

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ ТА АВТОМАТИКИ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

«На правах рукопису»
УДК 621.313

«До захисту допущено»
В.о. завідувача кафедри

_____ В.В. Чумак
(підпис) (ініціали, прізвище)
«___» _____ 2023р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра

зі спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва)
освітня програма (спеціалізація) Електричні машини і апарати
на тему: «Інноваційний синтез багатокоординатних мотор-шпиндельних агрегатів»

Виконав (-ла): студент (-ка) II курсу, групи ЕМ-21мп
(шифр групи)

Мирошниченко Владислав Валерійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник проф., д.т.н., Шинкаренко В.Ф.

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

(підпис)

Консультант 2, 3 аспірант Красовський П.О.

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, д.т.н. Шаповал І. А.

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

(підпис)

Консультант

по нормоконтролю

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

(підпис)

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

Студент

(підпис)

Київ – 2023 року

**Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повна назва)

Кафедра Електромеханіки

(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва)

Освітня програма (спеціалізація) Електричні машини і апарати

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

Чумак В.В.

(підпис)

(прізвище ініціали)

«_____» _____ 2022 року

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ

Мирошніченко Владислав Валерійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Інноваційний синтез багатокоординатних мотор-шпиндельних агрегатів»

науковий керівник дисертації проф., д.т.н, Шинкаренко В.Ф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від 03. 11. 2023 року № 5131-с

2. Термін подання студентом дисертації 05.01.2024

3. Об'єкт дослідження - процеси генетичного структуроутворення і еволюції гібридних електромеханічних систем (ЕМ-систем)

4. Вихідні дані – індивідуальне завдання на магістерську дисертацію

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1) Здійснити патентний пошук за напрямом «Багатокоординатні мотор-шпиндельні агрегати для металообробних центрів». 2) Здійснити аналіз стану досліджень та розробок за

- напрямом мотор-шпиндельних агрегатів (МША); 3) Визначити генетичні принципи структуроутворення і макрогенетичні програми МША. 4) Здійснити синтез гібридних структур МША з реалізацією дво-, три- і чотирикоординатного руху; 5) Здійснити постановку і аналіз еволюційних експериментів; 6) Здійснити комп'ютерне моделювання і розрахунковий аналіз двигуна головного руху МША. 6) Розробити креслення трикоординатного МША; 7) За результатами синтезу розробити електронну версію ілюстрованого генетичного банку синтезованих структур МША;
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу
Відеопрезентація (графічна частина – 13 слайдів)
7. Орієнтовний перелік публікацій: 2 наукові статті за темою дисертації.
8. Консультанти розділів дисертації:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
2	аспірант Красовський П.О.		
3	аспірант Красовський П.О.		

9. Дата видачі завдання 28.10.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Патентний пошук за напрямом «Багатокоординатні мотор-шпиндельні агрегати»	28.10.22 - 01.05.23	Виконано
2	Аналіз стану і напрямів прикладних досліджень, розробок та галузей практичного використання електродвигунів в багатокоординатних мотор-шпиндельних агрегатах	01.05.23 - 04.06.23	Виконано
3	Генетичні принципи структуроутворення і макрогенетичні програми МША	04.06.23 - 17.09.23	Виконано
4	Синтез і 2D-візуалізація гібридних структур МША дво-, три- і чотирикоординатного руху	17.09.23 - 12.10.23	Виконано
5	Комп'ютерне моделювання і розрахунковий аналіз модуля обертового руху МША	12.10.23 - 28.10.23	Виконано
6	Електронна версія ілюстрованого генетичного банку даних МША	28.10.23 - 21.11.23	Виконано
7	Виконання стартап-проєкту	21.11.23 - 29.11.23	Виконано
8	Оформлення презентації	29.11.23 - 05.05.24	Виконано

Студент

(підпис)

В.В. Мирошніченко

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

В.Ф. Шинкаренко

(ініціали, прізвище)

ЗМІСТ

ABSTRACT.....	7
Перелік скорочень та умовних позначень.....	9
ВСТУП.....	11
Розділ 1. Сучасні тенденції у створенні і застосуванні мотор-шпинделів.	13
1.1. Використання мотор-шпинделів.....	13
1.2. Двокоординатні мотор-шпиндельні агрегати.....	14
1.3. Електричні двигуни головного руху та подачі мотор-шпинделів.....	18
1.4. Висновки до розділу 1.....	23
Розділ 2. Генетичні принципи структуроутворення гібридних структур мотор-шпинделів.	25
2.1. Макрогенетична програма функціонального класу мотор-шпинделів.	25
2.2. Принцип гібридизації електромеханічних структур.	27
2.3. Модульний принцип в структуроутворенні МШ.	38
2.4. Методи моделювання і синтезу структурних мутацій	41
2.5. Інноваційний потенціал класу МШ.	47
2.6. Висновки до розділу 2.....	49
Розділ 3. Методологія міждисциплінарного синтезу мотор-шпиндельних агрегатів. 50	
3.1. Просторово-функціональна адаптація в генетичній еволюції технічних систем.	50
3.2. Метод генетичного синтезу модульних структур.	56
3.3. Методологія інноваційного синтезу багатокоординатних мотор-шпиндельних агрегатів.	59
3.4. Генетичний статус функціонального класу мотор-шпиндельних агрегатів.....	61
3.5. Висновки до розділу 3.....	63
Розділ 4. Синтез структур мотор-шпиндельних агрегатів багатокоординатного руху.....	65
4.1. Синтез модульної ЕМ-структури багатокоординатного поворотного пристрою.....	65
4.2. Синтез просторово адаптивних структур мотор-шпиндельних агрегатів гібридного типу.	69
4.3. Візуалізація і аналіз результатів синтезу.	74
4.4. Генетичний каталог синтезованих структур МША.	83
4.5. Висновки до розділу 4.....	86
Розділ 5. Результати еволюційних експериментів.....	88
5.1. Особливості родової і видової еволюції мотор-шпинделів.....	88
5.2. Експериментальне підтвердження принципів генетичного структуроутворення мотор-шпинделів.	90
5.3. Генетична еволюція багатошпиндельних вузлів модульного типу.	96

5.4.	Розрахунок електродвигуна головного приводу мотор-шпинделя.....	98
5.5.	Висновки до розділу 5.....	123
6.	Стартап - проєкт.	125
6.1	Опис ідеї проєкту.....	125
6.2	Технологічний аудит ідеї проєкту.	125
6.3	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту.....	126
	ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	129
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.	130
	ДОДАТКИ.	134

ABSTRACT.

The master's dissertation was carried out as a component of the cycle of research works, which were provided by the Department of Electromechanics as part of the international program "Ukraine - Slovakia", in accordance with the agreements between the Igor Sikorskyi KPI and the Ministry of Education and Science of Ukraine (M/26-2022 dated 23.05.2022 and no. M/21-2023 dated July 21, 2023).

The purpose of the dissertation research is to spread and test the methodology of innovative synthesis of electromechanical objects on the task of interdisciplinary synthesis of hybrid technical systems of the "Motor-spindle" type.

The main tasks of dissertation research are the following:

1. Analysis of the use and state of research of motor-spindles.
2. Genetic principles of structure formation and macrogenetic programs of the MSA;
3. Methodology of interdisciplinary synthesis of motor-spindle units;
4. Synthesis and analysis of hybrid structures of motor-spindle units of multi-coordinate movement;
5. Organization and analysis of the results of evolutionary experiments.

The object of research is the processes of evolutionary structuring of the functional class "Motor-spindle aggregates" (MSA) of multi-coordinate motion.

The subject of research is the evolution of motor-spindles, the principles of structural formation of hybrid electromechanical systems with components of different genetic nature, the aggregate-modular design principle, the results of the genetic synthesis of intersystem hybrids, the genetic data bank of synthesized structures of the Academy of Sciences.

Research methods – structural and systemic approach, theory of genetic evolution of electromechanical systems, technology of structural prediction, genetic modeling, methods of genetic analysis and synthesis, evolutionary experiments.

For the first time, a generalized genetic model for the synthesis of hybrid EM structures of multi-coordinate motor-spindle units was developed; two-coordinate,

three-coordinate and four-coordinate motor-spindle units were synthesized; a genetic catalog of synthesized structures of multi-coordinate motor-spindle units with an adaptive spatial structure was developed.

Synthesized variants of the structures of multi-coordinate MSA and the developed genetic catalog serve as the basis for the further development of original competitive technical solutions.

The proposed designs of the MSA can be attributed to a new stage of the technical evolution of motor-spindles, the characteristic feature of which is the modular principle and the possibility of adapting the structure of the MSA to the requirements of the multi-coordinate space of operation. Multi-coordinate MSA provide a wide range of technological operations and modes of metalworking, as well as various options for modular implementation, options and interface. They are intended for specialized processing of parts and nodes of complex spatial shape on CNC machines and multi-coordinate metalworking centers.

The main text – 116 pages. Tables – 19. Figures – 42. Additions – 2. Sources – 35.

Перелік скорочень та умовних позначень.

ГБД – генетичний банк даних;
 ГОС – генетично організована система;
 ГК – генетична класифікація;
 ЕМ-об'єкт – електромеханічний об'єкт;
 ЕМ - система – електромеханічна система;
 ЕМ - структура – електромеханічна структура;
 ІБД – інформаційна база даних;
 М_А – аеродинамічна підсистема;
 М_{ЕМ} – електромагнітна підсистема;
 М_Г – механічна передача «гвинт – гайка»;
 М_Н – гідравлічна підсистема;
 М_{РМ} – газоманітна підсистема;
 М_Р – пневматична підсистема;
 М_Ѕ – механічний вузол шпинделя;
 МШ – мотор-шпиндель;
 МША – мотор-шпиндельний агрегат
 I – оператор інверсії;
 M – оператор мутації;
 R - оператор реплікації;
 C – оператор кросинговеру;
 × - оператор схрещування (суміщення);
 CL – Рід циліндричних;
 KN – Рід конічних;
 PL – Рід плоских;
 TP – Рід тороїдальних плоских;
 SF – Рід сферичних;
 TC – Рід тороїдальних циліндричних;
 CL 0.2y – універсальний генетичний код Виду;

CL 0.2y – універсальний генетичний код первинного джерела електромагнітного поля (електромагнітної хромосоми);

³*CL 0.2y* – генетичний код Виду – близнюка;

ВСТУП.

Магістерська дисертація виконувалася як складова циклу науково-дослідних робіт, які забезпечувалися кафедрою електромеханіки в рамках міжнародної програми «Україна – Словачія», відповідно до договорів між КПІ імені Ігоря Сікорського і МОН України (М/26-2022 від 23.05.2022 р. та №М/21-2023 від 21.07.2023 р.).

Метою дисертаційного дослідження є поширення і практична апробація методології генетичного синтезу на класи гібридних мотор-шпиндельних агрегатів з розширеними функціональними можливостями.

Виходячи з поставленої мети, **основними завданнями** дисертаційних досліджень є наступні:

1. Аналіз використання та стану досліджень мотор-шпинделів.
2. Генетичні принципи структуроутворення і макрогенетичні програми МША;
3. Методологія міждисциплінарного синтезу мотор-шпиндельних агрегатів;
4. Синтез і аналіз гібридних структур мотор-шпиндельних агрегатів багатогоординатного руху;
5. Організація і аналіз результатів еволюційних експериментів.

Об'єкт дослідження – процеси еволюційного структуроутворення функціонального класу «Мотор-шпинделі» (МШ) для металообробних верстатів з інтелектуальним керуванням.

Предмет дослідження – принципи структуроутворення гібридних електромеханічних систем з компонентами різної генетичної природи, агрегатно-модульний принцип проєктування, результати генетичного синтезу міжсистемних гібридів, генетичний каталог синтезованих структур МША.

Методи досліджень – структурно-системний підхід, теорія генетичної еволюції електромеханічних систем, технологія структурного передбачення, генетичне моделювання, методи генетичного аналізу і синтезу, еволюційні

експерименти.

Вперше розроблено узагальнену генетичну модель синтезу гібридних ЕМ-структур багатокоординатних мотор-шпиндельних агрегатів, синтезовані двокоординатний, три трикоординатних та чотирикоординатний мотор-шпиндельні апарати, розроблено генетичний каталог синтезованих структур багатокоординатних мотор-шпиндельних агрегатів з адаптивною просторовою структурою. За результатами досліджень розроблено стартап-проект.

Синтезовані варіанти структур багатокоординатних МША та розроблений генетичний каталог слугують основою для подальшої розробки оригінальних конкурентоспроможних технічних рішень.

Запропоновані конструкції МША можна віднести до нового етапу технічної еволюції мотор-шпинделів, характерною особливістю якого є модульний принцип і можливість адаптації структури МША до вимог багатокоординатного простору функціонування. Багатокоординатні МША забезпечують широкий діапазон технологічних операцій і режимів металообробки, а також різні варіанти модульної реалізації, опцій та інтерфейсу. Вони призначені для спеціалізованої обробки деталей і вузлів складної просторової форми на верстатах з ЧПК і багатокоординатних металообробних центрах.

Основний текст – 116 сторінок. Таблиць – 19. Рисунків – 42. Додатків – 2. Джерел – 35.

Розділ 1. Сучасні тенденції у створенні і застосуванні мотор-шпинделів.

1.1. Використання мотор-шпинделів.

Шпиндельні двигуни є значною частиною сучасного промислового виробництва. Вони відомі своєю високою швидкістю обертання та точністю. Ці двигуни широко використовуються в різних галузях промисловості та цінуються за їх надійність, ефективність і продуктивність [1]. Деякі види використання шпиндельних двигунів включають:

- Двигуни, що можуть забезпечити точне керування та високу швидкість обертання, тому вони є корисними для різання, свердління та формування металу.
- Системи, які контролюють швидкість і крутний момент різних механізмів, таких як конвеєрні стрічки, пакувальні машини та складальні лінії.
- Шпиндельні двигуни змінного струму, які зазвичай використовуються у верстатах з ЧПК та виробничих інструментах з комп'ютерним керуванням для точної обробки деталей складних форм.
- Вони використовуються в деревообробному обладнанні, такому як фрезерні верстати, формувальні машини та пилки.
- Друкарські верстати використовують шпиндельні двигуни для приводу роликів і циліндрів, які переносять чорнило на папір та інші матеріали.
- Медичне обладнання, стоматологічні бормащини та хірургічні інструменти використовують шпиндельні двигуни через їх високу швидкість і точність, і вони майже необхідні для делікатних процедур.

Однією із сучасних тенденцій розвитку машинобудування і, зокрема її серцевини – верстатобудування, є високошвидкісна (HSC – High Speed Cutting), високопродуктивна (HPC – High Production Cutting) і прецизійна (High Precision Cutting) обробка деталей. Для цього в приводах головного руху верстатів з числовим програмним керуванням використовують високошвидкісні і

прецизійні шпиндельні вузли з різними опорами (кочення, гідростатичні і гідродинамічні, аеростатичні і аеродинамічні, магнітні і комбіновані), що дозволяє забезпечити частоти обертання в токарних верстатах до 10-20 тис. об/хв, а в свердлильнофрезерних і шліфувальних до 100-200 тис. об/хв і вище.

Працездатність верстата в значній мірі визначається точністю обертання шпинделя, статичною і динамічною жорсткістю шпиндельних вузлів, гранично допустимою частотою обертання, нагрівом, несучою спроможністю і довговічністю підшипників.

Серед виробників мотор-шпинделів є такі країни: Німеччина, Італія, Японія, Франція, Китай, та в інші. Найвідоміші виробники в цих країнах: DMU, Franz Kessler, NSK, Cytac Weiss, Diebold, Antecs, ELTE, Henninger, IMT, FANUC, KITAGAWA, HOWA, SUDA, SIEMENS, SAUTER, GRUNDFOS, DIPLOMATIC, SMW AUTOBLOC [2].

1.2. Двокоординатні мотор-шпиндельні агрегати.

Аналіз сучасних тенденцій в адаптивній еволюції мотор-шпинделів показує, що одним з перспективних напрямів їх удосконалення є створення багатокоординатних мотор-шпиндельних агрегатів, призначених для функціонування у складі металообробних центрів і верстатів з цифровими системами керування. Багатокоординатна обробка вважається елітою сучасних процесів металообробки. Провідні виробники сучасних МШ створюють широкий спектр інноваційних високотехнологічних продуктів, щоб задовольнити найвищі вимоги цифрового автоматизованого виробництва. Останнім часом набули широкого використання мотор-шпиндельні агрегати з просторово адаптивною структурою приводних ЕМ-систем, які реалізують складні багатокоординатні рухи робочого органу (рис. 1.1). Такі агрегати використовуються для спеціалізованої, універсальної та загальної обробки надскладних деталей і вузлів [1-5].

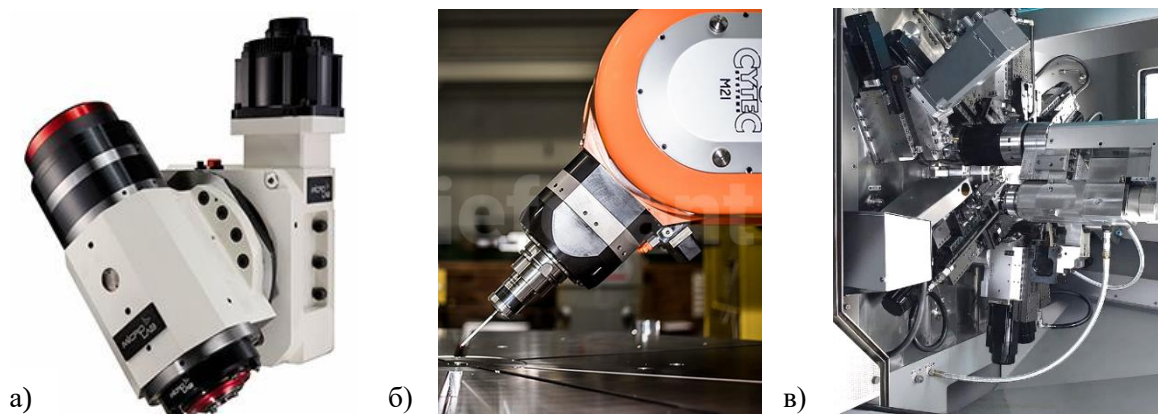


Рис. 1.1. Сучасні інтелектуальні металообробні центри оснащені просторово адаптивними мотор-шпиндельними агрегатами: а) поворотний шпиндельний агрегат компанії MicroLab Precision Technology Co., Ltd., MicroLab; б) фрезерна шпиндельна головка CYTEC; в) багатошпиндельний автомат з ЧПУ MS40-8 компанії INDEX.

Компанія CyTec Zylindertechnik GmbH є одним із виробників багатокоординатних мотор-шпиндельних агрегатів. Це німецька багатонаціональна компанія, яка обслуговує ринок високотехнологічних деталей машин. Вона була заснована в 1994 році як фахівець у самоблокуючих циліндрах. Завдяки політиці постійного розвитку CyTec увійшла у сектор затискних машин та інструментів. Поява стандартних інструментів HSK у 1994 році дозволила Cytec у співпраці з відомим німецьким виробником верстатів розвинути шпиндельну технологію. Ці амбіції зробили Cytec одним з основних виробників мотор-шпинделів. У 2002 році Cytec розробив першу вилкову (рис. 1.2) фрезерну головку з власними двигунами. Ця технологія прямого приводу зараз використовується щонайменше в тисячі осьових двигунів.

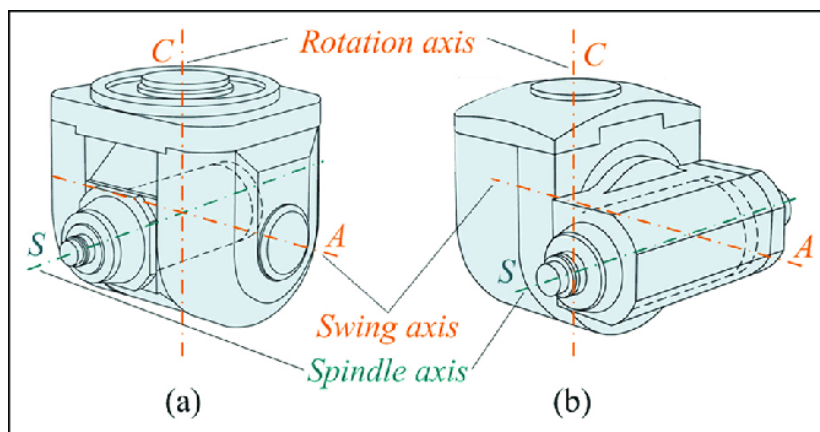


Рис. 1.2. Двороторна фрезерна головка: (а) вилковий тип і (б) зміщений тип.

CyTec Systems GmbH розробляє та виробляє серійно двоосьові фрезерні головки з прямим приводом (рис. 1.3), мотор-шпинделі з поворотними головками та поворотні столи найвищої потужності. Технологія приводу працює з усіма популярними сучасними системами керування з ЧПК.

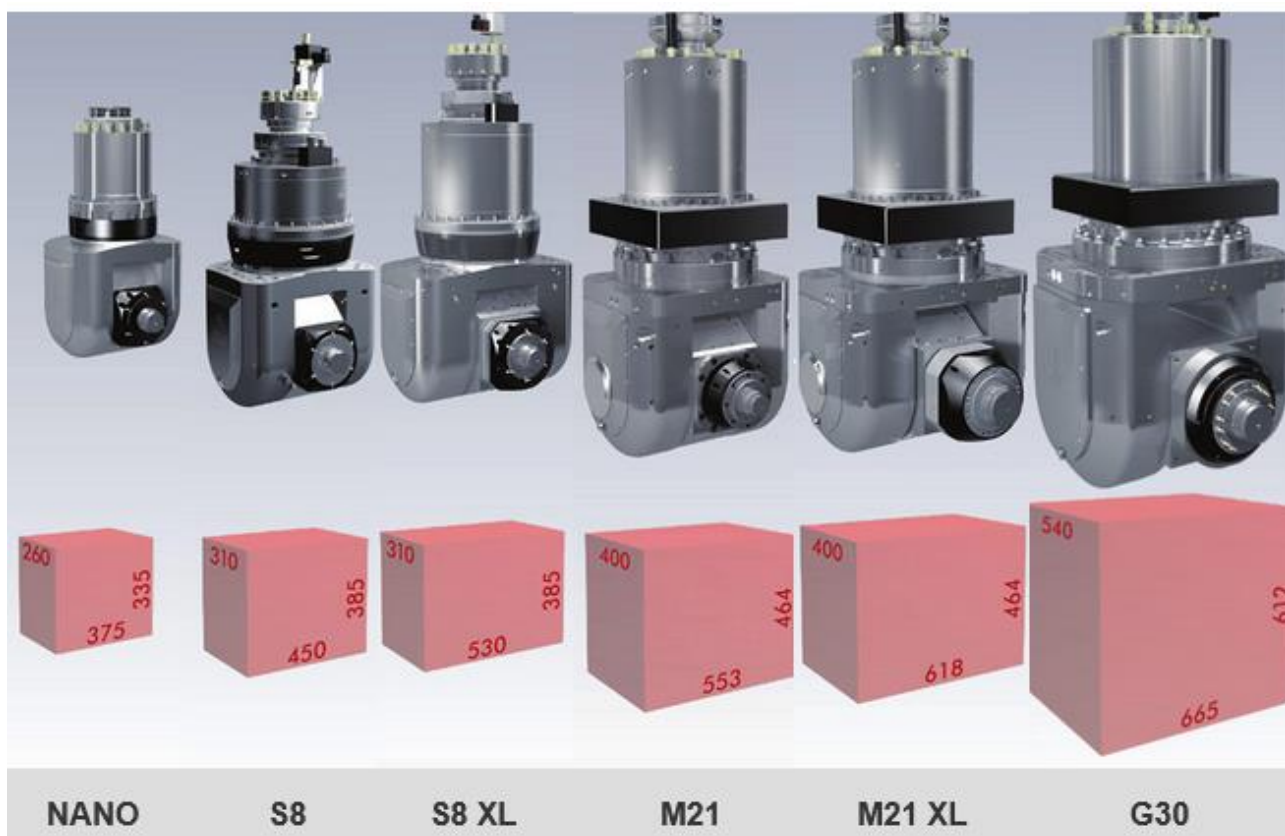


Рис. 1.3. Серії двоосьових фрезерних головок з прямим приводом компанії CyTec Systems GmbH.

Прикладом нестандартного просторового розташування мотор —

шпинделів є технологія, яка поєднує два окремих спеціалізованих двигуни шпинделя в одному корпусі шпинделя — один призначений для виконання чорнової обробки з високим крутним моментом, а інший — для високошвидкісної чистової обробки [3] (рис. 1.4).

Така просторова композиція забезпечує гнучкість технологічного процесу з можливістю виконувати як чорнові, так і чистові операції. Наприклад, існують конструкції коробки передач, які дозволяють верстату працювати на низьких обертах за хвилину з високим крутним моментом для чорнової обробки або з більшою швидкістю шпинделя для легких чистових різів. Крім того, допоміжні високошвидкісні шпинделі можуть бути встановлені в головний шпиндель машини з високим крутним моментом, щоб вона також могла виконувати чистові роботи.



Рис. 1.4. Концепція нетрадиційного (кутового) розташування модулів шпинделів в технології подвійного приводу DDT фірми Reiden Technik (Швейцарія).

Гідравлічний контур використовується для зачеплення кутового двигуна шпинделя з високим крутним моментом через муфту конічної передачі, у той час як двигун шпинделя з високою швидкістю обертається. Коли гідравлічний контур вимкнено, конічна шестерня двигуна шпинделя з високим крутним моментом втягується, щоб можна було використовувати високошвидкісний

шпиндель.

ЧПК верстата автоматично вибирає двигун шпинделя, який буде використовуватися, на основі швидкості шпинделя, зазначеної в програмі обробки деталей (спеціальне програмування не потрібне). Наприклад, модель RX10 із DDT використовує шпиндельний двигун із високим крутним моментом потужністю 36,6 кінських сил і вагою 214,6 футів на швидкості шпинделя 3000 об/хв або менше. Для вищих обертів шпинделя (до 16 000 об/хв) він використовує високошвидкісний двигун шпинделя, який забезпечує 37,5 кінських сил і 61,2 фут-фунт крутного моменту. (Ці значення відрізняються для більших моделей RX14 і RX18, які мають тригональні головки/головки з обертанням). Модель RX10 з DDT використовує інтерфейс шпинделя HSK63, тоді як моделі RX14 і RX18 з DDT використовують інтерфейс шпинделя HSK 100.

