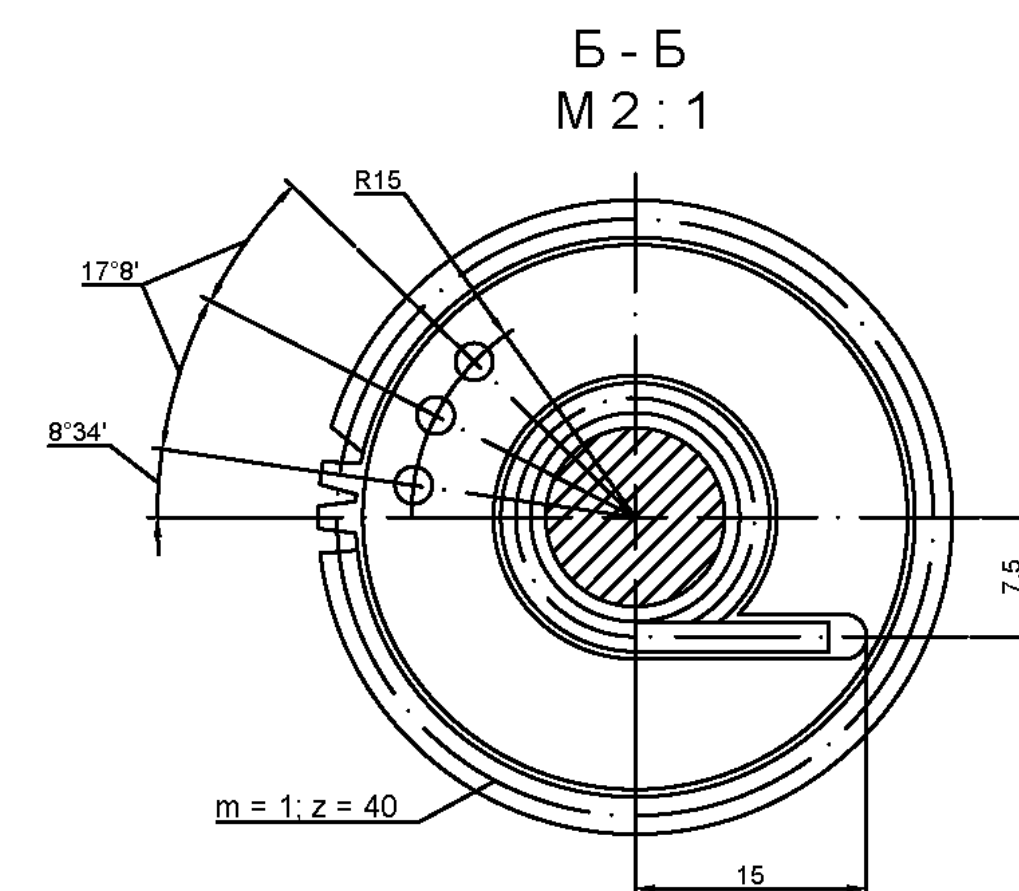
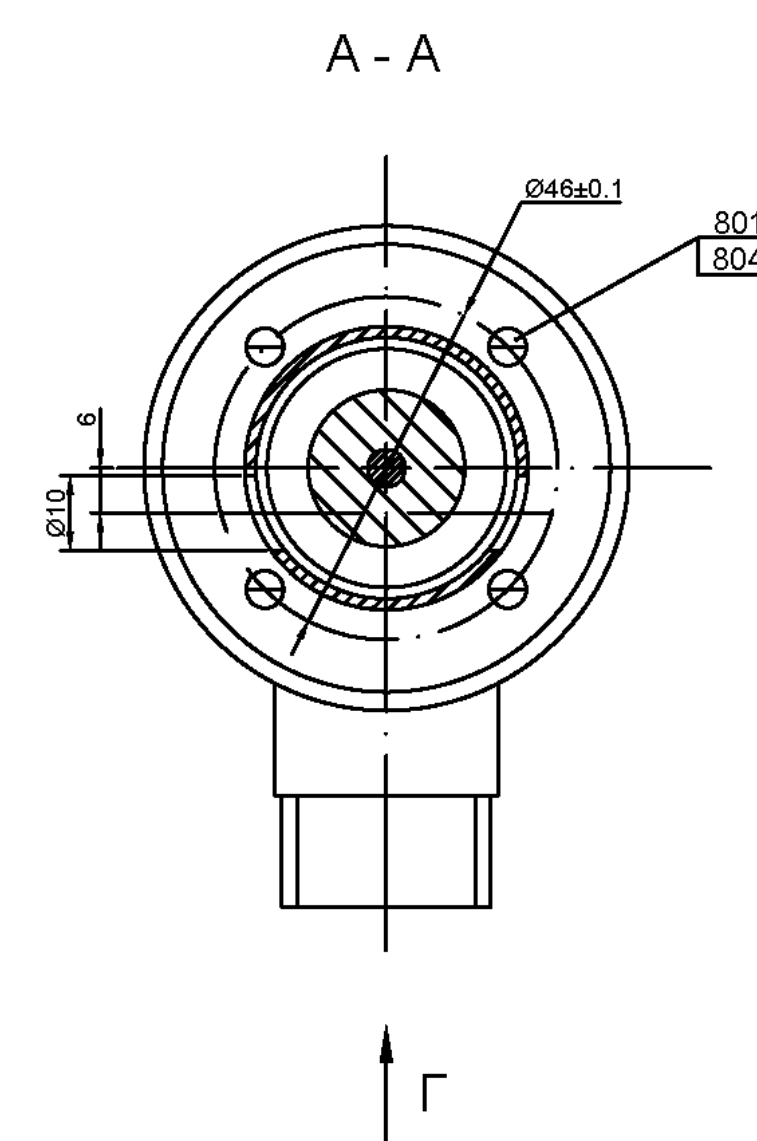