1.3. Електричні двигуни головного руху та подачі мотор-шпинделів.

Електродвигуни головного руху.

Мотор-шпиндель — це шпиндель з прямим приводом, де двигун, який зазвичай є трифазним асинхронним двигуном, розташований безпосередньо на головному шпинделі між кріпленнями шпинделя. Ротор встановлюється термоусадкою безпосередньо на вал шпинделя. Тепло, що виникає внаслідок великих втрат потужності, частково розсіюється через рідинне охолодження або іноді через повітряне охолодження статора.

У порівнянні зі звичайними приводами, мотор-шпинделі характеризуються високим ступенем жорсткості на кручення. Іншими перевагами мотор-шпинделя є компактна конструкція двигуна, тихий і точний хід шпинделя навіть при дуже низьких швидкостях обертання, а також визначення швидкості двигуна і положення шпинделя за допомогою датчика обертання.

Залежно від діаметра шпинделя, мотор-шпинделі з роликовими підшипниками в даний час можуть досягати максимальної швидкості понад 30

000 об/хв, тоді як мотор-шпинделі з пневматичними підшипниками досягають швидкості до 120 000 об/хв. Крім того, можна досягти максимального крутного моменту до 750 Нм.

Тому призначення шпинделя сильно впливає на вибір кріплення. Використовуються синхронні, асинхронні двигуни, а також безконтактні двигуни постійного струму.

Асинхронні двигуни є найпоширенішим типом двигунів, які використовуються у верстатах з ЧПУ через їх низьку вартість і надійність. Безконтактні двигуни постійного струму стають все більш популярними в висококласних верстатах із надзвичайною швидкістю та точністю [4].

Електродвигуни механізму подачі.

Електроприводи механізмів подачі, згідно з технічними вимогами, повинні забезпечувати: широкий діапазон регулювання частоти обертання електродвигуна, високу стабільність вихідних характеристик, стабільність частоти обертання, високу швидкодію при перехідних процесах розгону та гальмування, високу швидкодію при «накиданні» та «скиданні» навантаження та при реверсі під навантаженням на малих частотах обертання, високу рівномірність руху при різному навантаженні всіх частотах обертання тощо.

Раніше в механізмах подачі, переважно, використовувалися високомоментні електродвигуни постійного струму з транзисторними широтно-імпульсними перетворювачами. Особливістю сучасних високомоментних електродвигунів є зниження моменту інерції в 1,5-2 рази і високий рівень захисту від довкілля. Основний недолік цих електродвигунів – наявність колектора, який ускладнює конструкцію електродвигуна, знижує його надійність та потребує додаткового обладнання.

В електроприводах механізмів подачі верстатів з ЧПУ та промислових робіт широко застосовуються вентильні електроприводи, що слідкують, на базі серійних широкорегульованих перетворювачів частоти. Багато електроприводів оснащені спеціальними пристроями, що підвищують їх динамічні характеристики в області малих частот обертання в результаті

збільшення коефіцієнта посилення регулятора частоти обертання та зміни постійного часу. Необхідно відзначити, що тиристорні перетворювачі частоти обертання на даний час не набули широкого застосування через необхідність використання додаткових громіздких комутувальних блоків.

В діапазоні моментів до 70Нм транзисторні перетворювачі для високомоментних електродвигунів практично повністю замінили тиристорні. Частота комутації транзисторів становить 2-5 кГц, деякі малопотужні електроприводи – до 20 кГц, що дозволило значно зменшити рівень шуму.

Застосування транзисторних перетворювачів з використанням силових модулів, мікросхем середнього та високого ступеня інтеграції та термостабілізованих елементів дозволило створити багатоосьові (понад 8) малогабаритні конструкції електроприводів з високими енергетичними, динамічними (смуга пропускання до 800 Гц) та статичними характеристиками. Для більшості роботів, діропробивних пресів, верстатів для свердління друкованих плат та інших швидкодіючих механізмів широко використовуються спеціальні швидкодіючі електродвигуни.

Вентильні електродвигуни, що застосовуються в механізмах подачі верстата, характеризуються:

- Відсутністю обмежень щодо комутації перевантажувальної здатності;
- Постійним моментом прискорення, що визначається з основною механічною міцністю;
- Малим моментом інерції та високою швидкодією (прискорення до 36000 рад/с² полюси пропускання до 200Гц);
- Відсутністю втрат у роторі;
- Широким діапазоном регулювання та рівномірністю обертання;
- Практично не вимагають обслуговування через відсутність щітковоколекторного вузла;
- Мають малу вагу та габарити;
- захист електродвигуна від впливів зовнішнього середовища.

Вони характеризуються широким діапазоном регулювання швидкості.

Модульна конструкція перетворювача є найбільш оптимальною, при цьому перетворювач складається з модуля живлення для всіх координат та окремих осевих комутаторів із системою управління. Модуль живлення здійснює випрямлення напруги живильного середовища та згладжування пульсацій напруги за допомогою конденсаторів [5].

У випадках, коли потрібна висока точність роботи виконавчих механізмів, використовують асинхронний електродвигун з енкодером зворотного зв'язку. Однак у промислових верстатах з особливими вимогами до точності позиціонування подібне обладнання не впорається із завданнями через низку конструктивних недоліків — низький момент на малих швидкостях, прослизання ротора, інерцію при розгоні та гальмуванні. У таких випадках використовуються сервоприводи та крокові двигуни.

До складу сервоприводу входять серводвигун та електронний блок управління – сервопідсилювач або сервоперетворювач (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Сервопривод Delta ASD-A2

Як серводвигуни найбільш широко застосовують синхронні трифазні електродвигуни, в яких встановлені потужні постійні магніти для поліпшення динамічних характеристик. Обов'язковим компонентом сервоприводу є енкодер. Як правило, він перевершує за своїми параметрами звичайні енкодери, що поставляються окремо. Його роздільна здатність може досягати сотень тисяч імпульсів на оборот, за рахунок чого досягається надточне позиціонування.

Наприклад, роздільна здатність вбудованих енкодерів сервоприводів Delta ASD-A2 становить 1 280 000 імп/об.

Сервопідсилювач отримує два сигнали управління - сигнал завдання швидкості (або кута повороту) і сигнал зворотного зв'язку з енкодера. В результаті сервопривід забезпечує рух будь-якого механічного навантаження з великою точністю не тільки за швидкістю обертання, але і по куту повороту, який може бути витриманий до часток градуса.

Кроковий двигун - це особливий вид багатофазного синхронного двигуна, дискретне обертання якого проводиться шляхом подачі імпульсів напруги на потрібні обмотки статора. У цьому ротор немає обмоток і складається з магнітного матеріалу.

Основний параметр крокового двигуна - його крок або кількість кроків на оборот. Для одного повного обороту ротора потрібна строго певна кількість імпульсів. Чим менший крок, тим більшу точність позиціонування може забезпечити цей кроковий двигун.

Керуючі імпульси формуються спеціальним драйвером, який отримує завдання з контролера. При цьому зворотний зв'язок не потрібно, оскільки шляхом підрахунку імпульсів завжди можна дізнатися, на який кут повернувся вал крокового двигуна, і скільки оборотів він зробив.

Сервоприводи мають наступні переваги:

- Потужність серводвигунів може досягати 15 кВт, тоді як потужність крокового електродвигуна зазвичай не перевищує 1 кВт.
- Безшумність роботи завдяки принципу дії та надточному виконанню конструкції.
- Швидкість обертання в сервоприводах може досягати 10000 об/хв, у деяких випадках більше. У крокових двигунів номінальна швидкість обертання зазвичай не перевищує 1000 об/хв внаслідок падіння моменту та збільшення ймовірності помилок.
- Висока енергоефективність. Споживана потужність сервоприводу пропорційна навантаженню на валу. Для крокового електродвигуна споживана

потужність однакова незалежно від навантаження.

- Наявність зворотного зв'язку забезпечує точною інформацією про поворот валу будь-якої миті часу. У крокових двигунах можливе прослизання при перевантаженні, накопичення помилки та втрата позиціонування.
- Велика плавність ходу. У крокових двигунах досягти плавності можна лише шляхом застосування спеціальних методів керування.

Серед переваг крокових двигунів можна навести наступні:

- Найменша ціна при однаковій потужності в силу більш простої конструкції двигуна та драйвера.
- Можливість роботи на екстремально низьких оборотах без погіршення характеристик та застосування редукторів.
- Точніше позиціонування, обумовлене конструкцією двигуна.
- Відсутність потреби у зворотному зв'язку.
- Для фіксації валу двигуна під час зупинки достатньо зняти з нього напругу.
- При зупинці серводвигуна необхідно витратити потужність на утримання або використовувати електромеханічне гальмо.

У промисловому устаткуванні виконання завдань позиціонування має сенс використовувати і асинхронні двигуни із зворотним зв'язком, і сервоприводи, і крокові двигуни.

Сервоприводи встановлюються у тих вузлах устаткування, де потрібно точне позиціонування механізмів їхнього синхронізації коїться з іншими вузлами. Зокрема сервоприводи широко використовують у обробних верстатах.

Крокові двигуни знайшли найбільше застосування у верстатах з ЧПУ та у робототехніці.

Насправді зустрічаються виробничі лінії, у яких у різних вузлах використовуються всі три типу електродвигунів [6].

1.4. Висновки до розділу 1.

1. За рахунок своєї точності, швидкості, надійності та ефективності мотор-шпинделі широко використовуються в металообробці, машинобудуванні,

верстатобудуванні, в деревообробній промисловості, медицині, та в багатьох інших галузях.

2. Провідні виробники сучасних мотор-шпинделів створюють широкий спектр мотор-шпиндельних агрегатів з просторово адаптивною структурою приводних ЕМ-систем, які реалізують складні багатокоординатні рухи робочого органу. Але, як показує аналіз результатів патентного пошуку, на даний час багатокоординатні мотор-шпиндельні агрегати майже не досліджені, а їх практичне використання обмежується агрегатами двокоординатного руху.

3. В приводі мотор-шпинделя використовуються синхронні, асинхронні двигуни, а також безщіточні двигуни постійного струму. Призначення мотор-шпинделя сильно впливає на вибір кріплення.

В якості електроприводів механізмів подачі верстатів з ЧПУ та промислових роботів використовуються високомоментні електродвигуни постійного струму з транзисторними широтно-імпульсними перетворювачами, вентильні електроприводи, що слідкують, асинхронні двигуни з енкодером зворотного зв'язку. У промислових верстатах з особливими вимогами до точності позиціонування використовуються сервоприводи та крокові двигуни.

Розділ 2. Генетичні принципи структуроутворення гібридних структур мотор-шпинделів.

2.1. Макрогенетична програма функціонального класу мотор-шпинделів.

Макрогенетична програма містить повну інформацію стосовно генетично допустимої кінцевої множини породжувальних структур, інваріантних до рівня технічної еволюції і структурної складності, і визначається за заданою функцією пошуку в межах предметної області ГК (макрогенетичні програми), або в межах відповідного Виду ЕМ-об'єктів (програми мікрогенетичного рівня).

Сформулюємо часткові вимоги для визначення макрогенетичної програми двигунів головного руху і допоміжних електроприводів досліджуваного функціонального класу М-Ш для металообробних верстатів:

- забезпечення високошвидкісного обертального (головного) руху шпинделя (ω_1);
- можливість реалізації незалежного керованого поступального, або зворотно-поступального руху (руху подачі, осьового натягу) шпинделя (V_1);
- забезпечення структурно-функціонального суміщення валу двигуна з шпинделем ($f_\omega \times f_s$);
- можливість забезпечення функції безконтактних магнітних опор (магнітного підвісу) шпинделя (f_m);
- можливість реалізації допоміжної функції електромагнітного затиску різального інструменту шпинделя (f_e);
- можливість забезпечення допоміжного приводу вентилятора (насоса, компресора) підсистеми охолодження (f_c);
- можливість реалізації багатошпиндельних (мультишпиндельних) варіантів приводних структур (f_n);
- забезпечення відкритості до розширення функцій і забезпечення інтелектуалізації системи (f_i).

Інтегральну функцію пошуку макрогенетичної програми можна

представити у вигляді комплексного вектору в багатовимірному пошуковому просторі R^n предметної області ГК:

$$F_{MS} \rightarrow [\omega_1, V_1, (f_\omega \times f_s), f_m, f_e, f_c, f_n, f_i] \subset R^n \quad (2.1)$$

Наявність часткових вимог 1 та 2 обмежує область пошуку елементним базисом першого великого періоду ГК. На даному етапі не враховуються також електромагнітні хромосоми-ізотопи. З врахуванням результатів генетичного аналізу по визначенню генетичної схильності електромагнітних хромосом до реалізації заданих часткових функцій, структуру макрогенетичної програми можна представити наступними горизонтальними гомологічними рядами батьківських електромагнітних хромосом:

$$P_{EШ} = (H_{00y}, H_{00x}, H_{02y}, H_{20x}, H_{22y}, H_{22x}), \quad (2.2)$$

де: $H_{00y} = (CL0.0y, KN0.0y, PL0.0y, TP0.0y, SF0.0y, TC0.0y), \quad (2.3)$

$$H_{00x} = (CL0.0x, KN0.0x, PL0.0x, SF0.0x), \quad (2.4)$$

$$H_{02y} = (CL0.2y, KN0.2y, PL0.2y, TP0.2y, SF0.2y, TC0.2y), \quad (2.5)$$

$$H_{20x} = (CL2.0x, KN2.0x, SF2.0x), \quad (2.6)$$

$$H_{22y} = (CL2.2y, KN2.2y, PL2.2y, TP2.2y, SF2.2y, TC2.2y), \quad (2.7)$$

$$H_{22x} = (CL2.2x, KN2.2x, PL2.2x, SF2.2x), \quad (2.8)$$

З врахуванням генетичної еквівалентності складових генетичної інформації батьківських хромосом групи 2.2:

$$PL2.2y = PL2.2x, \text{ і } SF2.2y = SF2.2x. \quad (2.9)$$

Кінцева множина породжувальних структур функціонального класу МШ в макрогенетичній програмі представлена 27 електромагнітними хромосомами базового рівня. За видом просторового руху, зазначена кінцева множина електромагнітних хромосом поділяється на дві підмножини - з реалізацією обертального руху (M_ω):

$$M_\omega = (*H_{00y}, *H_{02y}, *H_{22y}), \quad (2.10)$$

та з реалізацією поступального руху (M_V):

$$M_V = (*H_{00x}, *H_{20x}, *H_{22x}), \quad (2.11)$$

з врахуванням того, що до складу хромосомних рядів $*H_i \in M_\omega$, не входять хромосоми Роду плоских, а до складу підгруп $*H_i \in M_V$, не входять

електромагнітні хромосоми Роду сферичних, структури-нащадки яких можуть забезпечувати лише обертальний рух.

Генетичний підхід до задач синтезу має низку суттєвих переваг і значно скорочує часові і матеріальні ресурси, особливо на етапах пошукового проектування і прийняття рішень при створенні складних ЕМ-систем. В концепції генетичної еволюції ЕМ-систем, системну основу їх структуроутворення становлять генетичні програми. Генетична програма є необхідною складовою довільної генетично організованої системи. Під генетичною програмою розуміється кінцева множина електромагнітних хромосом, які разом з генетичними принципами структуроутворення, визначають генетично допустиму структурну різноманітність і межі генетичної мінливості структур-нащадків.

2.2. Принцип гібридизації електромеханічних структур.

Одна з домінуючих тенденцій в еволюції просторово адаптивних технічних систем безпосередньо пов'язана зі створенням та широким використанням гібридних об'єктів, агрегатів та комплексів. Широке поширення гібридів пояснюється притаманним лише їм унікальним властивостям, зокрема, здатністю до міжсистемної гібридизації з компонентами різної генетичної природи і можливістю отримання нового емерджентного ефекту, ознаки якого відсутні у первинних батьківських формах. Стрімкому розповсюдженню гібридів у техніці і в технологіях сприяє також тенденція зростання складності систем. Априорі можна стверджувати, що довільна складна технічна система в своїй структурі є гібридною.

Процес зростання різноманітності гібридних технічних комплексів, що суміщують різні за фізичною природою компоненти (механічні, електромеханічні, гідравлічні, електронні, інформаційні, біологічні, ...), який фактично відбувається за умови відсутності системної теорії їх структуроутворення і методології міждисциплінарного синтезу, зумовлює необхідність їх структурно-системних досліджень і теоретичних узагальнень.

Моделі і методи хромосомної гібридизації ЕМ-структур, отримали експериментальне підтвердження за результатами постановки еволюційних експериментів. Її основні положення можна узагальнити наступними висновками:

- гібридні ЕМ-об'єкти мають генетичну природу, тому що основу їх структуроутворення визначає загальносистемний принцип схрещування вихідних (батьківських) електромагнітних хромосом, генетичні коди яких відрізняються складовими генетичної інформації;
- функцію системного носія універсальних генетичних кодів електромагнітних хромосом, що підлягають схрещуванню, виконує періодична структурою ГК первинних джерел електромагнітного поля (електромагнітних хромосом);
- системну основу структуроутворення гібридних ЕМ-структур виконує принцип схрещування складових генетичної інформації, який моделюється відповідним оператором схрещування в процедурах генетичного синтезу;
- процеси структурної гібридизації моделюються на хромосомному рівні структурної організації ЕМ-об'єктів;
- відповідно з принципом збереження генетичної інформації, синтезовані гібридні електромагнітні хромосоми виконують функцію породжувальних по відношенню до відповідних гібридних Видів ЕМ-об'єктів;
- системними носіями інформації виступають генетичні програми, наділені прогностичною функцією стосовно генетично допустимих гібридних класів ЕМ-структур;
- довільна гібридна хромосома виконує функцію породжувальної по відношенню до відповідного Виду гібридних ЕМ-об'єктів;
- процеси гібридизації можуть відбуватися на різних рівнях структурної організації ЕМ-систем: хромосомному, внутрішньовидовому, внутрішньородовому, міжродовому та міжсистемному рівнях.
- гібридні структури-нащадки наділені емерджентними властивостями, тобто містять нові ознаки, які відсутні у вихідних структурах;

- теоретичною основою для аналізу та синтезу гібридних ЕМ-структур є генетичні моделі схрещувань конвергентного типу та методи генетичної комбінаторики;
- достовірність теоретичних положень генетичного структуроутворення та еволюції гібридних ЕМ-об'єктів перевіряється постановкою еволюційних експериментів.

Логічним підтвердженням системності принципів генетичного структуроутворення стало [7]. Під гібридизацією розуміємо процеси структуроутворення, які здійснюються на основі принципу схрещування електромагнітних хромосом, що відрізняються складовими генетичної інформації в структурі їх універсальних генетичних кодів. Гібрид (від лат. *hibrida*, *hybrida* — помісь) — об'єкт, який отримано за результатами схрещування генетично різних форм. Принцип схрещування — один з фундаментальних генетичних механізмів багаторівневого структуроутворення в ГОС, який знімає таксономічні і функціональні обмеження на шляху утворення складних міжсистемних комплексів, які можуть суміщувати структурно-інформаційні компоненти різної генетичної природи. Якщо принцип схрещування має системну природу, яка інваріантна до фізичної природи ГОС, то закон гібридизації відтворює його конкретне (виражене в кількісному вигляді) твердження, яке справедливо тільки до первинних елементів конкретної фізичної природи.

Принцип схрещування визначається структурою генетичних кодів електромагнітних хромосом. Універсальний генетичний код довільної хромосоми містить послідовність трьох складових генетичної інформації, які визначають родову геометрію, електромагнітну симетрію і топологічні властивості (зв'язність та орієнтованість) довільного первинного джерела електромагнітного поля (рис. 2.1). Родова геометрія має статус узагальненої по відношенню до локальної геометрії конкретних Видів ЕМ-об'єктів, що входять в структуру Роду. Локальна геометрія Виду визначається ознаками відповідного топологічного простору (друга складова генетичного коду).

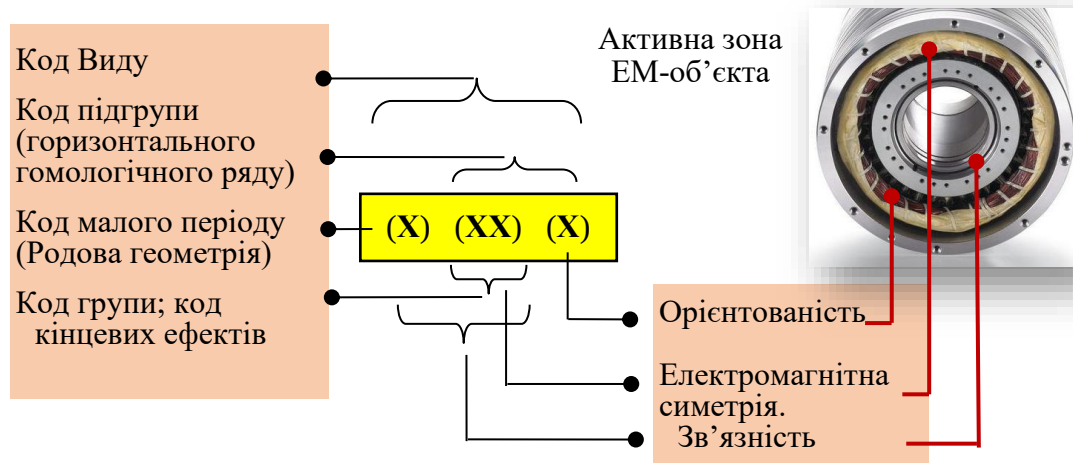


Рис. 2.1. Взаємозв'язок складових генетичної інформації універсального генетичного коду електромагнітної структури з структурою таксонів, груп, підгруп і періодів ГК та генетичним ядром ЕМ-об'єкта.

Складові генетичної інформації однозначно визначають структуру активної зони довільного ЕМ-об'єкта – його просторову геометрію і топологію активної поверхні, електромагнітну симетрію полюсотвірної системи і просторову структуру магнітного поля, наявність поздовжніх і поперечних кінцевих електромагнітних ефектів та інше. Генетичний код фактично є квінтесенцією періодичного закону і виступає носієм інваріантної генетичної інформації первинного джерела електромагнітного поля, яка залишається незмінною в ряду поколінь – нащадків.

На внутрішньовидовому рівні гібридне структуроутворення моделюється через механізми схрещувань первинної і вторинної електромагнітних хромосом. Первинні хромосоми упорядковуються періодичною структурою ГК і мають статус батьківських. В загальному випадку фізичний стан, генетична природа, структура і складові інформації вторинних хромосом можуть мати суттєві відмінності по відношенню до первинних. В переважній більшості вторинні хромосоми виконують функцію рухомих, по відношенню до первинних, наприклад:

$$(PL\ 2.2y)_1 \times [(CL\ 0.2y)_2 : M_R]_2 \quad (2.12)$$

де: $(PL\ 2.2y)_1$ і $(CL\ 0.2y)_2$ – генетичні коди первинної і вторинної рухомої

електромагнітних хромосом відповідно; M_R – оператор структурної мутації вторинної хромосоми.

Генетично допустимі схрещування на внутрішньородовому і міжродовому рівнях визначаються законом гібридизації, математичну основу якого визначають правила комбінаторики з врахуванням виду і кількості складових генетичної інформації, що підлягають схрещуванню [14]. За кількістю складових генетичної інформації що схрещуються, розрізняють моно-, ди- і полігібридне схрещування. Як відомо, зазначену термінологію механізмів схрещувань в біології вперше ввів у науковий обіг Грегор Мендель. Але аналогічні варіанти схрещувань мають місце і для довільних пар електромагнітних хромосом. Для їх аналізу, прийнемо наступні обмеження:

- аналізуються схрещування між двома довільними первинними хромосомами ($N_C = 2$), які мають відмінності в структурі генетичних кодів;
- простір схрещувань обмежується елементно-інформаційним базисом першого великого періоду ГК;
- в даному дослідженні не враховується простір схрещувань на рівні електромагнітних хромосом – ізотопів;
- не розглядаються внутрішньовидові схрещування (між первинними і вторинними хромосомами), які потребують самостійного системно-генетичного аналізу.

Процедуру гібридизації для довільної пари електромагнітних хромосом можна представити виразом:

$$C_A \times C_B \subset H_{AB} \quad (2.13)$$

де: C_A і C_B – батьківські електромагнітні хромосоми, що підлягають схрещуванню ($C_A \neq C_B$); H_{AB} – гібридна хромосома.

Генетичну інформацію хромосом C_A і C_B представимо у вигляді універсальних генетичних кодів:

$$C_A = (a_1, a_2, a_3); \quad C_B = (b_1, b_2, b_3); \quad (2.14)$$

де: $a_1, a_2, a_3; b_1, b_2, b_3$ – складові генетичної інформації в структурі генетичного коду, які можуть мати часткове, або повне їх неспівпадіння.

Тоді механізми моногібридного схрещування допускають синтез наступних трьох класів гібридних структур:

- геометричних (просторових) моногібридів (класу G):

$$H_G = (a_1) \times (b_1) \subset G \quad (2.15)$$

Структури геометричних моногібридів можуть утворюватися лише за результатами міжродового схрещування гомологічних хромосом, які мають ідентичні другу і третю складові генетичних кодів ($a_1 \neq b_1$; $a_2 = b_2$; $a_3 = b_3$).

- електромагнітних моногібридів (класу E):

$$H_E = (a_2) \times (b_2) \subset E \quad (2.16)$$

Моногібриди електромагнітного типу можуть бути синтезовані лише на внутрішньородовому рівні шляхом схрещування хромосом з ідентичною родовою геометрією і орієнтованістю, але з різною групою електромагнітної симетрії ($a_2 \neq b_2$; $a_1 = b_1$; $a_3 = b_3$) .

- топологічних моногібридів (класу T):

$$H_T = (a_3) \times (b_3) \subset T \quad (2.17)$$

Топологічні моногібридні структури утворюються за результатами внутрішньородового схрещування електромагнітних хромосом, які належать до однієї групи і відрізняються лише за топологічною ознакою орієнтованості ($a_3 \neq b_3$; $a_1 = b_1$; $a_2 = b_2$). Так як топологічна ознака орієнтованості безпосередньо пов'язана з принципом парності первинних джерел електромагнітного поля на хромосомному рівні і структурами ЕМ-об'єктів – двійників – на об'єктному рівні, топологічні моногібриди також називаються двійниковими.

Аналогічно, результати дигібридного схрещування породжують наступні три класи дигібридних ЕМ-структур:

- дигібриди геометрично-електромагнітного типу ($a_1 \neq b_1$; $a_2 \neq b_2$; $a_3 = b_3$)

$$H_{GE} = [(a_1 \times b_1), (a_2 \times b_2)] \subset GE \quad (2.18)$$

Дигібридні структури геометрично-електромагнітного типу є результатом міжродового схрещування двох довільних хромосом, які належать до різних груп симетрії, але мають ідентичну електромагнітну орієнтованість.

- дигібриди електромагнітно-топологічного типу ($a_2 \neq b_2$; $a_3 \neq b_3$; $a_1 = b_1$):

$$H_{ET} = [(a_2 \times b_2), (a_3 \times b_3)] \subset ET \quad (2.19)$$

Гібридні структури класу **ET** можуть бути синтезовані лише за результатами внутрішньородового схрещування двох хромосом з різним типом орієнтованості, які належать до різних груп електромагнітної симетрії.

- дигібриди геометрично - топологічного типу ($a_1 \neq b_1; a_3 \neq b_3; a_2 = b_2$):

$$H_{GT} = [(a_1 \times b_1), (a_3 \times b_3)] \subset GT \quad (2.20)$$

Геометрично-топологічні ЕМ-структури є результатом міжродового схрещування електромагнітно симетричних хромосом з різним типом орієнтованості. Область існування гібридів класу **GT** обмежується лише хромосомами, що належать до двох груп електромагнітної симетрії 0.0 і 2.2.

За результатами схрещування ($a_1 \neq b_1; a_2 \neq b_2; a_3 \neq b_3$), утворюється лише один клас структур полігібридного типу, батьківські хромосоми яких будуть мати відмінності за всіма складовими генетичної інформації:

$$H_{GTE} = [(a_1 \times b_1), (a_2 \times b_2), (a_3 \times b_3)] \subset GTE \quad (2.21)$$

Механізм схрещування (10), який визначає структурний потенціал класу полігібридів **GTE**, належить до сценарію генетично віддаленого схрещування, який може бути реалізований за умови, що схрещувані хромосоми *A* і *B* є негомологічними, мають різну родову приналежність і відрізняються за ознакою електромагнітної орієнтованості.

Формули структуроутворення (4 – 10) вичерпують генетично допустиму законом комбінаторику схрещування складових генетичної інформації (для $N_C = 2$), визначають кількісний склад, встановлюють структуру співвідношень між класами моно-, ди-, і полігібридних ЕМ-об'єктів і становлять символічну форму подання закону гібридизації електромагнітних хромосом.

Генетично допустимі варіанти комбінаторного структуроутворення гібридних класів ЕМ-структур (3.4 – 3.10), можна узагальнити наступним визначенням: «За результатами схрещування двох довільних електромагнітних хромосом, генетичні коди яких відрізняються складовими генетичної інформації, утворюється один з семи допустимих варіантів гібридних хромосом першого покоління з генотиповим співвідношенням 3:3:1, які виконують

функцію породжувальних для відповідних 7 класів гібридних ЕМ-об'єктів – нащадків: - трьох класів моногібридів (**G**, **T**, **E**), трьох класів об'єктів дигібридного типу (**GT**, **GE**, **ET**) і одного класу полігібридів (**GET**)». Зазначена вербальна форма подання закону інваріантна до видової і родової приналежності батьківських хромосом, їх генетичних кодів, часу еволюції, структурної складності і функціональної приналежності об'єктів – нащадків, що задовольняє статусу закону. Не важко помітити наявність системних ізоморфних паралелей даного закону по відношенню до закону незалежного комбінування ознак біологічної гібридизації Грегора Менделя, закону кратних відношень Джона Дальтона в хімії сполук, принципів синтезу акордів в теорії музики і моделей гібридизації електронних орбіталей атомів Лайнуса Полінга.

Простір гібридного структуроутворення можна також представити симетричною матрицею (табл. 2.1), яка визначає комбінаторику і вид генетично допустимих схрещувань за кількістю і типом складових генетичної інформації. Головна діагональ матриці визначає генетично допустимі класи гібридних ЕМ-структур. Кожна гібридна хромосома виконує функцію породжувальної по відношенню до відповідного Виду гібридних ЕМ-об'єктів, різноманітність і потужність яких в структурній еволюції, буде визначатися генетичною схильністю схрещуваних хромосом, їх родовою приналежністю і накладеними обмеженнями.

Таблиця 2.1. Діагональна матриця простору допустимих схрещувань двох довільних електромагнітних хромосом.

Складові генетичної інформації хромосоми <i>B</i>		Складові генетичної інформації хромосоми <i>A</i>						
		<i>m</i> = 1			<i>m</i> = 2			<i>m</i> = 3
		<i>a</i> ₁	<i>a</i> ₂	<i>a</i> ₃	<i>a</i> ₁ , <i>a</i> ₂	<i>a</i> ₂ , <i>a</i> ₃	<i>a</i> ₁ , <i>a</i> ₃	<i>a</i> ₁ , <i>a</i> ₂ , <i>a</i> ₃
<i>m</i> = 1	<i>b</i> ₁	G	0	0	0	0	0	0
	<i>b</i> ₂	0	E	0	0	0	0	0
	<i>b</i> ₃	0	0	T	0	0	0	0
<i>m</i> = 2	<i>b</i> ₁ , <i>b</i> ₂	0	0	0	GE	0	0	0
	<i>b</i> ₂ , <i>b</i> ₃	0	0	0	0	ET	0	0
	<i>b</i> ₁ , <i>b</i> ₃	0	0	0	0	0	GT	0
<i>m</i> = 3	<i>b</i> ₁ , <i>b</i> ₂ , <i>b</i> ₃	0	0	0	0	0	0	GET

де, *m* – кількість схрещуваних складових генетичних кодів; 0 – складові

генетичної інформації генетичних кодів, які не підлягають схрещуванню.

Матричний спосіб подання закону відтворює взаємозв'язок між співвідношенням моно-, ди- і полігібридними класами, кількістю і комбінаторикою схрещуваних складових генетичної інформації ($m = 1,2,3$), рівнем складності та узагальненими системними властивостями (просторовою геометрією, електромагнітною симетрією і топологією) гібридних хромосом, які визначають кількісний склад і спадкові ознаки гібридних структур – нащадків.

Відкриття закону гібридизації електромагнітних і електромеханічних об'єктів має важливе значення для упорядкування знань і подальшого розвитку методологічних основ генетичної систематики (рис. 2.2).

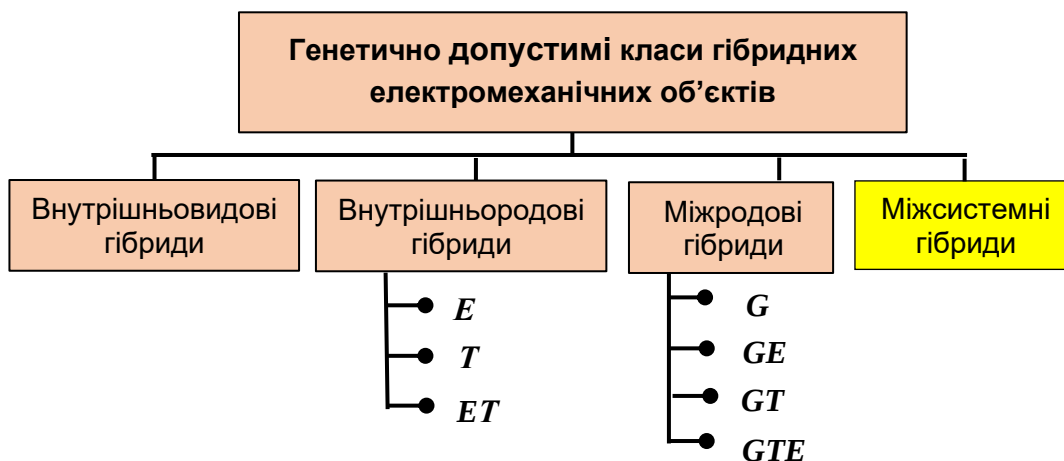


Рис. 2.2. Класифікація генетично допустимих класів гібридних ЕМ-об'єктів.

Результати аналізу внутрішньородових і міжродових схрещувань відкрили можливість отримання прогностичної інформації щодо кількісного складу генетично допустимих гібридних Видів базового рівня (N_H), в межах визначених законом гібридних класів ЕМПЕ (рис. 2.3).

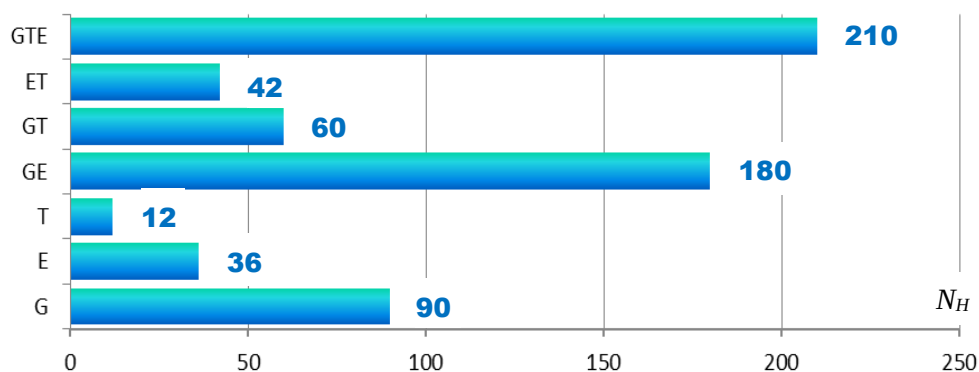


Рис. 2.3. Кількісний склад генетично допустимих Видів, в межах визначених законом семи класів гібридних електромеханічних перетворювачів енергії.

Достовірність генетичних принципів і моделей гібридного структуроутворення та їх відповідність реальним процесам технічної еволюції об'єктів електромеханіки, перевірялася за результатами постановки еволюційних експериментів. Реалізація експериментів здійснювалась за програмами геномно-історичних і еволюційно-прогностичних експериментів [33]. Геномно-історична частина експериментів визначалася на основі генетичного аналізу даних патентно-інформаційних досліджень (за класичним сценарієм еволюції, що спостерігається, $T_E = 76$ років, кількість еволюційних подій – $N_E = 46$), в межах визначених законом класів гібридних ЕМ-об'єктів. Результати еволюційних експериментів підтвердили наявність в технічній еволюції представників всіх семи визначених законом класів гібридних ЕМ-об'єктів, а також визначили їх видовий склад (рис. 2.4).

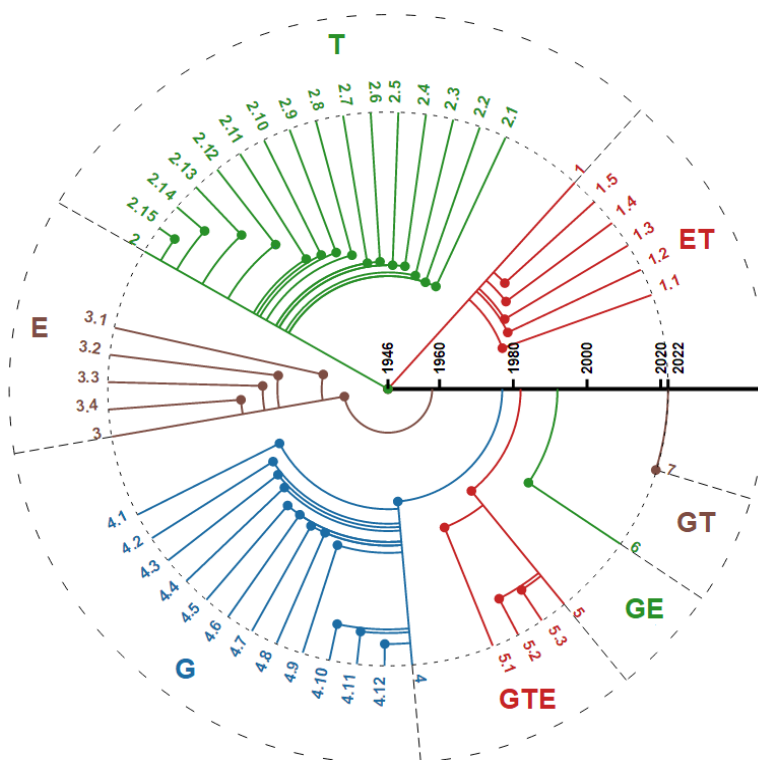


Рис. 2.4. Філогенетична діаграма технічної еволюції класів гібридних ЕМ-об'єктів ($T_E = 76$ років; $N_E = 46$)

Реалізація програми еволюційно-прогностичних експериментів здійснювалась на основі розробки оригінальних технічних рішень, гібридні структури яких були вперше виявлено і синтезовано за результатами генетичного передбачення з наступною їх технічною розробкою і патентуванням, що еквівалентно цілеспрямованому їх введенню в технічну еволюцію (реалізація сценарію керованої структурної еволюції за період 2010 – 2020 р.р. [30,34]. Результати еволюційних експериментів підтверджують достовірність принципів і моделей хромосомного структуроутворення гібридних ЕМ-об'єктів – нащадків і технологію генетичного передбачення їх нових Видів і класів.

За результатами експериментів встановлено, що на сучасному рівні еволюції об'єктів електромеханіки домінують структурні представники моногібридних (G , T , E) і дигібридних (ET) Видів, структури яких характеризуються простотою технічної реалізації і наявністю стійкого емерджентного ефекту. Незважаючи на істотне поширення гібридних об'єктів, в

технічній еволюції об'єктів електромеханіки задіяно не більше 5 % видового складу від генетично допустимого структурного потенціалу гібридних Видів.

На даний час технічної еволюції електромеханіки переважна більшість гібридних Видів ЕМ-структур мають статус неявних, а їх дослідження і адаптивна технічна еволюція ще чекають на своїх дослідників.

2.3. Модульний принцип в структуроутворенні МШ.

Одним із ключових напрямків розвитку вітчизняного і світового верстатобудування є перехід до агрегатно-модульного принципу компоновки верстатів із окремих комплектних вузлів-модулів. Агрегатно-модульний принцип широко використовується при створенні сучасних автоматизованих виробництв з гнучко переналагоджувальною технологією. Технологічне обладнання, побудоване із застосуванням агрегатно-модульного принципу, широко застосовують у сучасному машинобудуванні при масовому і великосерійному виробництвах, для яких характерне сталість технологічного процесу обробки, що виконується або верстатом, або групою верстатів.

Практика машинобудування вказує на те, що раціональна просторова композиція (компоновка) верстата має великий вплив на його якість та точність. Вдалий вибір компоновки, пропорцій, розташування вузлів, забезпечує необхідну спрямованість та спеціалізацію верстата, його відповідність певним технологічним та іншим вимогам, високі техніко-економічні показники якості.

Переваги агрегатно-модульного принципу побудови пов'язані з можливістю отримання спеціалізованих машин, що найбільш повно відповідають вимогам конкретної технологічної задачі, не мають надмірності функцій і тому дешевші в порівнянні з універсальними ПР. Вузли агрегатно-модульних ПР вибирають із числа раніше розроблених вузлів (рис. 2.5). Це скорочує час і трудомісткість проектування, оскільки з'являється можливість використовувати вже існуючі конструкції та розширити номенклатуру ПР шляхом додавання нових вузлів та створення нових комбінацій на базі вже наявних рішень. Якщо вузли, що входять в агрегатну систему, досить

відпрацьовані, то надійність ПР суттєво зростає, чому сприяє також відсутність надмірності функцій та відповідність даної конструкції ПР виконуваної технологічної задачі. Обмежена номенклатура деталей, можливість прогнозування показників їх надійності та запровадження попереджувального ремонту поряд з єдиною системою комплектації сприяють підвищенню ремонтпридатності та експлуатаційної надійності конструкцій ПР. Агрегатно-модульна побудова дозволяє знизити витрати на виробництво ПР завдяки зменшенню номенклатури деталей та збільшенню серійності їх випуску.

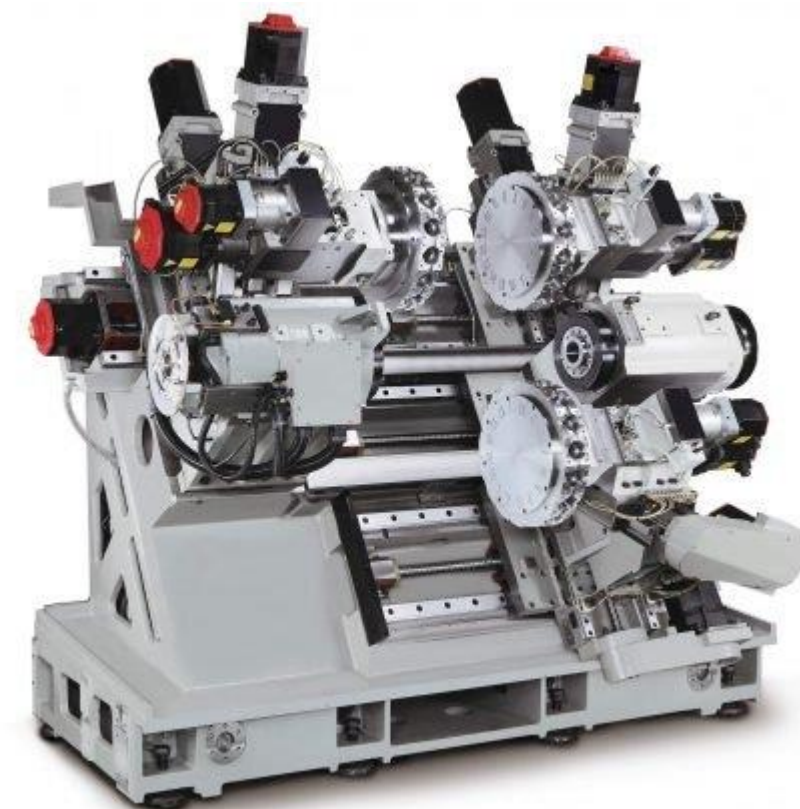


Рис. 2.5. Агрегатно-модульний багатofункціональний металообробний центр (фото компанії «АЛІСТА», Україна).

Перехід до сучасних методів проектування металорізальних верстатів за агрегатно-модульним принципом з застосуванням мотор-шпинделів і електромеханічних модулів нагально вимагає розробки нової концепції проектування верстатів і розробки методології моделювання динаміки пружної системи верстату по частинах (підсистемах, вузлах), що являє актуальну

науково-технічну проблему. Її вирішення дозволить на стадії проектування оцінити і забезпечити високу динамічну якість верстату, спроектованого за агрегатно-модульним принципом, а також відповідно (як наслідок) підвищити точність і продуктивність обробки на верстаті, що проектується.

Сучасний рівень технічної реалізації модульних мотор-шпинделів і багатошпиндельних агрегатів характеризується великою різноманітністю їх просторових варіацій. Зазначені просторові композиції мають генетичну природу і моделюються через відповідні оператори генетичного синтезу.

Модульний принцип – це один з ефективних напрямів структурно-функціональної оптимізації, стандартизації, уніфікації та дизайну технічних об'єктів. В методології проектування модульний підхід орієнтований на максимальне використання однотипних вузлів або елементів, при створенні складних систем, в умовах сучасного автоматизованого виробництва.

В теорії генетично організованих систем блочно-модульна організація є технічним результатом реалізації генетичних принципів реплікації і ізомерії. Реплікація - один з фундаментальних принципів генетичного структуроутворення, який реалізується через збільшення кількісного складу генетично визначених структур, які забезпечують передачу спадкової інформації в ряду поколінь, від первинних елементів (батьківських хромосом) до багатоелементних об'єктів-нащадків.

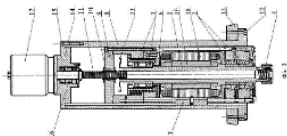
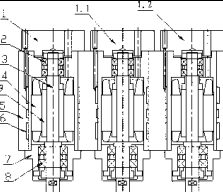
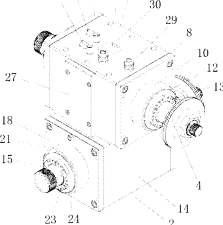
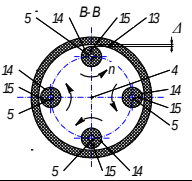
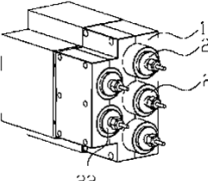
В концепції генетичного структуроутворення, багатошпиндельні агрегати є результатом синтезу з домінуванням оператора реплікації R , який безпосередньо пов'язаний з утворенням відповідної ізомерної групи, відповідальної за варіанти просторових композицій багатоелементної структури в тривимірному просторі R^3 :

$$R(s) \rightarrow (s_1, s_2, \dots, s_n) \subset R^3 \quad (2.22)$$

Генетичний аналіз (табл. 2.2) показує, що основу структуроутворення багатошпиндельних вузлів модульного типу становлять оператори реплікації і ізомерії, які в комбінації з операторами схрещування та структурної мутації визначають широкий спектр їх просторових композицій в сучасному

верстатобудуванні.

Таблиця 2.2. Детерміновані взаємозв'язки між операторами генетичного синтезу і просторовими композиціями мотор-шпинделів модульного типу.

Тип просторової композиції в R3	Генетичні оператори	Приклад технічної реалізації
Осьова	Реплікація, ізомерія, схрещування	
Паралельна	Реплікація, ізомерія	
Ортогональна	Реплікація, мутація, ізомерія	
Осесиметрична	Реплікація, мутація, ізомерія	
Кутова	Мутація, реплікація, ізомерія	
Матрична	Реплікація, просторова ізомерія	
Радіально-агрегатна	Схрещування, ізомерія	

2.4. Методи моделювання і синтезу структурних мутацій .

Як відомо, ключову роль в генетичному структуроутворенні систем зі

спадковістю відіграють генно-хромосомні мутації, які виступають ефективним інструментом структурно-інформаційної адаптації генотипу до мінливих вимог і факторів впливу зовнішнього середовища (фенотипу). Мутація (від лат. *mutatio* - зміна) належить до фундаментальних генетичних явищ, які визначають спадкову мінливість структур, відповідальних за зберігання і передачу генетичної інформації. Всі без винятку системи в процесі еволюції схильні до зміни власної генетичної програми шляхом мутацій.

Мутації в техніці – створювані свідомо (індуковані) стійкі порушення генетично визначених структур, відповідальних за збереження і передачу генетичної інформації, які успадковуються в ряду поколінь. Якщо в біології мутації розглядаються як основне і фактично єдине джерело адаптивної еволюції, то в теорії генетичного структуроутворення електромеханічних структур, мутація - один з п'яти принципів хромосомного структуроутворення, який визначає межі існування і генетично допустиму різноманітність мутованих об'єктів - нащадків. В еволюції систем штучної природи (в т.ч. технічних) функцію мутагена виконує інтелект людини – дослідника, або згенеровані нею комп'ютерні програми (наприклад, штучний інтелект). Структурні мутації в процесі синтезу реалізуються в комбінаціях з операторами реплікації, схрещування, кросинговеру та інверсії. За участю механізмів структурних мутацій змінюється генетична інформація, яка за рахунок порушення класичних принципів електромеханічного перетворення енергії, забезпечує відповідні емерджентні властивості об'єкту в конкурентній боротьбі. Кінцева мета довільної мутації – структурно-функціональна адаптація об'єкта до вимог фенотипу [25].

На відміну від мутацій біологічного типу, структурні мутації в еволюції об'єктів техніки, з врахуванням жорстких вимог конкурентного відбору, орієнтовані на забезпечення лише корисної функції, тому властиві їм порушення генетичної структури мають бути скомпенсовані відповідним емерджентним ефектом. Наявність такого співвідношення гарантує стійку спадковість мутацій в конкурентній еволюції поколінь технічних об'єктів (рис. 2.6).



Рис. 2.6. Приклади структурних мутацій в адаптивній еволюції механічного валу.

Результатами генетичного аналізу встановлено, що структурними еквівалентами хромосомних мутацій в ЕМ-об'єктах виступають порушення просторової або електромагнітної симетрії активних поверхонь, їх оптимальних геометричних співвідношень і пропорцій, просторової орієнтації або взаємного перекриття основних активних частин та ін. Переважна більшість таких структурних аномалій, які зберігаються і розмножуються протягом багатьох поколінь техніки, зумовлена необхідністю забезпечення їх конкурентоспроможності і унікальної адаптивної функції (рис. 2.7).

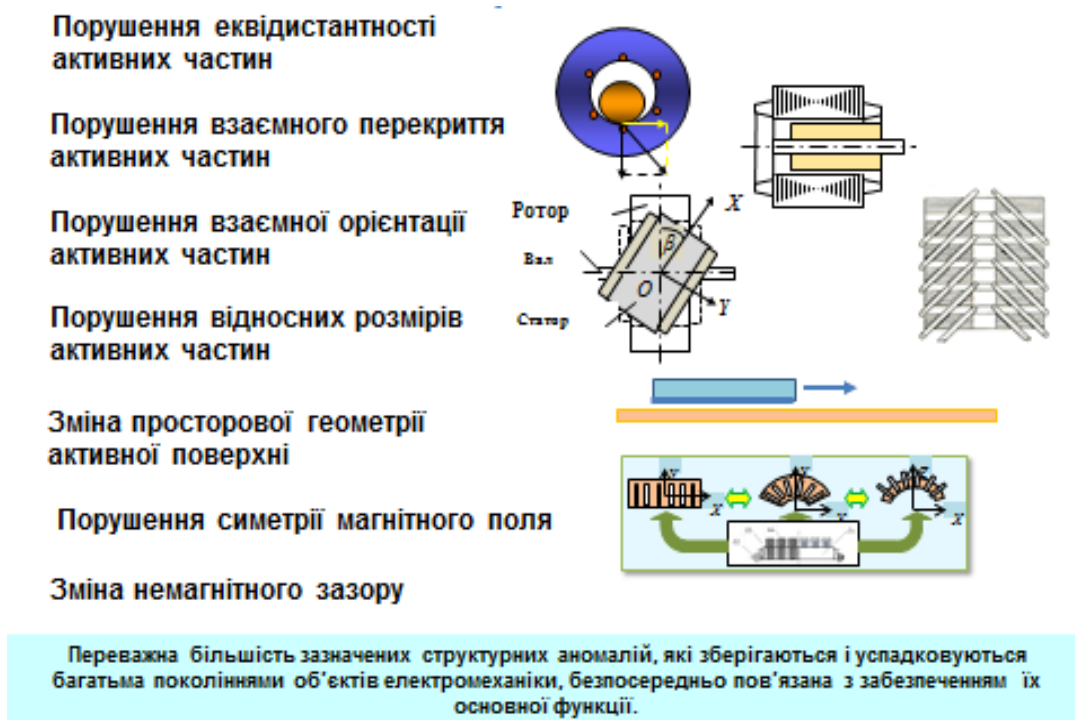


Рис. 2.7. Основні типи структурно-просторових мутацій в еволюції електричних машин.