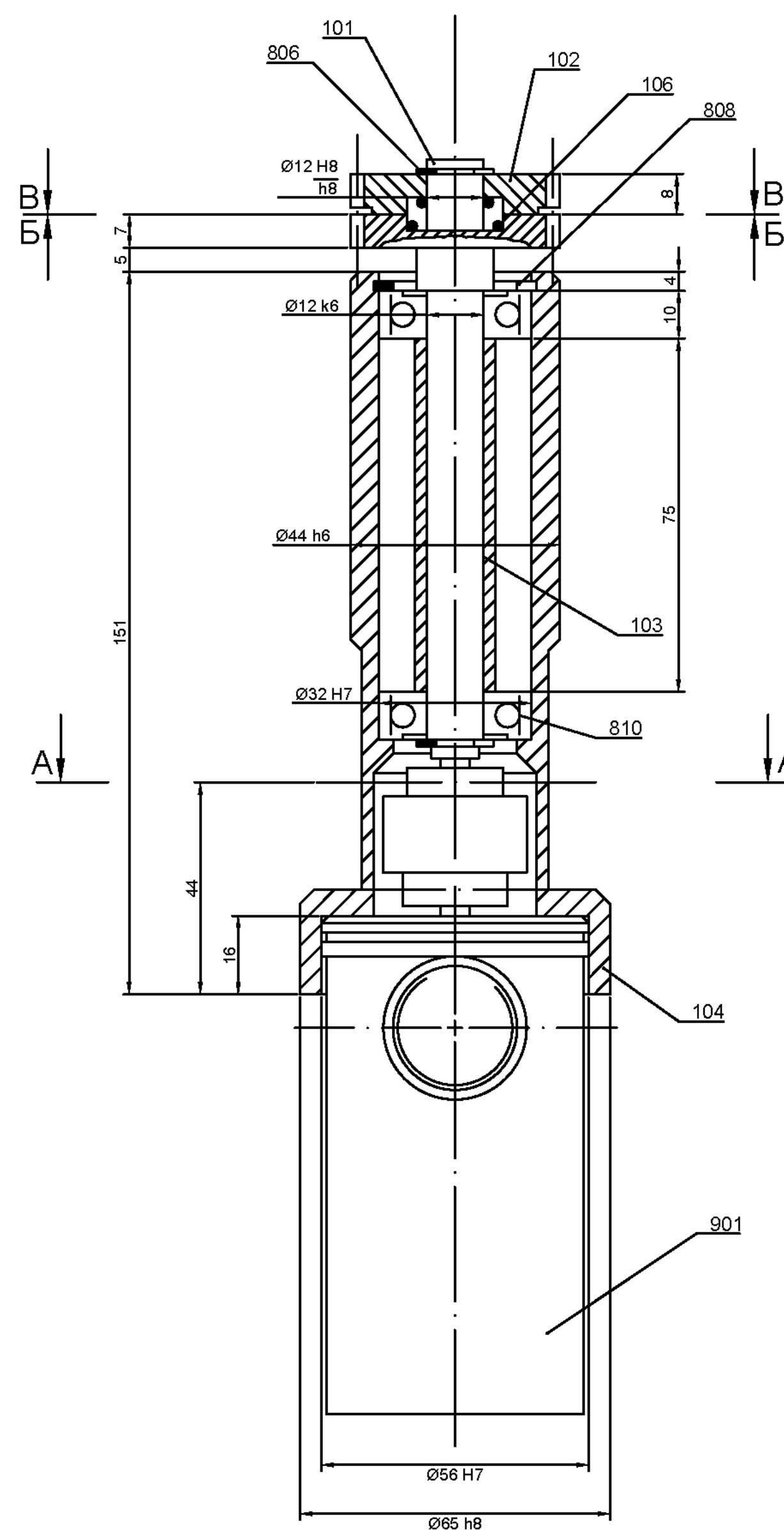