Структурна організація довільних функціональних класів ЕМ-систем представлена ієрархічною послідовністю рівнів генетичної складності: хромосомним (Ch); об'єктним (Ob); видовим (Sp); системним (Gn) та метасистемним (Mt). Генетичний аналіз і результати геномно-еволюційних експериментів засвідчують, що найбільшою універсальністю наділені принципи структурної мутації і гібридизації (схрещування), які задіяні на всіх рівнях складності ЕМ-об'єктів (табл. 2.3).

Таблиця 2.3. Взаємозв'язок генетичних принципів структуроутворення з рівнями структурної складності ЕМ-об'єктів.

Генетичний оператор	Рівень структурної організації				
	Ch	Ob	Sp	Gn	Mt
Реплікація (R)	+	+	—	—	—
Схрещування (S)	+	+	+	+	+
Інверсія (I)	+	+	—	—	—
Кросинговер (C)	+	+	—	—	—

Мутація (M)	+	+	+	+	+
-----------------	---	---	---	---	---

Принцип міжвидової мутації пов'язаний зі зміною лише першої складової генетичного коду гомологічної хромосоми, що вказує на відповідну зміну родової приналежності ЕМ-структури, породжуючи послідовність структур з варіативною просторовою геометрією, в межах топологічного простору відповідної підгрупи R^T :

$$M(S) \rightarrow (S_{M1}, S_{M2}, \dots, S_{Mn}) \subset R^T \quad (2.23)$$

Найвищим рівнем просторової адаптивності наділені електромагнітно несиметричні хромосоми підгруп 2.2x і 2.2y. Наприклад, в межах підгрупи 2.2y просторова геометрія електромагнітних хромосом пов'язана відношенням групового гомеоморфізму в евклідовому просторі R^3 :

$$H_{22y} = (CL2.2y \leftrightarrow KN2.2y \leftrightarrow PL2.2y \leftrightarrow TP2.2y \leftrightarrow SF2.2y \leftrightarrow TC2.2y \leftrightarrow \dots) \subset R^3, \quad (2.24)$$

або у спрощеному поданні:

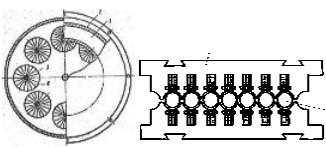
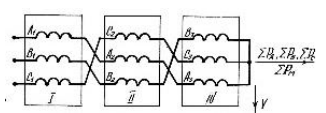
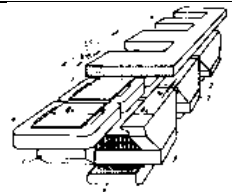
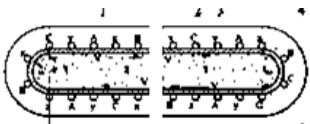
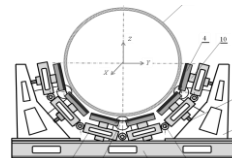
$$H_{22y} = (CL \leftrightarrow KN \leftrightarrow PL \leftrightarrow TP \leftrightarrow SF \leftrightarrow TC \leftrightarrow \dots)2.2y \subset R^3 \quad (2.25)$$

В прикладних задачах генетичного синтезу, оператору мутації M_i ставиться у відповідність група неперервних просторових деформацій (стиснення, розтягу, зсуву, повороту, кручення та ін.). Просторово-топологічні механізми міжвидових просторових мутацій вперше визначили межі структуроутворення і відкрили можливість створення нових класів модульних ЕМ-об'єктів з 2D і 3D – просторовою адаптацією активної зони, шляхом керованої зміни просторової геометрії і топології активної поверхні в процесі їх функціонування.

Структури мутованих хромосом моделюються в комбінаторному просторі двох, або більшої кількості генетичних операторів, які визначають рівень структурно-інформаційної складності і забезпечують необхідні адаптивні властивості ЕМ-структури з заданою цільовою функцією. Кожній стійкій комбінації генетичних операторів, через відповідну групу математичних перетворень, ставиться у відповідність певний тип структурної організації

об'єкта, який визначає генотип об'єктів - нащадків з відповідними функціональними і емерджентними властивостями (табл. 2.4).

Таблиця 2.4. Приклади стійких комбінацій електромагнітних хромосом за участю оператора мутації (M), в адаптивно-функціональній еволюції ЕМ-об'єктів (фрагмент генетичного банку даних).

Хромосомна комбінація*	Структурний еквівалент	Приклад з технічної еволюції
$(R \rightarrow M \rightarrow I_R)_2$ $(I_E)_1 \times (R \rightarrow M \rightarrow I_R)_2$	Просторові багатоеlementні (модульні) композиції ($K_i \subset R_3$) Багатороторні електродвигуни з інверсією магнітного поля	
$(R \rightarrow C)_1 \rightarrow (M)_2$	Групова симетризація фазних параметрів $N = km$, ($k = 1, 2, \dots$), транспозиція	
$(R)_1 \rightarrow (M)_2$ $(R)_1 \times (M \rightarrow R)_2$	Тягові модульні ЕМ-системи; Лінійні прискорювачі, рейкотрони; Електромагнітний транспорт (орієнтування) деталей	
$(M \rightarrow S)_2$ $(R \rightarrow M \rightarrow S)_2$	Двигуни з ротором, що котиться Гібридні планетарні мотор – редуктори	
$(I_E)_1 \rightarrow (M \rightarrow R)_2$ $(R \rightarrow I_E)_1 \times (M \rightarrow R)_2$	Електромеханічні дезінтегратори, Електромагнітні і електродинамічні сепаратори	
$(M_{S1} \rightarrow M_{S2} \rightarrow \dots)_1 \times (S)_2$	ЕМ-модулі - трансформери зі змінною просторовою геометрією активної поверхні	
$R (M_{S1} \rightarrow M_{S2} \rightarrow \dots)_1 \times S(M)_2$	Просторово розподілені модульні ЕМ-системи зі змінною просторовою геометрією і топологією активної поверхні	

*Індексми 1, 2 позначено первинні (батьківські) і вторинні електромагнітні хромосоми відповідно.

Результати постановки еволюційних експериментів підтверджують достовірність генетичних моделей мутагенезу. На даний час існує велика різноманітність електричних машин і електромеханічних пристроїв,

функціонування яких безпосередньо пов'язано зі зміною структури і геометрії їх активної зони як у просторі, так і в часі. В концепції структурно-системного підходу зазначені ЕМ-об'єкти належать до класу генетично мутованих, структурна і видова різноманітність яких визначається відповідними генетичними програмами, а їх функціональна еволюція вже триває протягом 75 років (рис. 2.8).

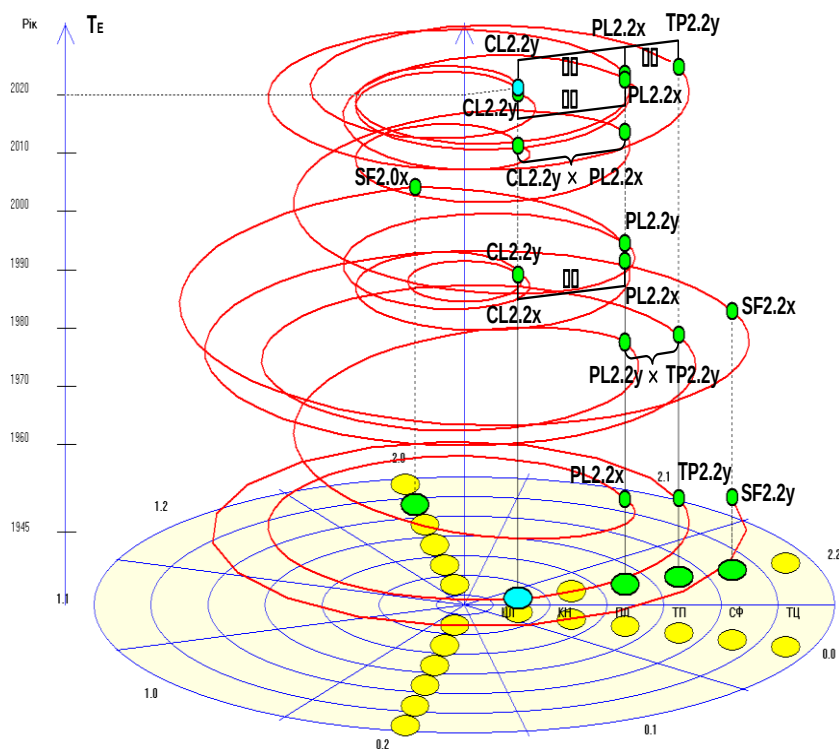


Рис. 2.8. Генетична еволюція електромеханічних перетворювачів енергії з структурними мутаціями активної зони ($T_E = 75$ років).

Хромосомна теорія структурних мутацій становить системну основу методології інноваційного синтезу просторово адаптивних ЕМ-структур, розробки оригінальних технічних рішень, а також розробки алгоритмів автоматизованого синтезу ЕМ-об'єктів з заданими адаптивними властивостями.

2.5. Інноваційний потенціал класу МШ.

Прогностична функція – одна з важливих функцій генетичних програм. Для генетичної програми довільного функціонального класу справедливе наступне співвідношення:

$$C_G = C_H + C_F, \quad (2.26)$$

де C_G – множина допустимих хромосом; C_H – множина вже задіяних в еволюції класу хромосом; C_F – хромосоми, які ще відсутні в еволюції класу на момент його аналізу.

Множина генетично допустимих хромосом C_G визначається за результатами аналізу макрогенетичної програми функціонального класу і становить 27 електромагнітних хромосом. За результатами еволюційного аналізу об'єктів ГБД встановлено, що на даний час еволюції класу, задіяні структурні представники 8 Видів базового рівня ($C_H = 8$). Наявність кількісного складу Видів в кінцевих множинах C_G і C_H дозволяє визначити складову C_F , яка містить інформацію стосовно неявних Видів, ще відсутніх на даний час технічної еволюції класу М-Ш, що становить конкретний результат макрогенетичного передбачення:

$$C_F = C_G - C_H = 27 - 8 = 19 \quad (2.27)$$

Отже, інноваційний потенціал функціонального класу Мотор-Шпинделів на даний час еволюції становить 19 Видів. Результати генетичного передбачення виконують роль вихідної інформації для постановки задач інноваційного синтезу нових структурних різновидів Мотор-Шпинделів і цілеспрямованого їх введення в еволюцію класу на рівні об'єктів і Видів. Зазначена послідовність процедур генетичного аналізу і синтезу визначає сутність стратегії керованої еволюції на рівні довільних функціональних класів технічних систем з генетичним ядром електромеханічного типу.

За результатами аналізу ГБД встановлено, що технічна еволюція класу М-Ш здійснюється у відповідність з їх макрогенетичною програмою. На поточний час, в еволюції класу задіяні структурні популяції 8 Видів базового рівня (29,6%) з 27 генетично допустимих генетичною програмою. Переважна кількість генетично допустимих Видів (70,4%), мають статус неявних, тобто ще відсутніх на даний час еволюції класу М-Ш:

$$H_{00y} = (CL_{0.0y}, KN_{0.0y}, PL_{0.0y}, TP_{0.0y}, SF_{0.0y}, TC_{0.0y}), \quad (2.28)$$

$$H_{00x} = (CL_{0.0x}, KN_{0.0x}, PL_{0.0x}, SF_{0.0x}), \quad (2.29)$$

$$H_{02y} = (SF_{0.2y}, TC_{0.2y}), \quad (2.30)$$

$$H_{20x} = (SF_{2.0x}), \quad (2.31)$$

$$H_{22y} = (KN_{2.2y}, TP_{2.2y}, SF_{2.2y}, TC_{2.2y}), \quad (2.32)$$

$$H_{22x} = (KN_{2.2x}, SF_{2.2x}) \quad (2.34)$$

На підставі системного аналізу макрогенетичних програм, вченими кафедри електромеханіки ФЕА і кафедри конструювання верстатів ММІ здійснено синтез і розробку патентоспроможних технічних рішень з генетичними кодами $PL_{0.2y}$, $3CL_{0.2y}$; та $3PL_{0.2y}$, які є першими представниками нових Видів, що засвідчує можливість цілеспрямованого введення в еволюцію нових Видів (шляхом зміни статусу неявних в категорію реально-інформаційних Видів) і тим самим, реалізувати стратегію керованої еволюції в межах досліджуваного класу технічних систем.

2.6. Висновки до розділу 2.

1) Макрогенетична програма класу мотор-шпинделів складається з 27 хромосом.

2) Види мотор-шпинделів можуть підлягати гібридизації.

3) Основу структуроутворення багатошпиндельних вузлів модульного типу становлять оператори реплікації і ізомерії.

4) Для синтезу мотор-шпиндельних агрегатів можна застосовувати структурно-просторові мутації разом з іншими генетичними операторами.

5) Визначено інноваційний потенціал, який складається з 19 видів, ще відсутніх в еволюції класу мотор-шпинделів, а саме: $H_{00y} = (CL_{0.0y}, KN_{0.0y}, PL_{0.0y}, TP_{0.0y}, SF_{0.0y}, TC_{0.0y})$; $H_{00x} = (CL_{0.0x}, KN_{0.0x}, PL_{0.0x}, SF_{0.0x})$; $H_{02y} = (SF_{0.2y}, TC_{0.2y})$; $H_{20x} = (SF_{2.0x})$; $H_{22y} = (KN_{2.2y}, TP_{2.2y}, SF_{2.2y}, TC_{2.2y})$; $H_{22x} = (KN_{2.2x}, SF_{2.2x})$.

Розділ 3. Методологія міждисциплінарного синтезу мотор-шпиндельних агрегатів.

3.1. Просторово-функціональна адаптація в генетичній еволюції технічних систем.

Одна з сучасних тенденцій у розвитку мобільних технічних систем пов'язана з переходом від класичних жорстких форм і моноструктур до просторово розподілених структур з адаптивною просторовою геометрією, функціонування яких максимально наближено до природних аналогів. Зазначена тенденція зумовлена зростанням вимог до розширення функціональних можливостей, покращення масогабаритних показників, підвищення енергоефективності і надійності технічних систем на основі використання новітніх матеріалів, штучного інтелекту, адитивних і когнітивних технологій та широкого впровадження цифрових електронних систем автоматичного керування.

Адаптація – одно з центральних понять в еволюції складних систем різної фізичної природи. Термін «адаптація» походить від пізньолатинського «*adaptio*» (пристосування), який вперше введений в науковий обіг німецьким фізіологом Г. Аубертом у 1864 р. В процесі еволюції складних систем адаптація виконує важливу функцію пристосування генетично визначеної структури до мінливих зовнішніх умов її функціонування. В живій природі адаптація є одним з необхідних і важливих факторів у боротьбі за існування.

Просторово-функціональна адаптація є також одним з основних чинників промислової революції Industry 4.0, де високий рівень ефективності планується реалізувати за рахунок систем автоматизації трудомістких фізичних операцій виробничих і суміжних процесів. За висновками експертів, без високого рівня просторово-функціональної сумісності, створити ефективну технологічну систему в концепції «Industry 4.0» неможливо. Просторово адаптивні системи і технології на даний час використовуються в сучасній авіації, космічній і

військовій техніці, електроніці, автомобілебудуванні, робототехніці, верстатобудуванні та інших наукоємних технічних галузях.

В генетично організованих системах (ГОС) механізми адаптації визначають здатність технічного пристрою або системи пристосовуватися до мінливих зовнішніх впливів шляхом зміни власної структури, або алгоритму поведінки [8].

Новітній напрям у розвитку техніки ще не отримав однозначного визначення і зустрічається під різними термінологічними назвами: «еластична механіка», «машини і механізми з адаптивною морфологією», «м'яка робототехніка», «гнучка електроніка», «адаптивні роботи», «реконфігуровані системи», «антропоморфні роботи – трансформери», тощо. Огляд літератури і результати патентних досліджень засвідчують, що системний аналіз структурної організації просторово адаптивних систем в електромеханіці практично відсутній і на даний час обмежується описом їх окремих технічних реалізацій лише на об'єктному рівні. Тому визначення генетичних принципів адаптивного структуроутворення і аналіз особливостей функціонування просторово розподілених електромеханічних систем (ЕМ-систем) є актуальною науково-практичною задачею.

Теоретико-методологічною основою дослідження процесів адаптації є фундаментальні положення генетичної еволюції електромеханічних систем [9]. З відкриттям генетичної класифікації первинних джерел електромагнітного поля і розробкою на її основі теорії генетичної еволюції ЕМ-систем, створено науково-методичні основи організації структурно-системних досліджень довільних функціональних класів з можливістю передбачення їх нових Видів і функціональних класів. За результатами аналізу макrogenетичних програм встановлено, що принципи структурно-просторової адаптації можуть бути реалізовані на чотирьох рівнях структурної організації ЕМ-систем (табл. 3.1).

Таблиця 3.1. Рівні просторово-структурної адаптації електромеханічних об'єктів та систем.

Рівень організації ЕМ-системи	Тип адаптації	Критерії адаптації
Системний	Функціональна, структурно-просторова	Просторова конфігурація і кількість адаптивних модулів ЕМ-системи
Видовий	Структурно-функціональна	Комбінаторні варіанти генетичних операторів внутрішньовидового структуроутворення
Об'єктний	Функціональна, структурно-параметрична	Структура і геометрія активної зони; просторова орієнтація; параметри (напруга, частота, порядок чергування фаз)
Хромосомний	Інформаційно-прогностична	Генетична схильність Е-хромосом, топологія, просторова геометрія, структурна ізопопія, гомологія, ізомерні композиції

Наявність адаптивних властивостей на рівні електромагнітних хромосом вперше виявлено і описано авторами у 2002 р. [7]. В структурі ГОС хромосомний рівень є визначальним, так як генетична інформація елементно-інформаційного базису ГК визначає принципи структурної організації і системні властивості структур – нащадків більш високого рівня складності.

Генетичний аналіз здійснюється на елементно-інформаційному базисі періодичної структури генетичної класифікації первинних джерел електромагнітного поля. На хромосомному рівні визначаються межі існування досліджуваного класу ЕМ-об'єктів, його таксономія, макрогенетичні програми структуроутворення, генетично допустима видова різноманітність та здійснюється передбачення нових Видів, схильних до просторової адаптації в структурі довільних функціональних класів ЕМ-систем - нащадків. Основними критеріями адаптації виступають просторова геометрія і топологія активної поверхні, група електромагнітної симетрії та генетична схильність електромагнітної хромосоми до реалізації заданої функції. Лише на хромосомному рівні можна отримати системну інформацію стосовно кінцевої множини первинних електромагнітних структур, генетична інформація яких задовольняє сукупності заданих критеріїв адаптації. Високоупорядкована системна інформація хромосомного рівня містить великі і важливі для

дослідника обсяги прогностичної інформації, яка визначає принципи структуроутворення і становить основу унікальної методології інноваційного синтезу на об'єктного, видовому та системному рівнях (рис. 3.1).

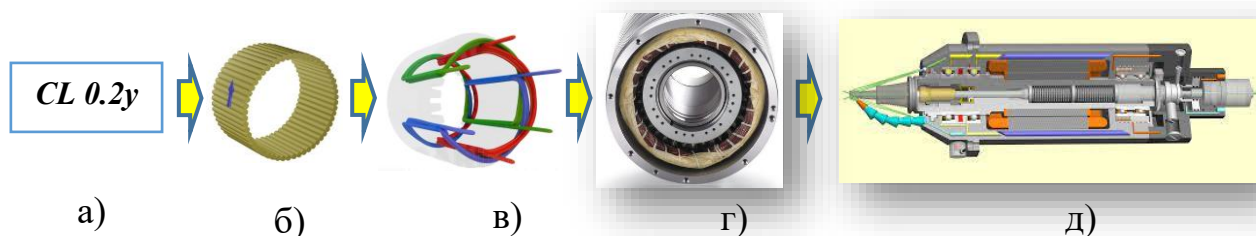


Рис. 3.1. Рівні адаптивного структуроутворення складних ЕМ-систем: а) генетичний (генетичний код); б) хромосомний (електромагнітна хромосома); в) структурний (структурна модель генетичного ядра); г) об'єктний (індуктор електричної машини); д) системний (високошвидкісний МШ – міжсистемний гібрид).

Об'єктний рівень, який для об'єктів класичної «жорсткої» електромеханіки традиційно представлений моделями і методами лише параметричної адаптації, в концепції структурно-системного підходу, доповнюється можливостями структурно – просторової адаптації, яка відкриває нові напрями реалізації функціональних можливостей. Механізми просторової адаптації об'єктного рівня є потужним джерелом структурно-функціональної різноманітності технічних систем, за умови незмінності їх генетичної структури (генетичного коду або структурної формули) (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Класифікація способів технічної реалізації ЕМ-об'єктів з просторово адаптивною активною зоною.

Адаптивні можливості видового рівня визначаються широким діапазоном внутрішньовидової мінливості, яка забезпечуються загальносистемними принципами генетичного структуроутворення – реплікації, схрещування, інверсії, кросинговеру і мутації. Для кожного Виду ЕМ-об'єктів існує свій генетично визначений простір структурної адаптації, який визначається складовими генетичної інформації (генетичним кодом) породжувальної батьківської електромагнітної хромосоми. В межах домінуючого Виду здійснюється моделювання ізомерних просторових композицій, які визначають межі існування і принципи структуроутворення просторово адаптивних ЕМ-структур - нащадків. Важливе значення мають системні знання напрямів функціональної адаптації ЕМ-систем. Функціональна адаптація належить до еволюційних процесів, які відбуваються одночасно на родовому, видовому, популяційному і об'єктному рівнях (рис. 3.3).

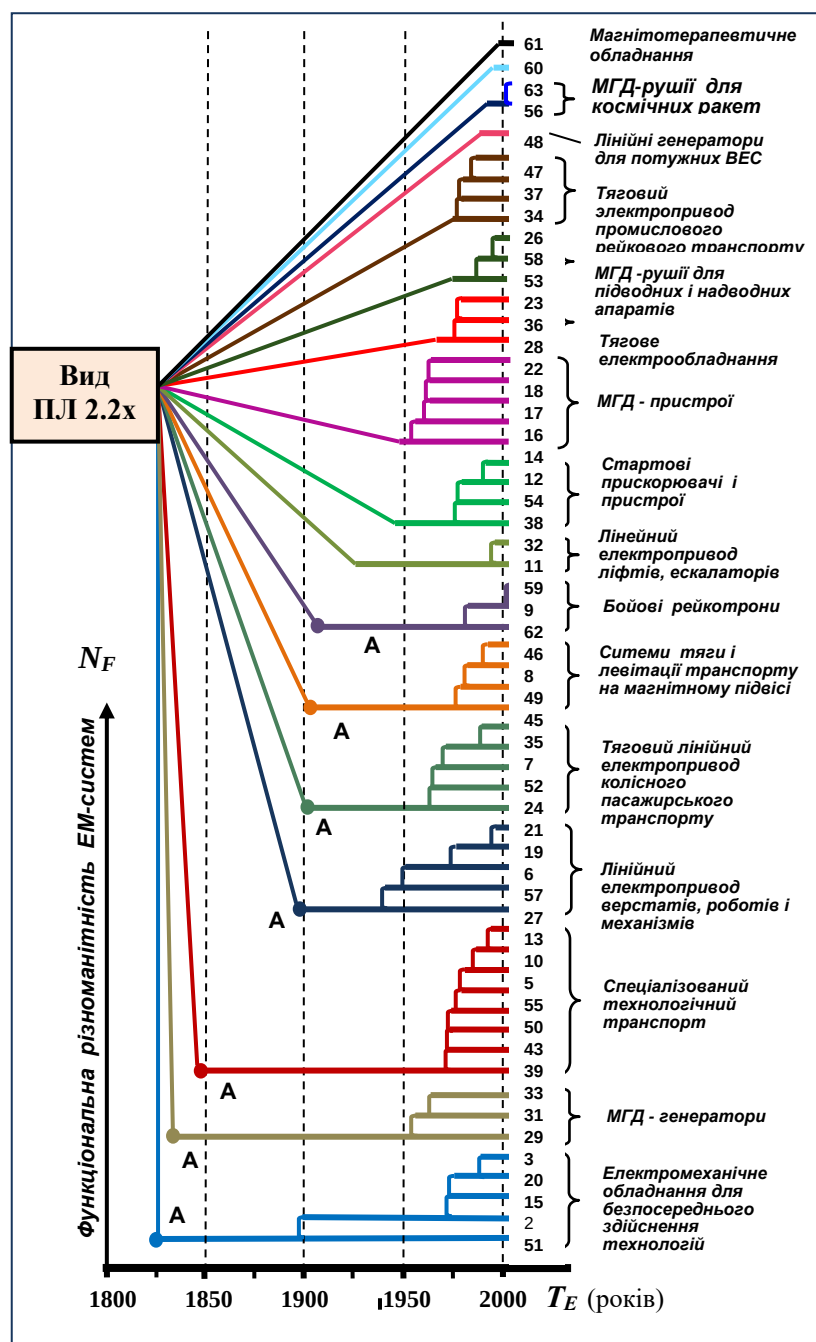


Рис. 3.3. Внутрішньовидова адаптивна еволюція електромеханічних об'єктів (на прикладі Виду PL 2.2х ($T_E = 200$ років)).