1. Зварювальні шви по ГОСТ 5264-80, окрім тих, що позначені окремо.
2. Шви №4, №5, зварювання ручне дугове.
3. Відпалити.
4. *Розміри для довідок.
5. H14, h14, ±IT14/2.
6. Покриття механічно необроблених поверхонь емаль НЦ-132П золотисто-жовта ГОСТ 6631-74 II-У2.
7. На поверхні А нанести сигнальні полоси шириною 20 мм з інтервалом 40 мм під кутом 45° до площини планшайби. Емаль НЦ-132П чорна.
8. Маркувати.

[illegible]



1. *Розміри для довідок

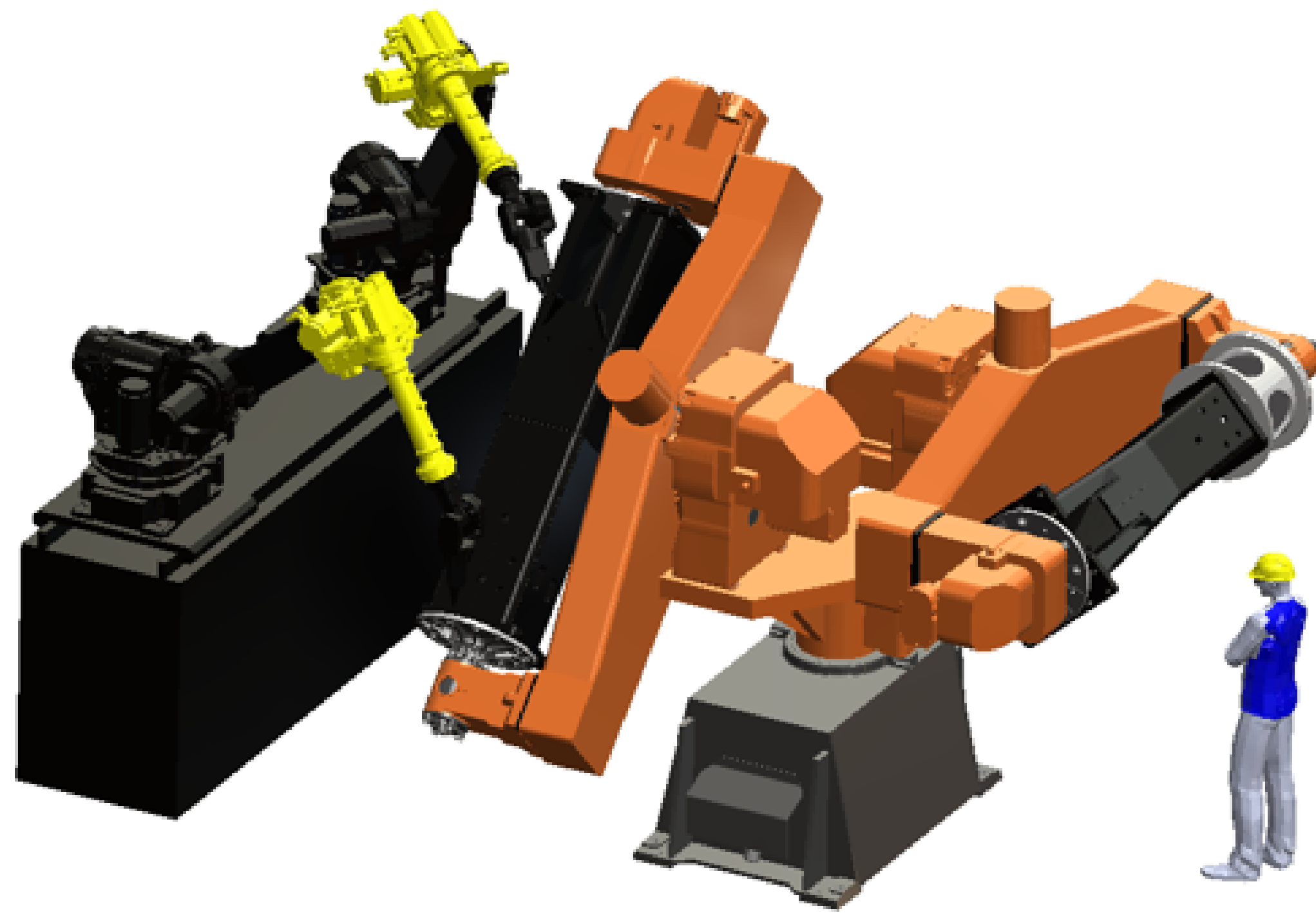
[illegible]