Еволюційний аналіз процесів адаптації видового рівня дозволяє визначити характерні тенденції і напрями структурно-функціональної адаптації в межах довільних Видів і функціональних класів ЕМПЕ, оцінити їх ефективність і визначити домінуючі напрямки та механізми адаптивної еволюції.

Одна з характерних тенденцій в просторово адаптивних розподілених ЕМ-системах полягає в використанні принципу модульності, який реалізується на

всіх рівнях їх структурної організації [10,11]. Сучасні просторово адаптивні модульні системи можуть суміщувати функції виконавчих органів з підсистемами самоорганізації і штучного інтелекту. Прикладами таких систем є роботизовані комплекси з реконфігурованими структурами, просторово розподілені електромеханічні системи безтросових пасажирських ліфтів серії MULTI, реалізованих по технології Maglev, електромеханічні системи розгалужених мереж 3D – конвейєрів, просторово розподілені модульні ЕМ-системи автоматизованих технологічних комплексів та ін.

3.2. Метод генетичного синтезу модульних структур.

Модульний принцип є одним з найбільш поширених і продуктивних принципів структуроутворення, який широко представлений як в живій природі, так і в сучасних технічних системах. Модульність є властивістю довільної структурованої системи, безпосередньо пов'язаною з можливістю її декомпозиції на ряд внутрішньо пов'язаних між собою уніфікованих вузлів (модулів). Модульний принцип використовується на всіх рівнях структурної організації технічних систем, що дозволяє скоротити термін освоєння нової техніки і забезпечити гнучкість керування зростаючою складністю об'єктів виробництва. Географія і напрями практичного використання систем модульного типу на даний час настільки масштабні, що це явище порівнюється з епохою панування модульних платформ і модульною революцією [7,8].

В задачах генетичного синтезу (табл. 3.2) оператор реплікації (f_R) застосовується по відношенню як первинних (f_{R1}), так і вторинних (f_{R2}) електромагнітних хромосом. В загальному випадку, застосування оператора f_R по відношенню до довільної структури s , породжує відповідну множину ідентичних структур:

$$f_R(s) \rightarrow (2s, 3s, 4s, \dots) \quad (3.1)$$

Таблиця 3.2. Стійкі комбінації генетичних операторів в задачах синтезу модульних структур (фрагмент) .

Комбінація операторів	Структурний еквівалент
Реплікація + ізомерія	Група просторових композицій ($K_i \subset R^3$)
Реплікація + кросинговер	Ефект групового симетрування $N = km, (k = 1, 2, \dots)$
Схрещування + ізомерія	Просторові варіанти з гібридною структурою магнітного поля
Реплікація + мутація	Дискретність електромагнітних елементів в межах активної зони
Реплікація + інверсія	Ефект регулярної електромагнітної інверсії

Кількісний склад реплікованих структур задається коефіцієнтом реплікації k_R . Оператор реплікації f_R породжує хромосому - реплікатора, яка має статус інформаційної. Це пояснюється тим, що хромосома - реплікатор містить лише кількісну інформацію стосовно хромосом-нащадків.

Для значень коефіцієнта реплікації $k_r \geq 2$, синтезована структура допускає N варіантів просторових композицій в R^3 , кількість яких буде зростати зі збільшенням значення k_r .

$$f(s) \rightarrow k_r s \in K_i \subset R^3, i = \overline{1 \div N} \quad (3.2)$$

де: s – електромагнітна хромосома - реплікатор; k_r – коефіцієнт реплікації; R^3 – тривимірний простір структуроутворення просторових композицій K_i .

Конкретизація варіантів просторового розташування хромосом здійснюється за результатами синтезу їх просторових композицій K з наступним вибором домінуючої структури, що задовольняє заданій функції синтезу F_S . Властивість, яка пов'язана з наявністю множини варіантів розміщення з однакової кількості однотипних елементів, узагальнюється поняттям структурної ізомерії, а множина їх просторових композицій - структурними ізомерами.

Вибір батьківської хромосоми здійснюється за результатами аналізу макрогенетичної програми за критерієм наявності генетичної схильності до

модульного виконання (рис. 3.4).

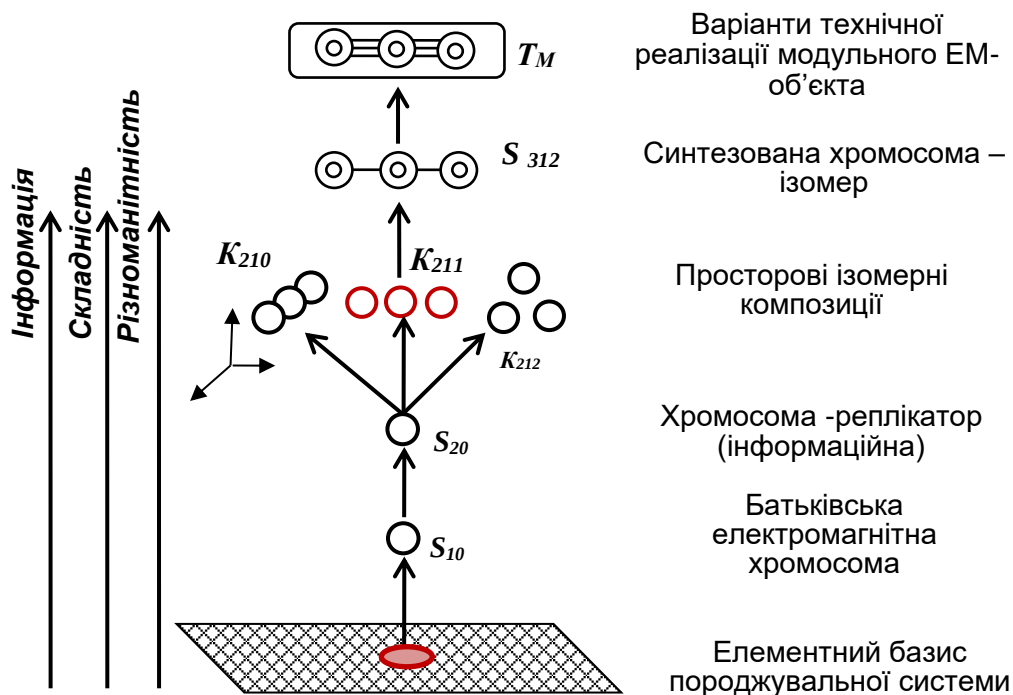


Рис. 3.4. Узагальнена генетична модель хромосомного синтезу ЕМ-об'єктів модульного виконання.

З використанням оператора реплікації f^R синтезується електромагнітна хромосома – реплікатор інформаційного типу S_{20} , яка містить інформацію стосовно групи просторових ізомерних композицій K_{210} , K_{211} , K_{212}

$$f^R(S_{10}) = S_{20} \rightarrow (K_{210}, K_{211}, K_{212}) \subset R^3 \quad (3.3)$$

Синтез просторових композицій здійснюється в R^3 з використання групи симетричних перетворень: паралельного перенесення (трансляції), поворотів та їх комбінацій. За результатами аналізу відповідності ізомерних композицій заданій функції синтезу F_s , здійснюється вибір проектного варіанта модульної структури (на рис. 3.4 представлена хромосома - ізомером S_{312}). Структурна формула обраної просторової композиції є основою для розробки варіантів технічних реалізацій T_M модульного виконання.

Носієм інформації стосовно генетично допустимих видів модульних структур є елементний базис макрогенетичних програм. Результати їх розшифрування відкривають можливість оперування генетичною інформацією як стосовно відомих видів ЕМ-об'єктів, так і неявних видів, ще невідомих на

даний час еволюції досліджуваних класів ЕМ-систем.

Модульність, яка є структурним еквівалентом механізмів реплікації електромагнітних хромосом, виступає одним з необхідних і важливих критеріїв просторово-функціональної адаптації системного рівня. Системний рівень містить інтегральну інформацію стосовно адаптивних властивостей складних технічних систем і технологічних комплексів з розподіленими ЕМ-модульними системами. Принциповою ознакою систем такого рівня є наявність специфічних функціональних можливостей, які зумовлені можливістю керованої зміни їх просторової геометрії, топології і кількості активованих модулів, в залежності від зміни геометрії, характеристик і параметрів технологічного об'єкта у реальному часі.

3.3. Методологія інноваційного синтезу багатокординатних мотор-шпиндельних агрегатів.

Теоретичним базисом методології інноваційного синтезу виступає теорія генетичної еволюції ЕМ-систем, яка інтегрує взаємопов'язані методи таксономії, еволюційного аналізу і генетичного синтезу, а також технологію генетичного передбачення в єдину галузь знань [19]. Домінуюча роль в системній методології визначається когнітивним простором дослідника, який оперує зазначеними методами і приймає кінцеві рішення. Гарантований інноваційний ефект результатів синтезу визначається: повнотою елементно-інформаційного базису ГК; наявністю детермінованих взаємозв'язків між генетичними кодами породжувальних елементів (електромагнітних хромосом) і інформацією генетичного ядра структур-нащадків; прогностичною функцією макро- і мікрогенетичних програм структуроутворення; багатоваріантністю (еквівіальністю) траєкторій синтезу.

За результатами фундаментальних досліджень, виконаних на кафедрі електромеханіки КПІ ім. Ігоря Сікорського, встановлено, що структурна організація і еволюція довільних класів технічних систем, які функціонують на принципах електромеханічного перетворення енергії, визначається принципами

і законами генетично організованих систем. До категорії таких систем відносяться і мотор-шпинделі (МШ). Мотор-шпинделі належать до класу міжсистемних гібридів, структура яких суміщує підсистеми різної генетичної природи: електромеханічні, електромагнітні, механічні, електронні, гідравлічні, пневматичні та ін. Енергетичним і генетичним ядром міжсистемних гібридів є активна зона перетворювача енергії, яка виступає фізичним носієм генетичної інформації і відповідного генетичного коду. Ядро виконує ключову системотвірну роль, яка визначає структурну організацію складної системи, її інваріантні властивості по відношенню до часу еволюції і змінних зовнішніх впливів. Можливість ідентифікації структури і інформації генетичного ядра відкриває можливість визначення і аналізу генетичних програм структуроутворення технічних систем довільного рівня складності за методологією генетичного аналізу об'єктів електромеханіки.

З точки зору теорії генетичного структуроутворення, просторово адаптивні модульні структури розглядаються як результат структурно-хромосомних трансформацій на основі принципів гібридизації, мутації, реплікації та ізомерії. Вся структурна різноманітність технічних об'єктів розпізнається через комбінаторику принципів хромосомного структуроутворення з врахуванням генетично допустимих просторових композицій і варіацій. За результатами відкриття закону гібридизації і міжродових мутацій здійснено передбачення і синтез принципово нових класів ЕМ-об'єктів, наділених можливістю структурної і просторової адаптації активної зони в процесі їх функціонування. Синтез з використанням технології генетичного передбачення супроводжується гарантованим інноваційним ефектом. Тому, методологія інноваційного синтезу є ключовим елементом в концепції створення нового знання та перетворення його на матеріальні цінності, що споживаються суспільством.

Методологія інноваційного синтезу інтегрує принципи і методи теорії генетичного структуроутворення, які забезпечують сукупність зростаючих вимог до області і якості їх функціонування та конкурентоспроможності складних технічних систем з високим рівнем адаптації (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Структура методології інноваційного синтезу просторово адаптивних ЕМ-структур.

В генетично організованих системах процеси структуроутворення об'єктів довільного рівня складності реалізуються на основі елементно-інформаційного базису генетичних програм з використанням операторів генетичного синтезу. В концепції генетичної еволюції історично створена різноманітність об'єктів електромеханіки розглядається як результат спадкового структуроутворення на кінцевій множині елементного базису, який упорядковується періодичною структурою Генетичної класифікації (ГК) первинних джерел електромагнітного поля. Генетичні моделі структурного синтезу належать до класу природоподібних моделей, які відтворюють оптимальні траєкторії синтезу електромеханічних структур (ЕМ-структур) за заданою функцією синтезу. Методологія синтезу на хромосомному рівні суттєво спрощує пошукові процедури, забезпечує локалізацію пошукового простору, оперує прогностичною інформацією і гарантує повноту синтезованих структур з відповідним емерджентним та інноваційним ефектом.

3.4. Генетичний статус функціонального класу мотор-шпиндельних агрегатів.

Сучасні конструкції приводних шпиндельних вузлів можуть об'єднувати десятки різноманітних підсистем і вузлів, зберігаючи фактично незмінним

власне енергетичне і генетичне ядро – електричний двигун (рис. 3.6). Складні ЕМ-системи, структури яких суміщують підсистеми різної генетичної природи мають статус міжсистемних гібридів.

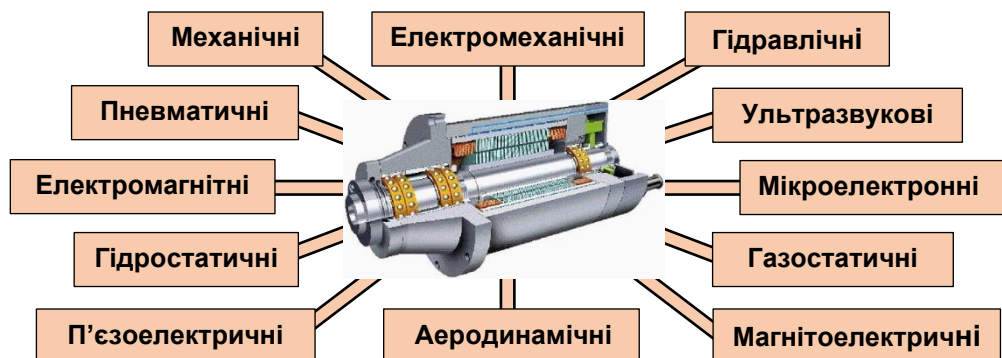


Рис. 3.6. Основні підсистеми сучасних мотор-шпинделів для металообробних верстатів.

Вказані підсистеми класу МШ виконують наступні функції:

електромеханічні (представлені універсальними генетичними кодами і структурними формулами): електродвигуни головного руху, приводу подачі, механічної передачі «гвинт-гайка», приводу вентиляторів, електромеханічні пристрої осьового натягу шпинделя; та ін.;

механічні (M_M): шпиндельні вузли; вали; підшипникові опори; передачі типу «гвинт-гайка»; редуктори; затискні механізми; та ін.;

електромагнітні (M_{EM}): електромагнітні муфти, підшипники (опори), електромагнітний підвіс (левітація), затискні пристрої, пристрої осьового натягу; електрогальмівні пристрої; та ін.;

магнітоелектричні (M_{ME}): магнітоелектричні опори; магнітоелектричне збудження приводного двигуна; та ін.;

гідравлічні (M_H): гідронасоси; гідроциліндри; системи примусового рідинного охолодження; пристрої гідроподачі шпинделя; системи змащування; гідростатичні опори; та ін.;

пневматичні (M_P): компресори; пневмоциліндри; пристрої зворотньо-поступального руху шпинделя; газостатичні опори; та ін.;

аерородинамічні (M_A): вентилятори; системи примусового охолодження;

ультразвукові (M_U): генератор ультразвукових хвиль;

мікроелектронні (M_{EL}): елементи систем контролю; напівпровідникові пристрої і датчики; електронні компоненти і блоки систем керування та інформаційного зв'язку;

п'єзоелектричні (M_{PE}): п'єзоелектричні генератори частоти.

Структурне різноманіття МШ у великій мірі визначається комбінаторикою зазначених вище підсистем, при збереженні двох головних: електромеханічної (двигуна головного руху) і механічної (шпиндель, підшипникові опори, пристрій затиску інструмента). Зазначені складові визначають генетичне ядро МШ. Різноманітність технічних рішень МШ (рис. 3.7) є результатом технічної адаптації генетичних структур до реалізації заданої функції, які визначають їх адаптивну еволюцію.

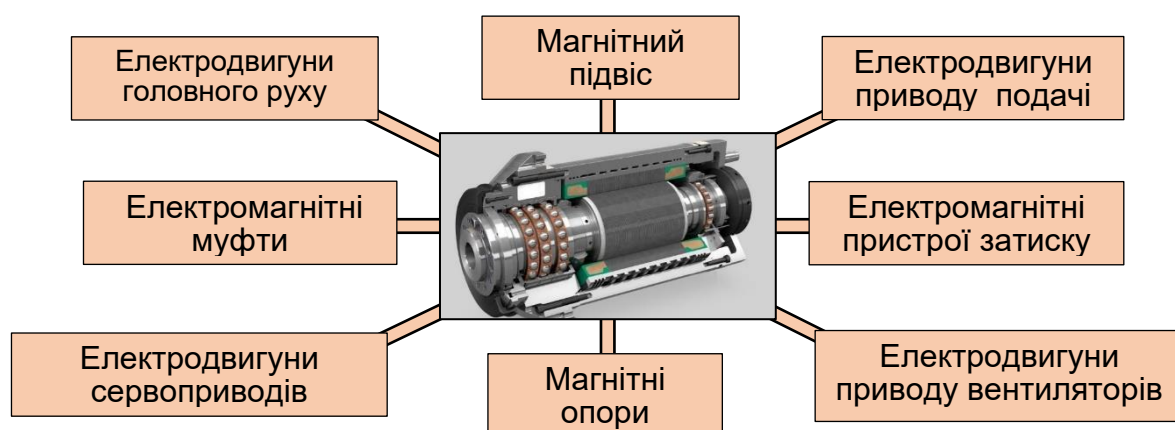


Рис. 3.7. Ролі електромагнітних і електромеханічних частин в конструкціях сучасних мотор-шпинделів.

3.5. Висновки до розділу 3.

1) Системну основу методології інноваційного синтезу просторово адаптивних ЕМ-структур визначають методи хромосомного синтезу з використанням операторів схрещування (гібридизація), реплікації (модульний принцип) і мутації (просторова структурна адаптація).

2) Важливе місце в методології міждисциплінарного синтезу МША посідає

концепція генетичного ядра електромехнічної системи, яке інваріантне до рівня еволюції, структурної складності і функціональної приналежності синтезованої структури.

3) Для створення МША доцільно використовувати методологію інноваційного синтезу, яка суттєво спрощує пошукові процедури, забезпечує локалізацію пошукового простору, оперує прогностичною інформацією і гарантує повноту синтезованих структур з відповідним емерджентним та інноваційним ефектом.

4) Сучасний рівень технічної реалізації МШ характеризує їх як складну ЕМ-систему класу міжсистемних гібридів, які суміщують в своїй структурі компоненти різної генетичної природи.

Розділ 4. Синтез структур мотор-шпиндельних агрегатів багатокординатного руху

4.1. Синтез модульної ЕМ-структури багатокординатного поворотного пристрою.

Багатокординатні електромеханічні системи (ЕМ-системи) широко використовуються в високоточних роботизованих комплексах, приводі виконавчих пристроїв, технологічних маніпуляторів, в електромеханічних системах орієнтування і позиціонування, збиральних автоматизованих лініях та ін.

Результатами попередніх досліджень встановлено, що генетична структура переважної більшості ЕМ-об'єктів визначається відповідною комбінацією генетичних операторів, які визначають рівень структурно-інформаційної складності, її статус, і локалізують пошуковий простір існування структур з точки зору реалізації заданої цільової функції. Кожному генетичному оператору, через відповідну групу математичних перетворень, ставиться у відповідність певний тип структурної організації об'єкта. Комбінація генетичних операторів породжує відповідний клас структур – нащадків з гарантованим емерджентним ефектом. Результати генетичного аналізу структур ЕМ-об'єктів вказують на наявність стійких детермінованих зв'язків між комбінаціями генетичних операторів і типами синтезованих структурних еквівалентів.

Розглянемо задачу синтезу ЕМ-системи модульного типу для приводу поворотного пристрою МШ. Виходячи з вихідних вимог, інтегральна функція синтезу F_S має задовольняти наступній сукупності часткових вимог:

- 1) Забезпечувати реалізацію дво- і трикоординатного обертального рухів ($\omega \in R^3$);
- 2) Мати спільну родову геометрію активних частин ($G_{ТП}$);
- 3) Забезпечити використання однотипних уніфікованих елементарних модулів ($N_E = 1$);
- 4) Мати зосереджену обмотку в структурі уніфікованого модуля якоря

(W_K) ;

5) Мати безобмоткову структуру ротора, суміщену з поворотним пристроєм $(S_2 \times M_{ПП})$;

6) Забезпечувати реалізацію просторового руху рухомої частини в сферичній системі координат (r, θ, φ) .

З врахуванням зазначених часткових вимог, вектор інтегральної функції синтезу набуває вигляду:

$$F_S = [(\omega \in R^3); G_{ПП}; N_E = 1; W_K; (S_2 \times T); (r, \theta, \varphi)] \subset R^n \quad (4.1)$$

Пошуковий простір синтезу обмежується першим великим періодом генетичної класифікації (вимога 1), локалізується інформаційним простором Роду тороїдальних плоских активних поверхонь (вимоги 2 - 3), необхідністю модульної реалізації ЕМ-системи (вимога 3) і реалізацією складного просторового рухом поворотного пристрою (вимоги 1 - 6). Не враховуються джерела – ізотопи, які характеризуються геометрією більш високого рівня складності. Заданій інтегральній функції синтезу F_S і накладеним обмеженням, з врахуванням максимальної генетичної схильності до модульної реалізації, наділені електромагнітні хромосоми підгрупи 2.2у. Для прикладу оберемо хромосому $ТПП$ 2.2у, якій надається статус батьківської (породжувальної).

Заданій функції синтезу (1), ставиться у відповідність багаторівнева генетична модель конвергентного типу, генетичну основу якої становить батьківська хромосома $ТПП$ 2.2у (рис. 4.1). Структура генетичної моделі має 7 рівнів структурно-інформаційної складності, які представлено: батьківською електромагнітною хромосомою (рівень 0); набором генетично модифікованих електромагнітних хромосом інформаційного типу $(S_{11} - S_{6310})$, які відтворюють процес структурно-інформаційного ускладнення шуканої структури ЕМ (рівні 2 - 6); двома хромосомами породжувального типу $(S_{633} - S_{7310})$, які задовольняють вимогам інтегральної функції синтезу F_S (рівні 6 та 7).

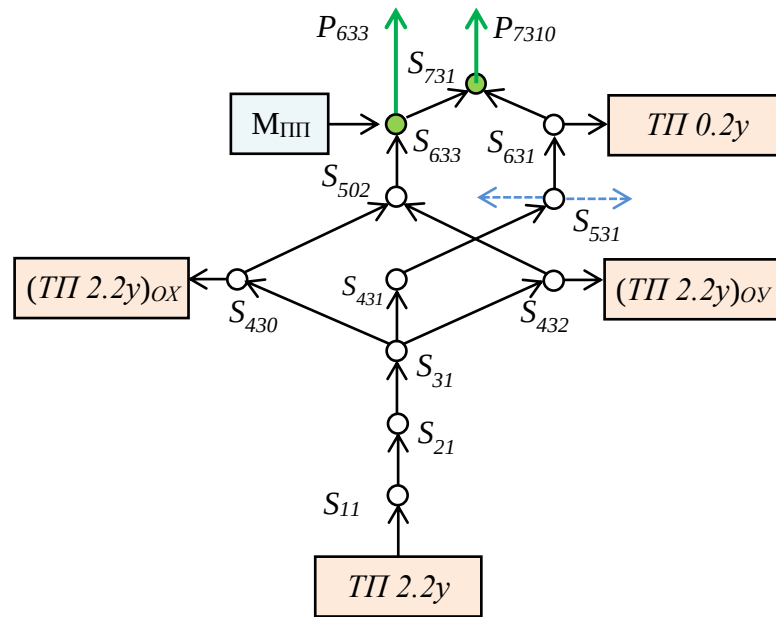


Рис. 4.1. Генетична модель синтезу модульної структури електромеханічної системи багатокоординатного поворотного пристрою.

Варіанти технічних реалізацій багатокоординатної ЕМ-системи представлені відповідними популяціями технічних рішень (P_{633} і P_{7310}).

За результатами моделювання і генетичного аналізу визначаємо структурні формули синтезованих гібридних хромосом, які задовольняють інтегральній функції синтезу F_S :

для поворотного пристрою з керованим двокоординатним рухом:

$$S_{633} = \{2[(ТП2.2у)_1 \times (ТП2.2у)_2 : M] : (R_{OX} \times R_{OY})\} \times M_{ПП} \quad (4.2)$$

для поворотного пристрою з керованим трикоординатним рухом:

$$S_{7310} = [(ТП0.2у)_1 \times (ТП0.2у)_2] \times \{2[(ТП2.2у)_1 : (ТП2.2у)_2 : M] : (R_{OX} \times R_{OY})\} \times M_{ПП} \quad (4.3)$$

Структурні формули (4.2 – 4.3) задовольняють заданій функції синтезу F_S і визначають структурну основу для розробки технічних рішень багатокоординатного крокового двигуна модульного типу для ЕМ-системи поворотного пристрою (рис. 4.2).

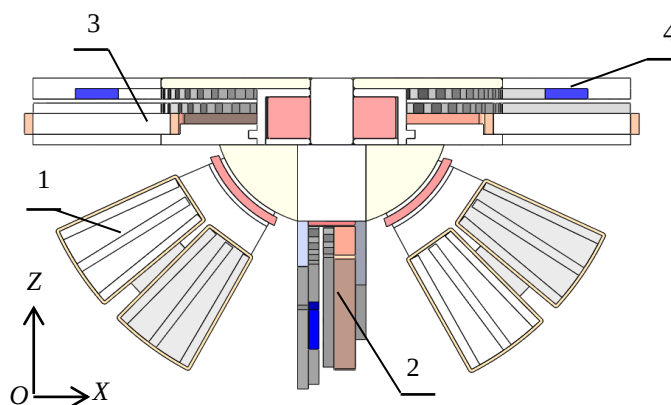


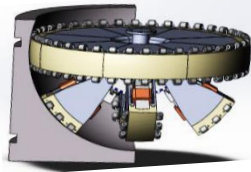
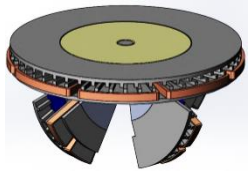
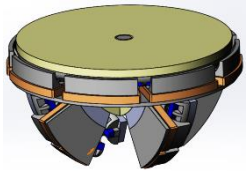
Рис. 4.2. Структура модульної електромеханічної системи багатокординатного руху поворотного пристрою, яка синтезована на основі хромосоми S_{7310} . 1 – поворотний модуль $(ТП\ 2.2y)_{OX}$; 2 – поворотний модуль $(ТП\ 2.2y)_{OY}$; 3 – статор модуля обертального руху $(ТП\ 0.2y)_{OZ}$; 4 – ротор, суміщений з поворотним пристроєм.

Тороїдний статорний модуль крокового двигуна $(ТП\ 0.2y)_{OZ}$ забезпечує обертальний рух поворотного пристрою відносно осі OZ , а дугові модулі $(ТП\ 2.2y)_{OX}$ і $(ТП\ 2.2y)_{OY}$, реалізують керований двокоординатний рух поворотного пристрою (в межах кута $\alpha < \pi/2$) відносно ортогональних осей OX і OY .

Гомеоморфізм хромосом гомологічного ряду вказує на універсальність запропонованої генетичної моделі (рис. 4.1), яка відкриває можливість її використання для розв'язання задач спрямованого синтезу інших видів модульних структур, що підтверджується результатами синтезу структур модульного типу на основі модулів з циліндричною, сферичною і тороїдно-циліндричною активними поверхнями (табл. 4.1).

Таблиця 4.1. Генетично синтезовані структури (фрагмент ряду) модульних електромеханічних систем багатокординатного поворотного пристрою.

	Родова просторова геометрія активної зони		
	Циліндрична (ЦЛ)	Тороїдна плоска (ТП)	Тороїдно циліндрична (ТЦ)
Генетичний код	ЦЛ $(0.2 \times 2.2)y$	ТП $(0.2 \times 2.2)y$	ТЦ $(0.2 \times 2.2)y$

гібридної хромосоми			
3D – візуалізація синтезованих модульних структур			

4.2. Синтез просторово адаптивних структур мотор-шпиндельних агрегатів гібридного типу.

Основна задача синтезу полягає у визначенні мікрогенетичної траєкторії в багатовимірному пошуковому просторі, які задовольняють заданій інтегральній функції синтезу F_S . Вихідною інформацією для постановки задачі інноваційного синтезу слугують результати аналізу макрогенетичних програм структуроутворення класу геометричних гібридів **G** і класу полігібридів **GTE**. За результатами попередніх досліджень (розділ 3) на основі закону гібридизації і еволюційних експериментів встановлено, що генетично допустима різноманітність гібридних структур класу геометричних моногібридів обмежена хромосомним набором з 90 гібридних хромосом, а класу полігібридів – 210 хромосомами. Переважна більшість Видів – нащадків зазначених класів належить до категорії неявних (генетично визначених, але ще не задіяних в технічній еволюції МШ).

Кількість генетично допустимих гібридних класів ЕМ-структур визначається комбінаторикою складових інформації генетичних кодів, а кількісний склад видів в межах зазначених класів, визначається приналежністю батьківських хромосом до відповідних Родів, в періодичній структурі ГК. Різниця в кількісному складі генетично допустимих гібридних класів ЕМ-структур пояснюється механізмами схрещувань, які регламентуються складовими генетичної інформації, що підлягають схрещуванню (рис. 4.3). Якщо механізм міжродової гібридизації геометричних моногібридів класу **G** визначається гомологічними хромосомами (рис. 4.3, а), то міжродові схрещування, які визначають структурний потенціал полігібридів класу **GTE**,

належить до сценарію генетично віддаленого схрещування, який може бути реалізований за умови, що схрещуванні хромосоми A і B є негомолігічними, мають різну родову приналежність і відрізняються за ознакою електромагнітної орієнтованості (рис. 4.3, б).

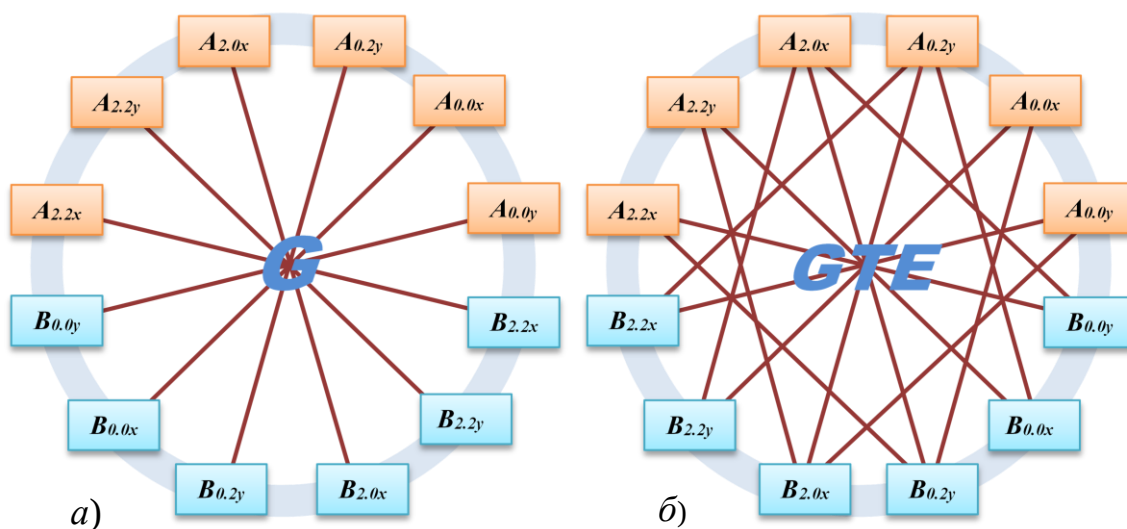


Рис. 4.3. Простір допустимих міжродових схрещувань для довільних двох Родів A і B : а) для моногібридного схрещування електромагнітних хромосом класу G ; б) для полігібридного схрещування хромосом класу GTE .

Задачу синтезу гібридної багатофункціональної ЕМ-структури конкретизуємо на прикладі створення мотор – шпинделів агрегатно-модульного типу, які суміщують функції багатокоординатного поворотного стола і високошвидкісного мотор-шпинделя.

Інтегральна функція синтезу F_S гібридних структур має враховувати наступну сукупність часткових вимог:

- 1 – забезпечення головного високошвидкісного руху МША (ω_{OZ});
- 2 – забезпечення керованого ортогонального поворотного руху МША (ω_{OX});
- 3 – можливість реалізації керованого OX -поступального руху МША ($\pm V_{OX}$);
- 4 – можливість реалізації додаткового керованого OZ -поступального руху МША ($\pm V_{OZ}$);

- 5 – агрегатно-модульний принцип технічної реалізації (K_{AM});
- 6 – забезпечення динамічної жорсткості в синтезованих структурних композиціях МША ($k \rightarrow \max$);
- 7 - реалізація модульного принципу конструктивного виконання основних вузлів агрегату (ΣM).

З метою зменшення розмірності пошукового простору, накладемо наступні обмеження на область пошуку R^n : пошук здійснюється в предметній області первинних елементів першого великого періоду породжувальної системи (генетичної класифікації (ГК); розглядаються лише електромеханічні принципи реалізації заданих просторових рухів; пошуковий простір R^n обмежується макрогенетичними програмами гібридних класів **G** і **GTE**. З врахуванням зазначених вимог та обмежень, інтегральна функція синтезу в багатовимірному пошуковому просторі R^n предметної області ГК набуває наступного вигляду:

$$F_S = (\omega_{OZ}; \omega_{OX}; \pm V_{OX}; \pm V_{OZ}; K_{AM}; k \rightarrow \max; \Sigma M) \subset R^n \quad (4.4)$$

Одна з суттєвих переваг теорії хромосомного структуроутворення є те, що дослідник оперує інформацією кінцевої множини генетично визначених елементарних структур, яка наділена прогностичною функцією. Задана сукупність часткових вимог F_S дозволяє локалізувати пошуковий простір в межах інформаційно-структурного базису генетичної класифікації (табл. 4.2)

Таблиця 4.2. Генетична карта електромагнітних хромосом з максимальною генетичною схильністю до вимог функції F_S .

Часткова функція	Рід електромагнітних хромосом				
	CL	KN	TP	PL	SF
(ω_{OZ})	CL 0.2y	KN 0.2y			
(ω_{OX})	CL 0.2y	KN 0.2y	TP 0.2y		SF 0.2y
($\pm V_{OX}$)	CL 2.0x			PL 2.0x	
($\pm V_{OZ}$)	CL 0.2y* CL 2.0x				

*за умови суміщення з гвинтовою передачею

Так як область синтезу обмежена гібридними класами **G** і **GTE**, а також з врахуванням часткових вимог 4 - 7, процедуру синтезу генетичної моделі здійснюємо з використанням батьківських хромосом з максимальною

генетичною схильністю до вимог F_S :

$CL\ 0.2y$ – для реалізації головного руху модуля мотор-шпинделя і для синтезу модуля OZ -подачі;

- $TP\ 0.2y$ – для синтезу поворотного модуля;
- $CL\ 2.0y$ - для синтезу модуля OX - подачі.

З врахуванням зазначених обмежень, заданій інтегральній функції F_S ставиться у відповідність узагальнена генетична модель хромосомної гібридизації (рис. 4.4).

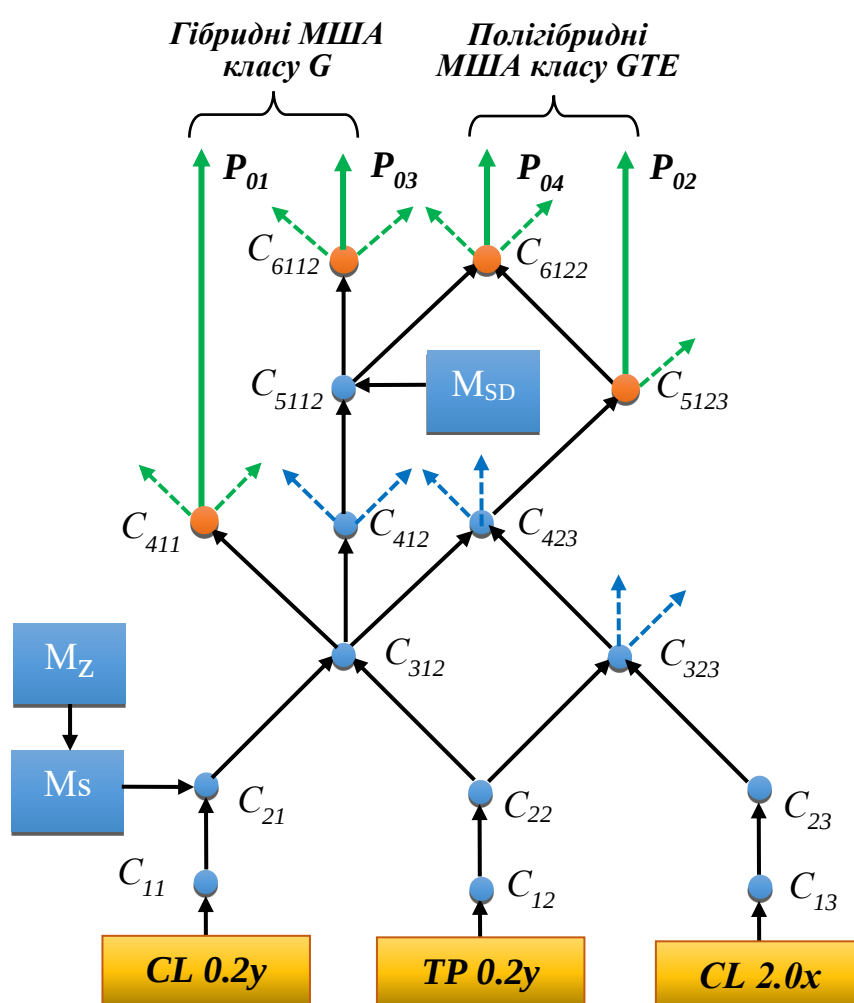


Рис. 4.4. Узагальнена генетична модель синтезу гібридних ЕМ-структур багатокоординатних мотор-шпиндельних агрегатів за заданою F_S : $CL\ 0.2y$, $TP\ 0.2y$, $CL\ 2.0x$ – батьківські електромагнітні хромосоми; C_{11} , C_{12} , ..., C_{61123} – хромосомний набір мікрогенетичної програми; M_s – модуль шпиндельного вузла; M_z – модуль затискного пристрою; M_{SD} – модуль гвинтової передачі;

C_{412} , C_{5123} , C_{6112} і C_{6122} – синтезовані хромосоми популяцій технічних рішень

$$P_{01}, P_{02}, P_{03}, P_{04}.$$

Генетичну основу узагальненої моделі визначають генетичні коди трьох електромагнітних хромосом $CL\ 0.2y$, $TP\ 0.2y$ та $CL\ 2.0x$, що підлягають процедурі схрещування. Послідовність хромосомних ускладнень C_{11} , C_{12} , ..., C_{61123} , з врахуванням процедури суміщення модулів шпиндельного вузла M_S , гвинтової передачі M_{SD} і затискного пристрою M_z , визначають траєкторію синтезу гібридних хромосом, які задовольняють інтегральній функції синтезу F_S і набувають статусу породжувальних. Такими властивостями наділені хромосоми C_{412} , C_{5123} , C_{6112} і C_{6122} , які визначають структурний базис відповідних популяцій технічних рішень P_{01} , P_{02} , P_{03} , P_{04} .

Узагальнена генетична модель (рис. 4.4) візуалізує багаторівневий процес поступового ускладнення (синтезу) генетичної структури і інформації вихідних батьківських хромосом, за принципом «від простого, до складного» в заданому пошуковому просторі F_S , з використанням генетичних операторів схрещування, мутації і реплікації. Хромосоми кожного наступного рівня зберігають інформацію попередніх рівнів, які доповнюються новою. За результатами моделювання синтезовано 4 електромагнітні хромосоми (C_{411} , C_{5123} , C_{6112} і C_{6122}), генетична інформація яких задовольняє вимогам заданої функції синтезу. Синтезовані хромосоми виконують функцію породжувальних для відповідних популяцій технічних рішень:

P_{01} – моногібридних агрегатів двокоординатного руху;

P_{02} – популяції технічних рішень з полігібридними трикоординатними агрегатами;

P_{03} – популяції технічних рішень з моногібридними агрегатами трикоординатного руху;

P_{04} – популяції технічних рішень полігібридних структур МША з чотирикоординатним рухом.

Результати розшифрування і аналізу генетичної моделі синтезу

узагальнено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3. Результати розшифрування генетичної моделі синтезу.

Хромосома	Структурна формула синтезованої хромосоми	Статус електромагнітної хромосоми
C_{01}	$(CL\ 0.2y)_1$	Батьківська, первинна
C_{02}	$(TP\ 0.2y)_1$	Батьківська, первинна
C_{03}	$(CL\ 2.0x)_1$	Батьківська, первинна
C_{11}	$(CL\ 0.2y)_2$	Вторинна, інформаційна
C_{12}	$(TP\ 0.2y)_2$	Вторинна, інформаційна
C_{13}	$(CL\ 2.0x)_2:M_{OX}$	Вторинна, мутована, інформаційна
C_{21}	$(CL0.2y)_1:(CL0.2y)_2 \times M_S \times M_Z$	Парна, суміщена з M_S і M_Z , інформаційна
C_{22}	$(TP\ 0.2y)_1:(TP\ 0.2y)_2$	Парна, інформаційна
C_{23}	$(CL\ 2.0x)_1:(CL\ 2.0x)_2:M_{OX}$	Парна, мутована, інформаційна
C_{312}	$[(CL0.2y)_1:(CL0.2y)_2 \times M_S \times M_Z] \times [(TP\ 0.2y)_1:(TP\ 0.2y)_2]$	Моногібридна (ізомер), інформаційна
C_{411}	$[(CL0.2y)_1:(CL0.2y)_2 \times M_S \times M_Z]_{OX} \times [(TP\ 0.2y)_1:(TP\ 0.2y)_2]_{OZ}$	Моногібридна класу G , породжувальна
C_{412}	$[2(CL0.2y)_1:(CL0.2y)_2:R_{OZ} \times M_S \times M_Z] \times [(TP\ 0.2y)_1:(TP\ 0.2y)_2]$	Реплікована (ізомер), інформаційна
C_{423}	$[(TP\ 0.2y)_1:(TP\ 0.2y)_2] \times [(CL\ 2.0x)_1:(CL\ 2.0x)_2:M_{OX}]$	Полігібридна (ізомер), інформаційна
C_{5112}	$[2(CL0.2y)_1:(CL0.2y)_2:R_{OZ} \times M_S \times M_Z \times M_{ZD}] \times [(TP\ 0.2y)_1:(TP\ 0.2y)_2]$	Моногібридна, суміщена з M_{ZD} , інформаційна
C_{5123}	$[(CL0.2y)_1:(CL0.2y)_2 \times M_S \times M_Z]_{OX} \times [(TP\ 0.2y)_1:(TP\ 0.2y)_2 \times (CL\ 2.0x)_2:M_{OX}]_{OZ}$	Полігібридна класу GTE , породжувальна
C_{6112}	$[2(CL0.2y)_1:(CL0.2y)_2:R_{OZ} \times M_S \times M_Z \times M_{ZD}] \times [(TP\ 0.2y)_1:(TP\ 0.2y)_2]$	Моногібридна класу G , породжувальна
C_{6122}	$[2(CL0.2y)_1:(CL0.2y)_2:R_{OZ} \times M_S \times M_Z \times M_{ZD}] \times [(TP\ 0.2y)_1:(TP\ 0.2y)_2 \times (CL\ 2.0x)_2:M_{OX}]$	Полігібридна класу GTE , породжувальна

4.3. Візуалізація і аналіз результатів синтезу.

За результатами моделювання визначено структурні формули гібридних хромосом зі статусом породжувальних, які задовольняють інтегральній функції синтезу і визначають напрями структуроутворення відповідних популяцій технічних рішень:

$$C_{411} = [(CL0.2y)_1:(CL0.2y)_2 \times M_S \times M_Z]_{OX} \times [(TP0.2y)_1:(TP0.2y)_2]_{OZ} \subset \mathbf{G} \quad (4.5)$$

$$C_{5123} = [(CL0.2y)_1:(CL0.2y)_2 \times M_S \times M_Z] \times [(TP0.2y)_1:(TP0.2y)_2 \times (CL2.0x)_2:M_{OX}] \subset \mathbf{GTE} \quad (4.6)$$

$$C_{6112} = [2(CL0.2y)_1:(CL0.2y)_2:R_{OZ} \times M_S \times M_Z \times M_{ZD}] \times [(TP0.2y)_1:(TP0.2y)_2] \subset \mathbf{G} \quad (4.7)$$

$$C_{6122} = [2(CL0.2y)_1:(CL0.2y)_2:R_{OZ} \times M_S \times M_Z \times M_{ZD}] [(TP0.2y)_1:(TP0.2y)_2 \times (CL2.0x)_2:M_{OX}]_{OX} \subset \mathbf{GTE} \quad (4.8)$$

Генетична інформація синтезованих хромосом гібридного типу визначає відповідний вид складного просторового руху структур-нащадків (табл. 4.4).

Таблиця 4.4. Види просторового руху і генетичний статус ЕМ-структур - нащадків.

Породжувальна гібридна хромосома	Вид просторового руху М-Ш	Генетичний статус ЕМ-структур - нащадків
C_{411}	Двокоординатний ($\omega_{OZ}; \pm \omega_{OX}$)	Геометричні моногібриди класу $\mathbf{G}$
C_{5123}	Трикоординатний ($\omega_{OZ}; \pm \omega_{OX}; \pm V_{OX}$)	Полігібриди класу $\mathbf{GTE}$
C_{6112}	Трикоординатний ($\omega_{OZ}; \pm \omega_{OX}; \pm V_{OZ}$)	Геометричні моногібриди класу $\mathbf{G}$
C_{6122}	Чотирикоординатний ($\omega_{OZ}; \pm \omega_{OX}; \pm V_{OX}; \pm V_{OZ}$)	Полігібриди класу $\mathbf{GTE}$

Синтезованій гібридній хромосомі C_{412} ставиться у відповідність модульна структура двокоординатного гібридного М-ША, в якій функцію двигуна

головного руху (OZ) виконує високошвидкісний двигун циліндричного типу (модуль M_1), а функцію поворотного приводу відносно осі OX – кроковий тороїдно плоский двигун (модуль M_2) (рис. 4.5).

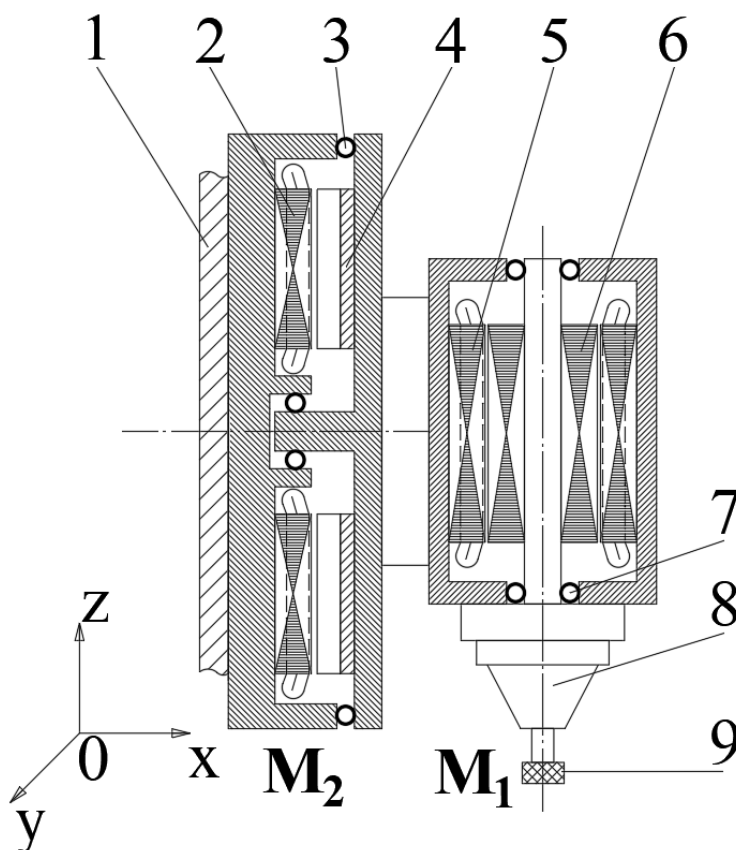


Рис. 4.5. Генетично синтезована модульна структура двокоординатного мотор-шпиндельного агрегата на основі моногібридної хромосоми C_{411} : 1) станина верстата; 2) магнітопровід статора двигуна кутового положення; 3) упорний підшипник; 4) магнітопровід ротора кутового двигуна; 5) магнітопровід статора мотор-шпиндель; 6) магнітопровід ротора мотор-шпинделя; 7) підшипник мотор-шпинделя; 8) пристрій затиску інструменту; 9) робочий інструмент.

Технічна реалізація гібридного модульного М-Ш дозволяє використати наступні його переваги:

- забезпечення двокоординатного руху М-Ш: головного обертального руху відносно осі OZ з можливістю зміни кутового положення шпинделя відносно осі OX на основі тороїдно плоского двигуна ТР 0.2у;
- реалізацію модульного принципу компоновання з використанням двох

елементарних модулів мотор-шпинделя M_1 і OX - повороту M_2 ;

- забезпечення підвищеної жорсткості модульного агрегата.

Двокоординатна структура М-Ш (рис. 3) є базовою для її трансформації в трикоординатну. Третя координата поступального OZ - руху реалізується додатковим модулем M_4 , функцію якого може виконувати або двигун поступального руху (наприклад, CL 2.0х), або кроковий двигун обертального руху (CL 0.2у), суміщений з гвинтовою передачею (рис. 4.6).

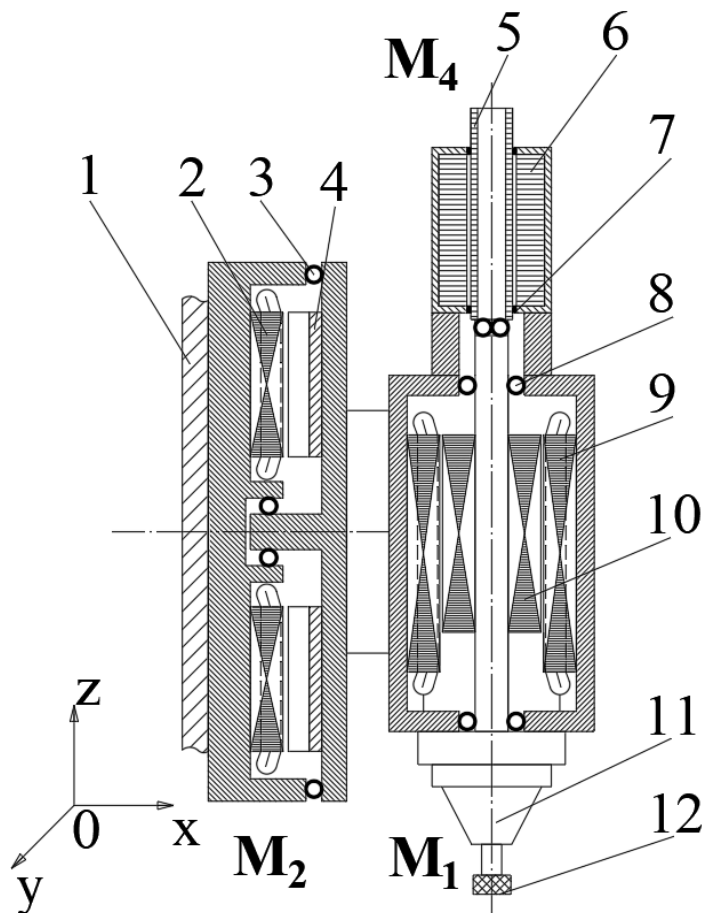


Рис. 4.6. Генетично синтезована модульна структура трикоординатного мотор-шпиндельного агрегату на основі моногібридної хромосоми C_{6112} : 1) станина верстата; 2) магнітопровід статора двигуна кутового положення; 3) упорний підшипник; 4) магнітопровід ротора кутового двигуна; 5) вторинний елемент двигуна подачі шпинделя OZ ; 6) статор двигуна подачі шпинделя OZ ; 7) підшипник ковзання; 8) підшипник мотор-шпинделя; 9) магнітопровід статора мотор-шпиндель; 10) магнітопровід ротора мотор-шпинделя; 11) пристрій затиску інструменту; 12) робочий інструмент.