а	Датчик повороту
---	-----------------

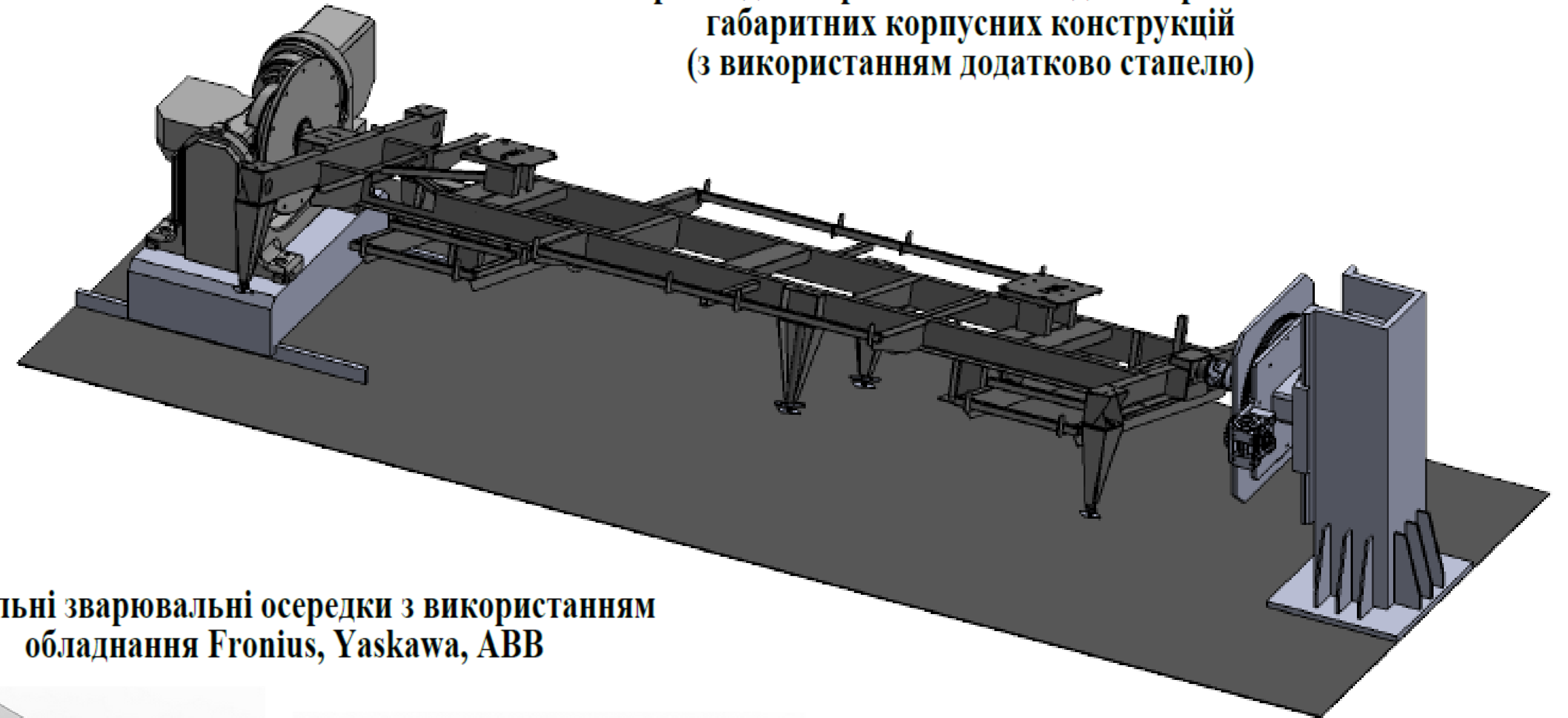
[illegible]