Додаткова координата OZ -подачі шпинделя суттєво розширює робочий простір і технологічні можливості модульного агрегату. Генетична модель визначає ще одну популяцію технічних реалізацій трикоординатного МША, з використанням базової модульної основи M_1 і M_2 , яка доповнена модулем M_3 подачі за OX координатою. Реалізація поступального руху можлива або на основі керованого циліндричного двигуна (CL 2.0x) зворотно-поступального руху, або з використанням плоского синхронного лінійного двигуна з двосторонньою активною зоною PL 2.0x.

Синтезована хромосома C_{5123} має статус породжувальної по відношенню до модульної структури полігібридного М-Ш, яка складається з трьох взаємопов'язаних модулів: модуля подачі (M_3) МШ за координатою OX ; модуля кутового положення (M_2) МШ відносно осі OX та основного модуля мотор – шпинделя (M_1) з двигуном головного руху (рис. 4.7).

Електромеханічний модуль подачі реалізовано на основі циліндричного синхронного двигуна зворотно-поступального руху (CL 2.0x), статор 2 якого жорстко закріплено до станини 3 верстата, а його рухомий елемент одночасно виконує функцію вторинного активної частини 1, з постійними магнітами почергової полярності, та механічної опори для забезпечення зворотно поступального руху модулів кутового положення і мотор-шпинделя. Задана функція забезпечується наявністю ковзних підшипників 4 і кулькових опорних підшипників 5 та 7. Циліндричний рухомий елемент 1 двигуна OX подачі жорстко з'єднаний зі статором 6 двигуна кутового положення, основу якого представляє кроковий двигун тороїдно-плоского виконання TP 0.2y. Статор 6 двигуна кутового положення через лінійні підшипникові опори 7 може здійснювати лише зворотно поступальний рух вздовж осі OX . Ротор 9 може змінювати своє кутове положення відносно статора 6 з гарантованим повітряним зазором, що забезпечується наявністю упорного підшипника 8 та кулькової підшипникової опори 5. Внутрішня підшипникова опора 5 через втулку 10, забезпечує реалізацію незалежного зворотно-поступального руху вторинної

частин 1 і обертального руху ротора 9 двигуна кутового повороту. Упорний підшипник 8 також забезпечує ефективну компенсацію аксіальної складової електромагнітної сили тяжіння. До ротора 9 жорстко закріплено корпус модуля M_1 мотор-шпинделя, який забезпечує обертальний рух робочого інструмента 12 відносно осі OZ . а також може здійснювати програмований поворот і зворотно-поступальний рух відносно ортогональної осі OX . Запропоноване технічне рішення забезпечує реалізацію одно-, дво-, та трикоординатного програмованого руху робочого інструменту мотор-шпинделя.

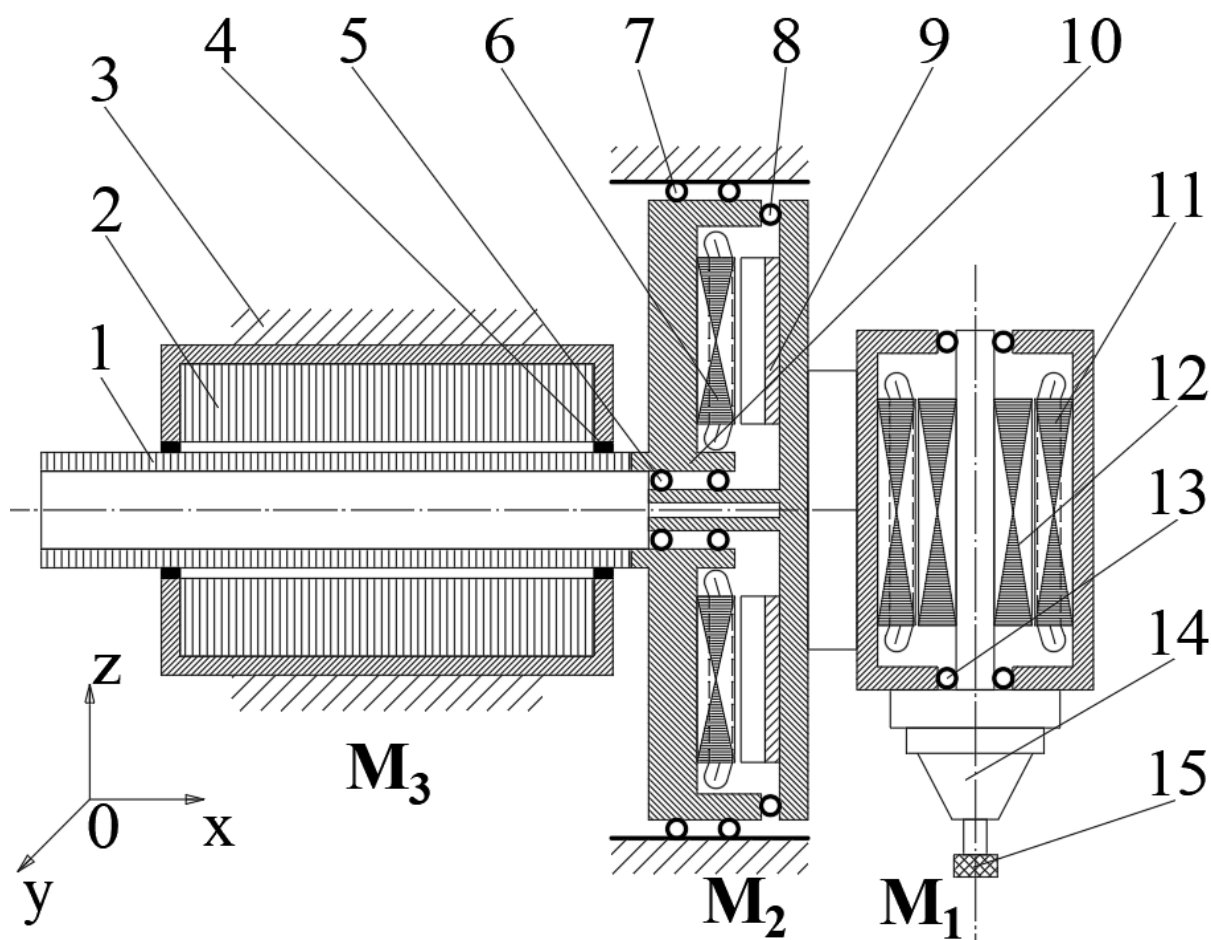


Рис. 4.7. Основні конструктивні вузли розробленої модульної конструкції трикоординатного мотор-шпиндельного агрегату: 1) вторинний елемент двигуна OX подачі; 2) статор двигуна OX подачі; 3) станина верстата; 4) підшипник ковзання; 5) внутрішній кульковий підшипник; 6) магнітопровід статора двигуна кутового положення; 7) ролик опора рухомого статора; 8) упорний підшипник; 9) магнітопровід ротора кутового двигуна; 10) втулка ротора; 11) магнітопровід статора мотор-шпиндель; 12) магнітопровід ротора

мотор-шпинделя; 13) підшипник мотор-шпинделя; 14) пристрій затиску інструменту; 15) робочий інструмент.

Розроблений варіант технічного рішення МША забезпечує:

- компактну просторову компоновку агрегату за рахунок суміщення активних частин електромеханічних модулів з функціями опорних вузлів без проміжних механічних передач та редукторів;
- можливість адаптації просторової структури агрегату у відповідність з заданою програмою технологічного процесу металообробки;
- можливість реалізації багатофункціональних робочих режимів в одно-, дво- та трикоординатному технологічному просторі;
- можливість розширення багатокординатного простору функціонування шляхом інтеграції з додатковими електромеханічними модулями, або структурно-функціонального суміщення з багатокординатними поворотними столами.

За умови заміни батьківської хромосоми $CL\ 2.0x$ на гомологічну плоску $PL\ 2.0x$, в популяції технічних рішень з'явиться відповідна гомологічна трьохмодульна структура з плоским лінійним двигуном OX – подачі (рис. 4.8). Особливістю такої структурної схеми є використання двосторонньої активної зони і підвищена жорсткість вторинної частини електромеханічного модуля M_3 .

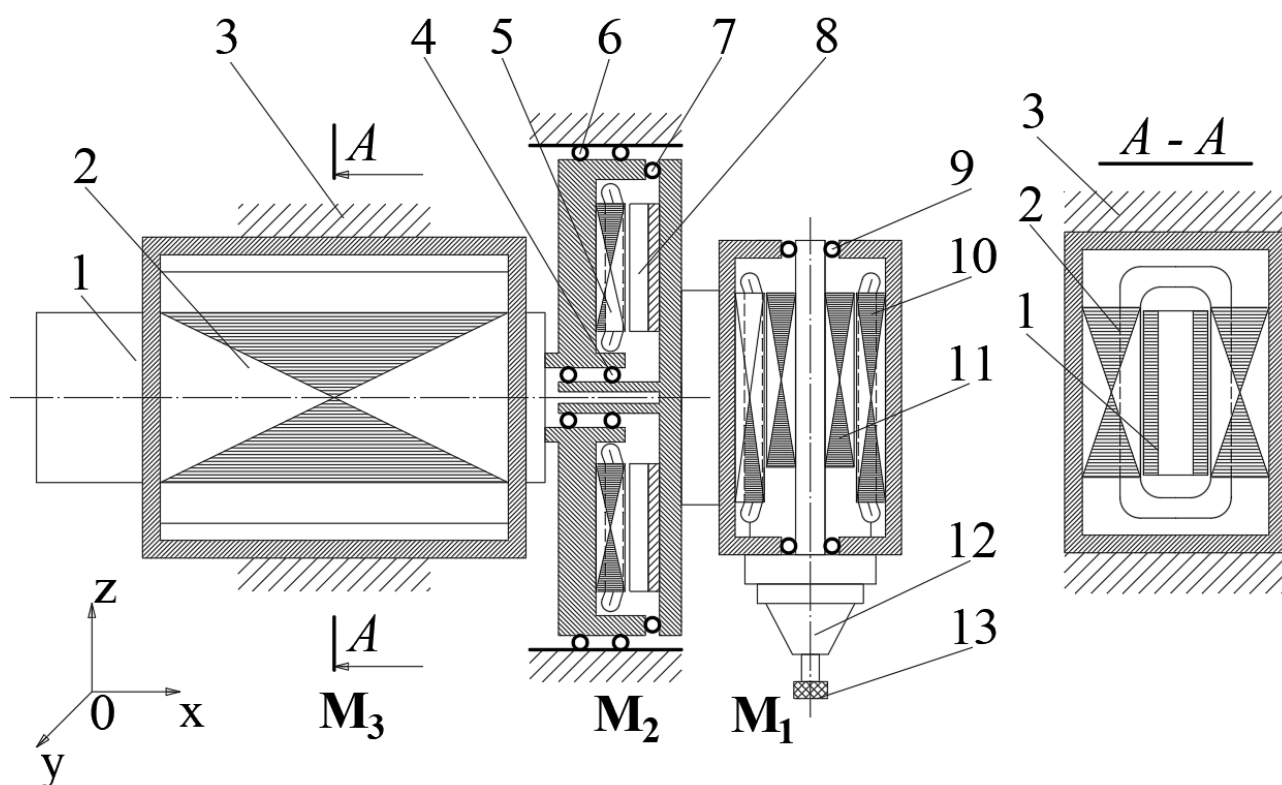


Рис. 4.8. Модульна структура трикоординатного полігібридного мотор-шпинделя на основі плоского двигуна (PL 2.0x) в модулі ОХ – подачі: 1) вторинна частина двигуна поступального руху; 2) статор двигуна ОХ -подачі; 3) станина верстата; 4) підшипник ковзання; 5) магнітопровід статора двигуна кутового положення; 6) роликова опора рухомого статора; 7) упорний підшипник; 8) магнітопровід ротора кутового двигуна; 9) підшипник мотор-шпинделя; 10) магнітопровід статора мотор-шпиндель; 11) магнітопровід ротора мотор-шпинделя; 12) пристрій затиску інструменту; 13) робочий інструмент.

Гібридна хромосома C_{6122} , яка характеризується найвищим рівнем інформаційної складності, виконує функцію породжувальної по відношенню до популяції технічних рішень P_{04} . Об'єктами зазначеної популяції є модульні агрегати полігібридного типу, які здатні забезпечувати керований чотирикоординатний просторовий рух інструментальної головки МШ.

Структурна схема чотирикоординатного МША об'єднує чотири модулі в одному агрегаті (рис. 4.9). В кінематичній схемі чотирикоординатного МША,

кожен елементарний електромеханічний модуль забезпечує відповідний вид просторового руху.

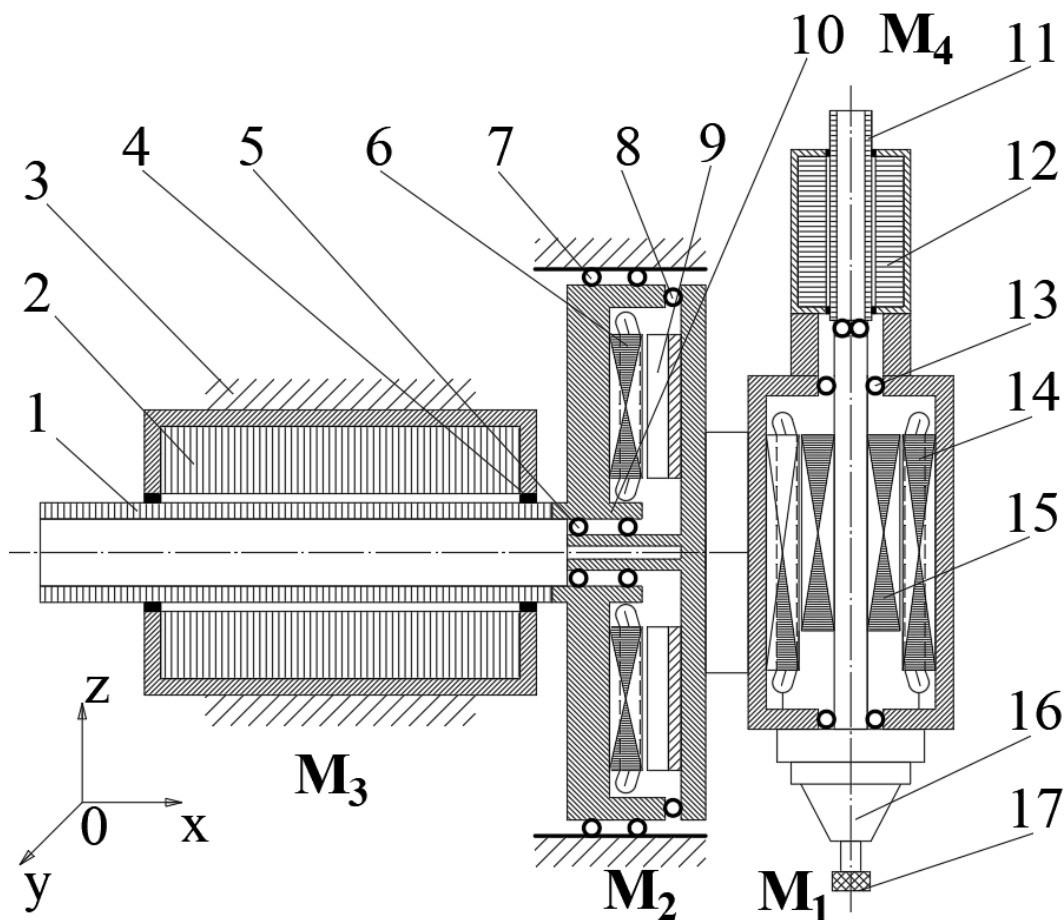


Рис. 4.9. Генетично синтезована модульна структура чотирикоординатного мотор-шпиндельного агрегату на основі полігібридної хромосоми C_{6122} : 1) вторинний елемент двигуна OX подачі; 2) статор двигуна OX подачі; 3) станина верстата; 4) підшипник ковзання; 5) внутрішній кульковий підшипник; 6) магнітопровід статора двигуна кутового положення; 7) роликова опора рухомого статора; 8) упорний підшипник; 9) магнітопровід ротора кутового двигуна; 10) втулка ротора; 11) вторинний елемент двигуна подачі шпинделя OZ ; 12) статор двигуна подачі шпинделя OZ ; 13) підшипник мотор-шпинделя; 14) магнітопровід статора мотор-шпинделя; 15) магнітопровід ротора мотор-шпинделя; 16) пристрій затиску інструменту; 17) робочий інструмент.

Характерною особливістю синтезованих варіантів гібридних агрегатів є наявність двох модулів обертального руху: M_2 (кутового положення) і M_1

(головного руху). Для фіксації статора 4 в площині ZOY і забезпечення поступального руху за координатою OX , поступальний рух модуля M_2 здійснюється з використанням роликової лінійної опори 9.

Запропоновані технічні рішення МША можна віднести до нового етапу технічної еволюції мотор-шпинделів, характерною особливістю якого є модульний принцип і можливість адаптації структури МША до вимог багатокоординатного простору функціонування (рис. 4.10). Багатокоординатні МША забезпечують широкий діапазон технологічних операцій і режимів металообробки, а також різні варіанти модульної реалізації, опцій та інтерфейсу. Призначені для спеціалізованої обробки деталей і вузлів складної просторової форми на верстатах з ЧПК і багатокоординатних металообробних центрах.

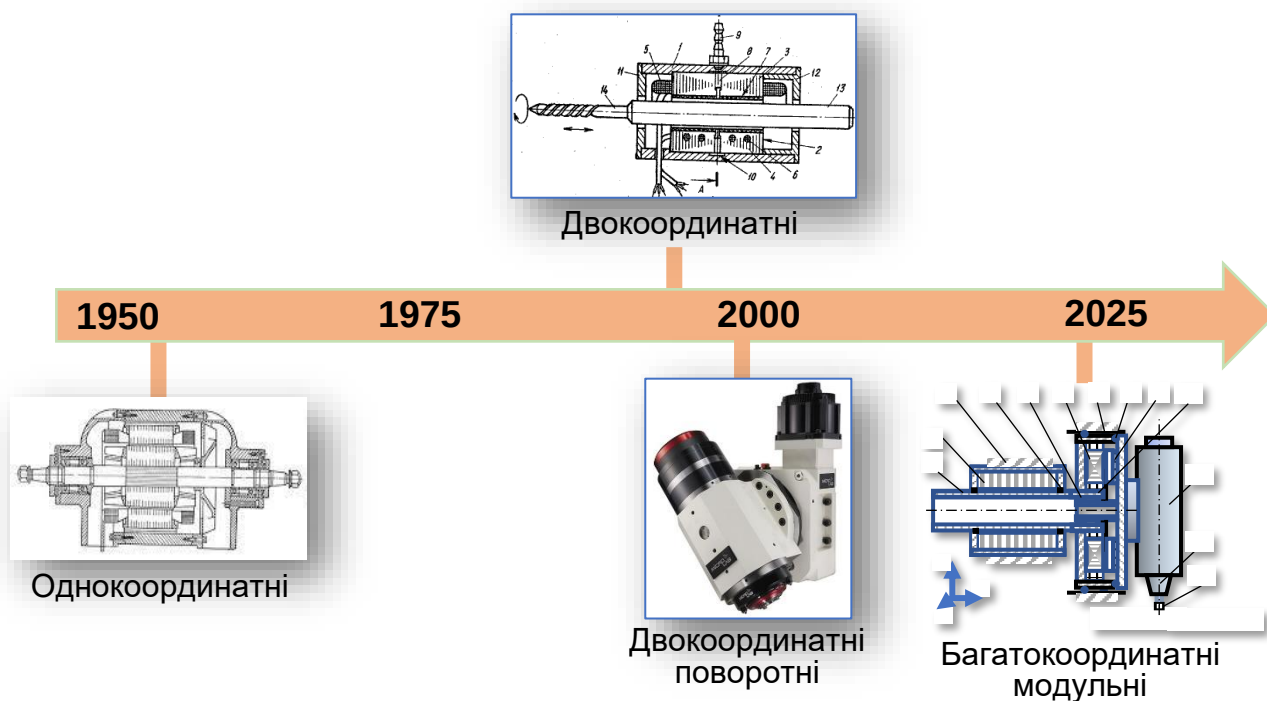


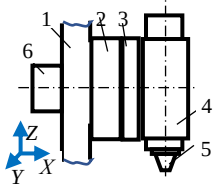
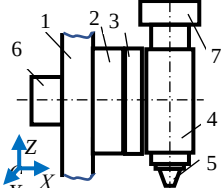
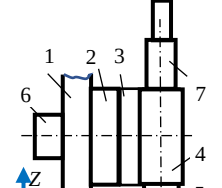
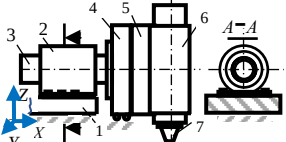
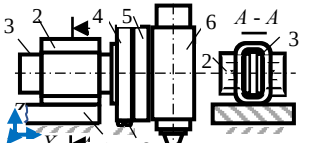
Рис. 4.10. Місце і значення результатів дослідження в еволюції поколінь мотор-шпинделів для металообробних верстатів.

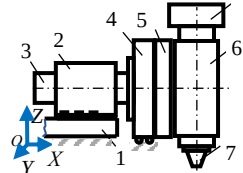
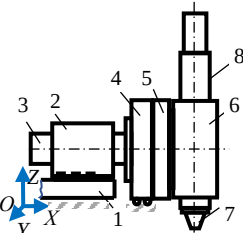
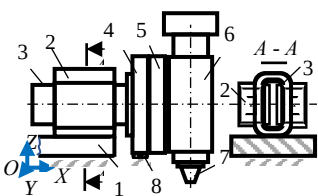
Синтезовані варіанти структур багатокоординатних МША слугують основою для розробки оригінальних технічних рішень та їх патентування.

4.4. Генетичний каталог синтезованих структур МША.

Структурні схеми багатокоординатних мотор – шпиндельних агрегатів, які представлено синтезованими структурами популяцій P_{01} , P_{02} , P_{03} та P_{04} , виконують функцію інтелектуальних підказок для розробки їх технічних реалізацій TP_{031} , TP_{021} , TP_{041} , TP_{0422} , та ін. (табл. 4.5).

Таблиця 4.5. Генетичний каталог синтезованих структур багатокоординатних мотор-шпиндельних агрегатів з адаптивною просторовою структурою (фрагмент каталогу).

Популяція технічних рішень	Комбінація модулів	Вид просторового руху	Геометрична модель технічного рішення	Генетичний статус ЕМ-системи
Агрегати двокоординатного руху				
P_{01}	M_1, M_2	$(\omega_{OZ}; \pm \omega_{OX})$		Геометричний моногібрид класу G
Агрегати трикоординатного руху				
P_{03}	M_1, M_2, M_4	$(\omega_{OZ}; \pm \omega_{OX}; \pm V_{OZ})$		Геометричний моногібрид класу G
P_{031}	M_1, M_2, M_5	$(\omega_{OZ}; \pm \omega_{OX}; \pm V_{OZ})$		Геометричний моногібрид класу G
P_{02}	M_1, M_2, M_3	$(\omega_{OZ}; \pm \omega_{OX}; \pm V_{OX})$		Полігібрид класу GTE
P_{021}	M_1, M_2, M_6	$(\omega_{OZ}; \pm \omega_{OX}; \pm V_{OX})$		Полігібрид класу GTE
Агрегати чотирикоординатного руху				

P_{04}	M_1, M_2, M_3, M_4	$(\omega_{OZ}; \pm \omega_{OX}; \pm V_{OX}; \pm V_{OZ})$		Полігібрид класу GTE
P_{041}	M_1, M_2, M_3, M_5	$(\omega_{OZ}; \pm \omega_{OX}; \pm V_{OX}; \pm V_{OZ})$		Полігібрид класу GTE
P_{042}	M_1, M_2, M_4, M_6	$(\omega_{OZ}; \pm \omega_{OX}; \pm V_{OX}; \pm V_{OZ})$		Полігібрид класу GTE

Аналіз продукції провідних виробників електромеханічного обладнання для сучасної галузі верстатобудування дозволяє здійснити вибір конкретних типів електромеханічних систем для технічної реалізації модульної концепції мотор – шпиндельних агрегатів (табл. 4.6).

Таблиця 4.6. Структура і функції приводних електродвигунів мотор – шпиндельних агрегатів.

Модуль	Тип двигуна	Генетичний код	Вид просторового руху	Функція
M_6	Лінійний синхронний двигун	PL 2.0x	Зворотно-поступальний ($\pm V_{OX}$)	Зворотно-поступальний рух МШ за координатою OX
M_5	Лінійний синхронний двигун	CL 2.0x	Зворотно-поступальний ($\pm V_{OZ}$)	Зворотно-поступальний рух шпинделя за координатою OZ
M_4	Кроковий двигун × кульково-гвинтова передача	CL 0.2y	Обертальний ($\pm \omega_{OZ}$)	Зворотно-поступальний рух шпинделя за координатою OZ
M_3	Лінійний синхронний двигун	CL 2.0x	Зворотно-поступальний	Зворотно-поступальний

			$(\pm V_{ox})$	рух МШ за координатою ОХ
M_2	Кроковий двигун	TP 0.2y	Обертальний $(\pm \omega_{ox})$	Зміна кутового положення МШ відносно осі ОХ
M_1	Високошвидкісний двигун головного руху	CL 0.2y	Обертальний (ω_{oz})	Головний рух шпинделя відносно осі ОZ.

Результати синтезу підтверджують ефективність і прогностичну функцію розробленої методології багаторівневого генетичного синтезу просторово адаптивних гібридних структур МША модульного типу, які призначені для функціонування у складі інтелектуальних металообробних центрів і верстатів з ЧПУ.

Розроблений генетичний каталог багатокоординатних шпиндельних агрегатів з просторово адаптивною структурою виконує функцію системної основи для розробки конкурентоспроможних технічних рішень.

4.5. Висновки до розділу 4.

1) На прикладі синтезу чотирьох видів ЕМ-системи модульного типу для приводу поворотного пристрою МШ, а саме з тороїдно-плоскою, циліндричною, сферичною і тороїдно-циліндричною активними поверхнями, була підтверджена універсальність запропонованої генетичної моделі, яка відкриває можливість її використання для розв'язання задач спрямованого синтезу інших видів модульних структур.