Приклади застосування ОПП

Приклад роботизованого зварювання
(використання обертально – поворотного пристрою
зі зварювальними роботами)

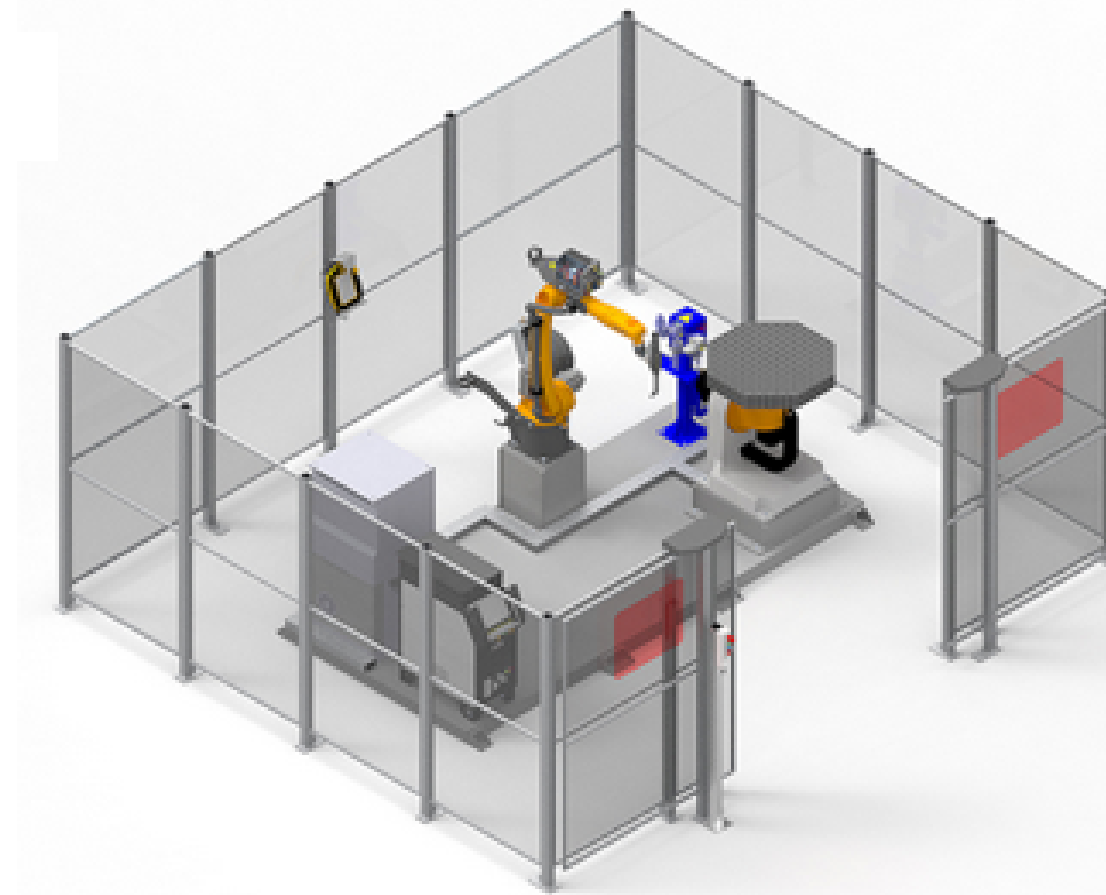
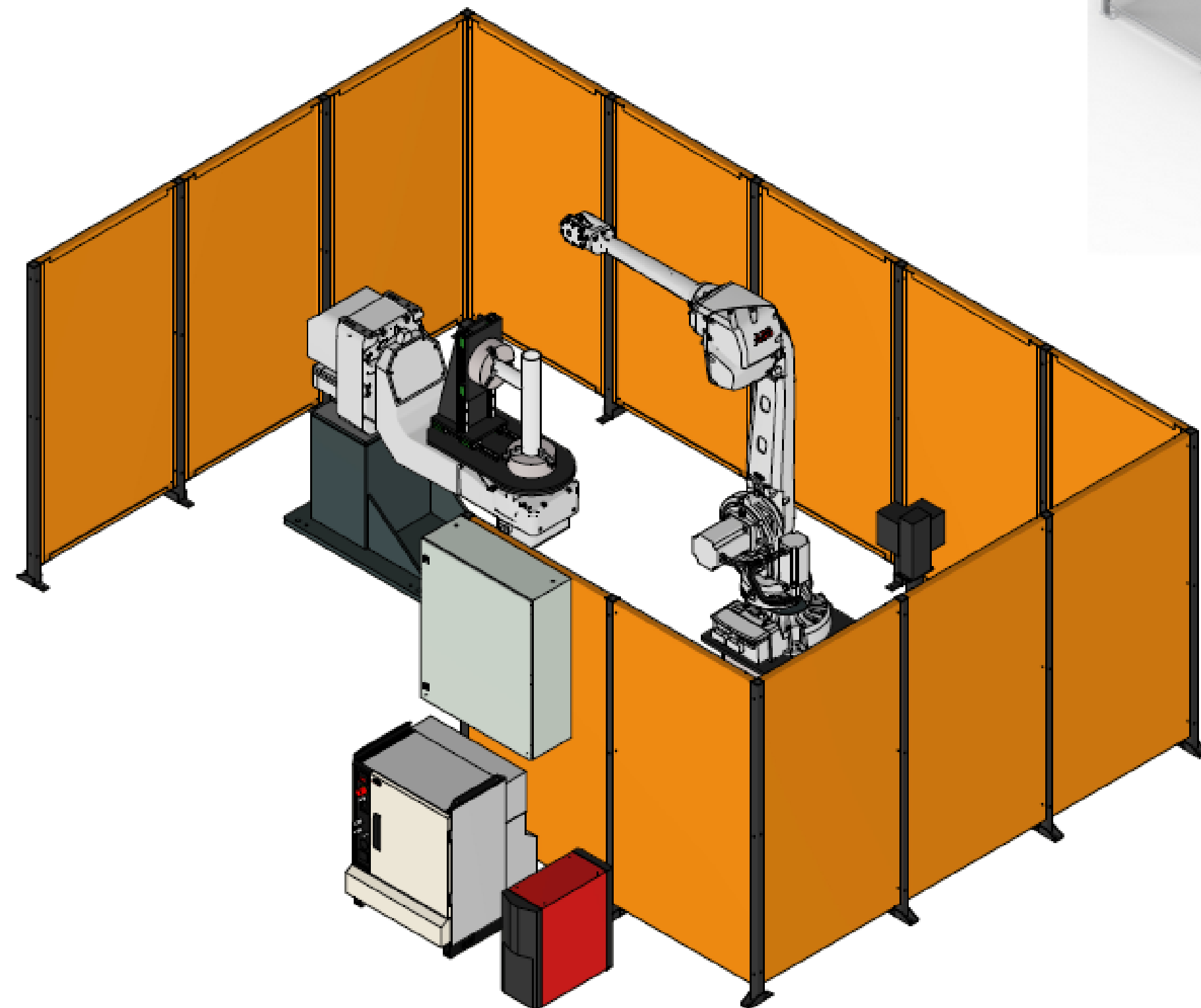


Приклад використання ОПП для зварювання
габаритних корпусних конструкцій
(з використанням додатково стапелю)



Модульні зварювальні осередки з використанням
обладнання Fronius, Yaskawa, ABB

Автоматизована зварювальна дільниця
з використання ОПП та зварювального
маніпулятора



Приклад модульних позиціонерів для роботів
Fronius (Австрія)