2) За результатами моделювання синтезовано 4 породжувальні електромагнітні хромосоми (C_{411} , C_{5123} , C_{6112} і C_{6122}), генетична інформація яких задовольняє вимогам інтегральної функції синтезу мотор-шпинделів агрегатно-модульного типу, які суміщують функції багатокоординатного поворотного стола і високошвидкісного мотор-шпинделя.

3) З використанням методології інноваційного синтезу, синтезовано і розроблено технічні рішення двокоординатного, трикоординатного та

чотирикоординатного мотор-шпиндельних агрегатів.

4) Отримані результати синтезу підтверджують ефективність і прогностичну функцію розробленої методології багаторівневого генетичного синтезу просторово адаптивних гібридних структур МША модульного типу.

5) За результатами досліджень розроблено генетичний каталог синтезованих структур багатокоординатних шпиндельних агрегатів з просторово адаптивною структурою, який може виконувати функцію системної основи для розробки конкурентоспроможних технічних рішень.

близнюків і гібридних Видів.

Категорія Виду є визначальною в таксономії і еволюційних дослідженнях ГОС як природного, так і антропогенного походження. Вид одночасно виконує функцію основного таксону як в задачах макрогенетичного, так і мікрогенетичного аналізу і синтезу довільних функціональних класів ЕМ-систем. Приналежність Виду до відповідного періоду (Роду), групи і підгрупи ГК визначається способами макрогенетичного аналізу складових генетичної інформації універсального коду, або методом аналізу відповідної комбінації генетичних кодів для гібридних Видів.

Розподіл базових Видів по Родам узагальнено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1. Розподіл Видів ЕМ-систем по Родам*

Підгрупа	Період (рід)					
	CL	KN	PL	TP	SF	TC
0.0y						
0.0x						
0.2y	CL 0.2y (97)	KN 0.2y (6)	PL 0.2y (2)	TP 0.2y (2)		
2.0x	CL 2.0x (6)	KN 2.0x (1)				
2.2y	CL 2.2y (1)					
2.2x	CL 2.2x (1)					

*в дужках позначено кількість об'єктів, задіяних в еволюції Виду; зелений фон показує можливість існування Видів, ще відсутніх на даний момент часу.

За видом просторового руху структурна різноманітність МШ поділяється на два класи: з однокоординатним обертальним головним рухом шпинделя (81%) і двокоординатним обертально-поступальним (19%) (рис. 5.2).

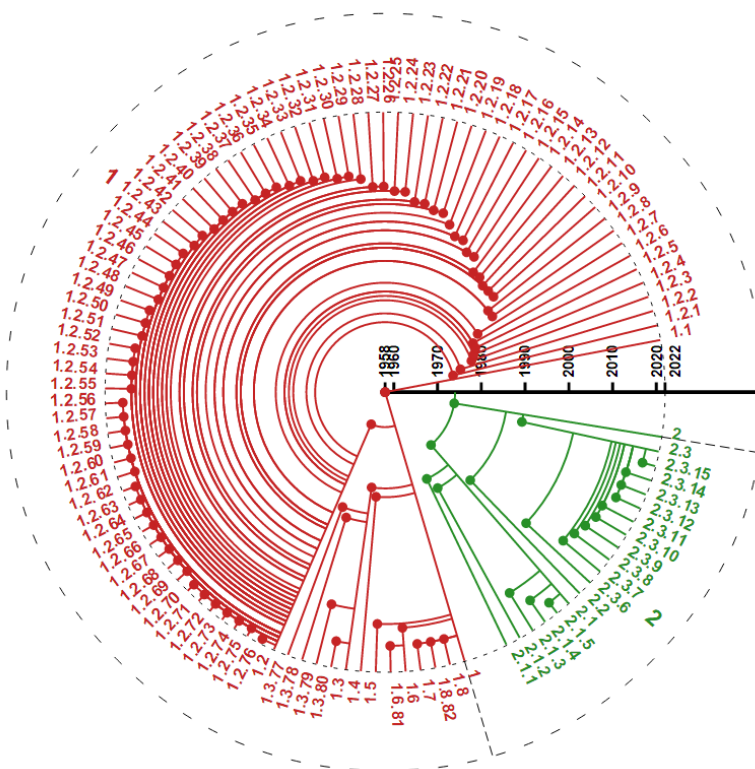


Рис. 5.2. Філогенетична еволюція популяцій функціонального класу мотор – шпинделів з обертальним (сектор 1) і обертально – поступальним (сектор 2) рухом шпинделя ($T_E = 64$ роки)

Це пояснюється тим, що циліндрична поверхня активної зони двигуна максимально адаптована до осової симетрії, а вал ротора двигуна може виконувати функцію шпинделя.

5.2. Експериментальне підтвердження принципів генетичного структуроутворення мотор-шпинделів.

Достовірність моделей, методів синтезу і теоретичних положень, сформульованих в попередніх розділах визначалася постановкою серії еволюційних експериментів, метою яких було визначення структурно-інформаційної відповідності між генетичними моделями і методами (теорія) і реальними результатами технічної еволюції МШ (експеримент). Програма експериментів охоплювала різні класи мотор – шпинделів за весь період їх технічної еволюції.

Еволюційний експеримент – процедура експериментальної перевірки

достовірності положень теорії генетичної еволюції ЕМПЕ, генетичних програм та результатів генетичного передбачення [12]. Генетична електромеханіка стала першою науковою дисципліною (серед технічних дисциплін), де розроблено теоретичні і методологічні засади еволюційних експериментів історичного і прогностичного рівнів.

В генетично організованих системах (ГОС) як природного, так і антропогенного походження, основним видом інформації є генетична, яка на рівні генетичних кодів, задовольняє принципу збереження. Генетична інформація у вигляді макро- і мікрогенетичних програм визначає системну основу для створення генетичних банків даних. Генетичні банки даних - належать до принципово нового виду інформаційно-інтелектуальних продуктів, аналоги яких на даний час відсутні в галузі технічних наук. Зміст поняття «Генетичний банк даних» (ГБД) визначається як інтелектуально-інформаційна система, яка містить систематизовані результати генетичного, таксономічного та еволюційного аналізу довільного об'єкта дослідження, приналежного до категорії генетично організованих систем (ГОС).

Вагомість і значимість таких систем підтверджується результатами діяльності дослідних центрів і банків даних біологічного і біотехнологічного спрямування, які мають статус Національних: NCBI, GenBank, BioProject, BioSample, BioSystems (США), CNGBdb (Китай) та ін.

Перші в світі генетичні банки даних в галузі технічних наук, по окремим функціональним класам електричних машин та електромеханічних пристроїв, були створені на кафедрі електромеханіки КПІ ім. Ігоря Сікорського. Дослідження з геноміки електромеханічних систем (як ініціативний проєкт) розпочалися фактично одночасно з всесвітньовідомим проєктом «Геном людини» (міжнародний проєкт вартістю 5 мільярдів доларів). На той час в КПІ були розроблені методи генетичного аналізу ЕМ-об'єктів, ідентифікації їх генетичних кодів та розшифрування генетичних програм на рівні окремих функціональних класів ЕМПЕ. В середині 90-х років минулого століття було розшифровано макрогенетичні програми структуроутворення і визначено

таксономію електричних машин обертального і поступального руху. Стало очевидним, що структурна організація і еволюція електромеханічних об'єктів визначається системними законами генетичної еволюції, яка спрямовується людиною. Системними носіями елементно-інформаційного базису ГОС виступають періодичні класифікації генетичного типу, а довільні електромеханічні об'єкти виконують функцію фізичних носіїв універсального генетичного коду.

ГБД в технічних науках призначені для систематизації, зберігання, вилучення та аналізу інваріантної інформації про генетично допустиму структурну і таксономічну (родову і видову) різноманітність довільних класів технічних об'єктів та систем. Принциповою відмінністю ГБД від інформаційних баз даних є їх прогностична функція, яка визначає генетично допустиму різноманітність структур незалежно від рівня складності, часу еволюції і функціональної приналежності досліджуваної системи. Інформаційні дані, які представлено в структурі ГБД, містять інформацію як стосовно історичного етапу еволюції, так і систематизовану інформацію стосовно неявних класів структур, які ще відсутні на даному етапі еволюції досліджуваної системи. Інформаційні масиви ГБД, які доповнено аналізом генетичних програм структуроутворення і поточним станом їх розробки та патентування, відкривають можливість реалізації технології генетичного передбачення та інноваційного синтезу на рівні нових Видів, популяцій, або об'єктів досліджуваного класу. За своїм призначенням ГБД можуть мати наукову, освітню, інноваційну або іншу стратегічну спрямованість.

ГБД це уніфікована платформа, створена для систематизації і тривалого використання генетичних даних та інновацій в певній галузі знань. Базуючись на технологіях великих даних і хмарних обчислень, вона надає такі послуги даних, як архівування, аналіз, пошук знань, авторизація управління та візуалізація. За вагомістю і цільовим призначенням інформаційних масивів, ГБД можуть мати локальний, галузевий та національний статус.

Генетичний банк даних можна розглядати як комплекс взаємопов'язаних

генетичних, еволюційних, таксономічних, технічних, програмних, когнітивних та інформаційних масивів, що забезпечують систематизацію, зберігання, пошук та обробку даних, без чого неможливі створення, розвиток та ефективне використання прихованого генетичного потенціалу досліджуваного функціонального класу.

При створенні ГБД функціонального класу «Мотор-шпинделі» ставились наступні завдання:

- наукове обґрунтування і підтвердження приналежності функціонального класу «Мотор – шпинделі» до категорії генетично організованих систем;
- визначення макрогенетичних програм структуроутворення і генетично допустимих видів МШ;
- експериментальне підтвердження достовірності генетичних принципів структуроутворення МШ за даними еволюційних експериментів ($T_E = 64$ роки);
- визначення та аналіз таксономічної структури (на рівні родів і видів) функціонального класу МШ;
- визначення напрямів структуроутворення і тенденцій в технічній еволюції МШ;
- визначення інноваційного потенціалу функціонального класу МШ за результатами аналізу даних ГБД.

Закони генетичної еволюції визначають минуле, сучасне і майбутнє генетично організованих систем. Генетичні банки даних, основу яких визначають макро- і мікрогенетичні програми відповідного класу технічних систем, з результатами аналізу їх еволюційних, таксономічних і патентно-інформаційних досліджень, доповнених технічними, програмними, та інноваційними даними, виконують функцію уніфікованих інтелектуальних платформ для тривалого і багатоцільового використання в науковій, інноваційній, проектно-конструкторській та освітній діяльності.

Структура ГБД містить наступні взаємопов'язані інформаційні масиви:

- макрогенетичну програму функціонального класу, яка визначає структуру елементно-інформаційного базису і генетично допустиму

різноманітність базових Видів МШ;

- результати патентно-інформаційного пошуку у вигляді інформаційної бази даних за історичний період технічної еволюції МШ, які використовуються для постановки відповідних еволюційних експериментів;
- результати генетичного, таксономічного, структурного, інформаційного та еволюційного аналізу об'єктів функціонального класу;
- результати структурного передбачення.

Відповідно до технічного завдання (ТЗ) перший етап досліджень 2022 р. передбачав проведення патентно-інформаційного пошуку за заданим об'єктом дослідження, за результатами аналізу якого було визначено контрольну вибірку об'єктів (еволюційних подій), які використовуються для постановки еволюційних експериментів.

Для кожного об'єкта контрольної вибірки аналізувалися: структура об'єкта, тип і структура приводного двигуна, як носія генетичної інформації, складові генетичної інформації і універсальний генетичний код, генетичні оператори синтезу, приналежність об'єкта до таксономічних категорій Виду, Роду і горизонтального гомологічного ряду. Результати аналізу покладено в основу генетичного банку даних по функціональному класу «Мотор – шпинделі» (рис. 5.3).



Рис. 5.3. Складові аналізу об'єктів, наявних в структурі ГБД.

Для створення ГБД використано інформаційну базу даних патентних досліджень, потужність контрольної вибірки якої становить ($N_{PK} = 104$) еволюційних подій і результати визначення макрогенетичної програми

функціонального класу МШ.

Генетичний банк даних (ГБД) функціонального класу МШ містить систематизовані в хронологічному порядку результати генетичного, структурного, таксономічного та еволюційного аналізу кожної еволюційної події (в межах контрольної вибірки), з зазначенням пріоритету, джерела інформації і графічного подання об'єкта (рис. 5.4). Структура ГБД відкрита для розширення об'єкта дослідження, уточнення і оновлення даних. За необхідністю структура ГБД може бути доповнена новими розділами, які визначаються його цільовим призначенням і узгоджуються з замовником.

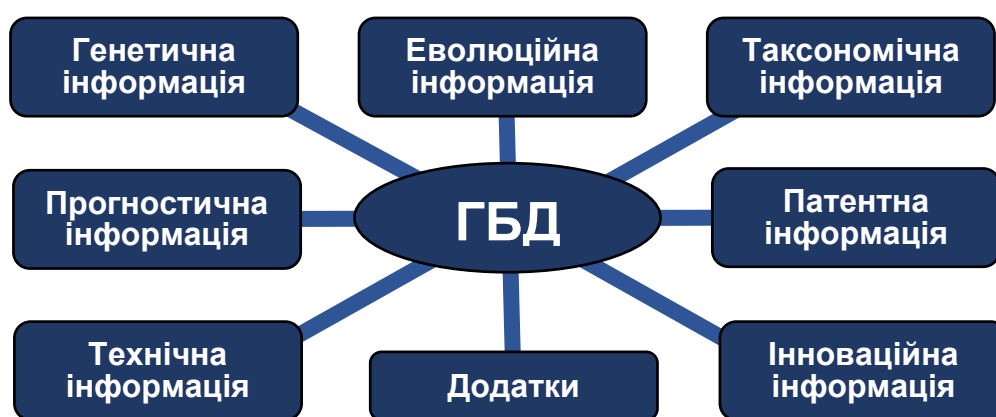


Рис. 5.4. Основні інформаційні ресурси генетичного банку даних функціонального класу «Мотор - шпинделі».

За результатами аналізу ГБД визначається кількісний склад генетично допустимих і історично задіяних Видів та Родів функціонального класу МШ, напрями їх структуроутворення, тенденції в еволюції популяцій класу. Порівняльний аналіз макрогенетичних програм структуроутворення МШ і генетичних формул об'єктів ГБД, відкриває можливість постановки завдань структурного передбачення та синтезу інноваційних технічних рішень.

ГБД по класу мотор – шпинделів є унікальним інформаційним ресурсом, оскільки узагальнює на даний час найбільшу за обсягом кількість еволюційних подій і систематизовану прогностичну інформацію в межах конкретного функціонального класу технічних об'єктів. Аналоги подібних систем в технічних науках, на даний час відсутні.

Структурно, ГБД складається з трьох основних розділів:

- Макрогенетична програма і рангова структура основних таксонів генетичної систематики функціонального класу;
- ГБД мотор-шпинделів історичного періоду еволюції класу;
- ГБД об'єктів, синтезованих і запатентованих за результатами генетичного передбачення

5.3. Генетична еволюція багатошпиндельних вузлів модульного типу.

Багатошпиндельне виконання є одним із перспективних напрямів в структурній еволюції МШ. Воно використовується на верстатах з ЧПК і оброблювальних центрах для виконання розточних, свердлильних, шліфувальних та інших технологічних процесів. Шпинделі можуть мати як індивідуальний привід, так і однопривідне виконання з різними типами багатошпиндельних головок або змінних насадок.

Багатошпиндельні агрегати можуть мати різні компоновальні схеми в тривимірному просторі R^3 , які визначають просторову орієнтацію і функціональні можливості робочих головок шпинделів (рис. 5.5, рис. 5.6):

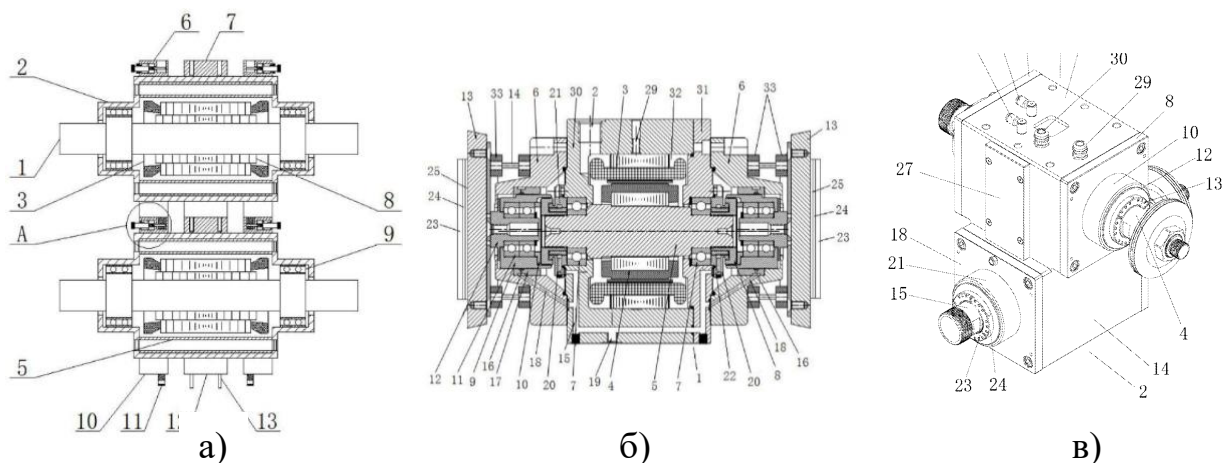


Рис. 5.5. Компоновальні схеми двошпиндельних агрегатів: а) – з паралельною кінематикою; б) з аксіальною кінематикою; в) з ортогональною кінематикою.

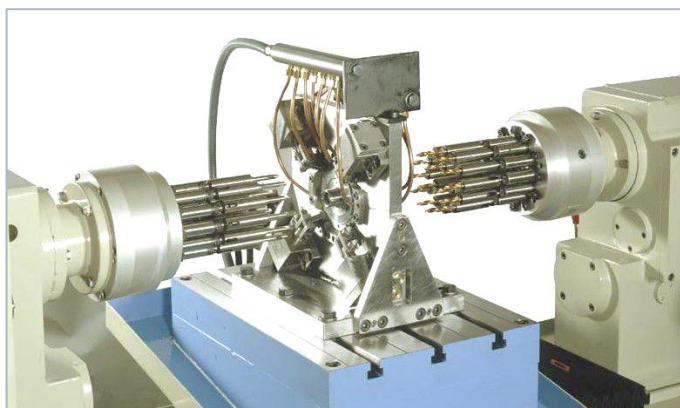


Рис. 5.6. Багатошпиндельні одноприводні головки спеціального свердлильного верстата з радіально концентричною ізомерною композицією шпинделів.

Багатошпиндельні агрегати є результатом синтезу з використанням оператора реплікації, який пов'язаний з утворенням і вибором відповідної ізомерної групи, відповідальної за просторову композицію багатоеlementних структур в тривимірному просторі. Результати еволюційних експериментів показують, що домінуючим Видом в структурній еволюції електроприводу головного руху мотор-шпинделів є Вид CL 0.2у Роду циліндричних, дольова частка якого становить більш ніж 90 % порівняно з іншими Видами.

Але в структуроутворенні систем головного електроприводу багатошпиндельних агрегатів можливо також застосування інших гомологічно споріднених Видів (KN 0.2у, TP 0.2у, PL 0.2у) (рис. 5.7).

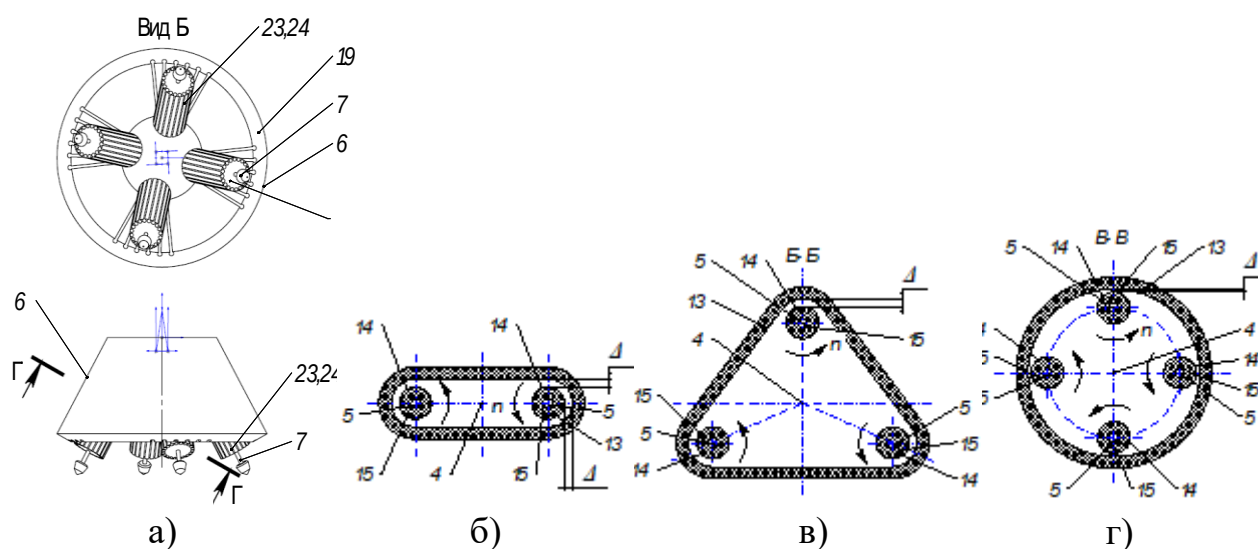


Рис. 5.7. Варіанти головного приводу багатошпиндельних вузлів: а) Вид KN 0.2у; б) Вид PL 0.2у; в) Вид-близнюк ³PL 0.2у; г) Вид ЦЛ 0.2у.

Генетичний аналіз багатошпиндельних вузлів показує, що окрім генетичних операторів реплікації R і ізомерії в їх структуроутворенні також мають місце оператори схрещування, мутації та міжсистемної гібридизації:

$$[(KN\ 0.2y)_1 \times 4(CL\ 0.2y)_2 : M_R : R_\beta] \times M_S; \quad (5.1)$$

$$[(PL\ 0.2y)_1 \times 2(CL\ 0.2y)_2 : M_R : R_{ZOY}] \times M_S; \quad (5.2)$$

$$[{}^3(PL\ 0.2y)_1 \times 3(CL\ 0.2y)_2 : M_R : R_\beta] \times M_S; \quad (5.3)$$

$$[(CL\ 0.2y)_1 \times 4(CL\ 0.2y)_2 : M_R : R_\beta] \times M_S; \quad (5.4)$$

На даний час багатошпиндельні (мультишпиндельні) електромеханічні системи представляють один з перспективних напрямів структуроутворення і інтелектуалізації в еволюції МШ. Провідні виробники створюють широкий спектр інноваційних високотехнологічних продуктів, щоб задовольнити найвищі вимоги цифрового автоматизованого виробництва (рис. 5.8)

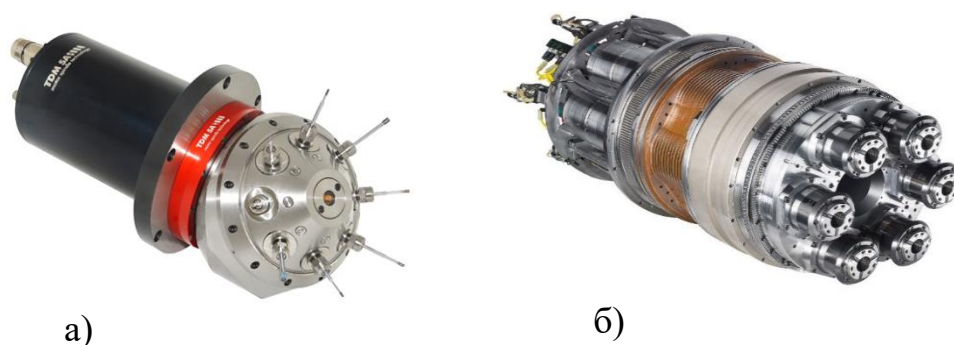


Рис. 5.8. Зразки сучасних мультишпинделів: а) з автоматичною зміною робочого інструменту (продукція фірми TDM); б) мультишпиндель фірми INDEX Corporation.

5.4. Розрахунок електродвигуна головного приводу мотор-шпинделя.

Корисна потужність, Вт:

$$P_{2H} = 26000$$

Синхронна частота обертання, об/хв

$$n_1 = 24000$$

Частота мережі, Гц

$$f = 1200$$

Напруга:

$$U_{1H} = 400$$

Кількість фаз:

$$m = 3$$

Опори - кулькові підшипники.

Виконання закрите.

Охолодження водяне.

Джерело живлення

$$P = 1 \text{ кВт}, U_1 = 400 \text{ В}, f_1 = 1200 \text{ Гц}.$$

Розрахунок проводимо для короткозамкненої обмотки ротора з алюмінію.

Визначення основних розмірів двигуна.

Число пар полюсів :

$$p = \frac{f \cdot 60}{n_1} = \frac{1200 \cdot 60}{24000} = 3$$

На підставі аналізу технічних даних високошвидкісних асинхронних електродвигунів задаємося величинами к. п. д., коефіцієнта потужності і коефіцієнта k_e :

Заданий ККД

$$\eta_H = 0.5$$

Заданий коефіцієнт потужності, в.о.

$$\cos \varphi_H = 0.95$$

Коефіцієнт відношення ЕРС до напруги:

$$k_E = 0.972$$

Розрахункова потужність, Вт

$$P' = P_{2H} \cdot \frac{k_E}{\eta_H \cdot \cos \varphi_H} = 26000 \cdot \frac{0.972}{0.5 \cdot 0.95} = 53204.2105$$

Ротор виконуємо з к.з алюмінієвою обмоткою і шихтованим із листової сталі E41 товщиною 0,35 мм.

Приймаємо:

Задане ковзання, %

$$s_3 = 3$$

$$n_2 = n_1 \cdot \left(1 - \frac{s_3}{100} \right) = 23280$$

Зовнішній діаметр магнітопроводу статора, м

$$D_a = 0.134$$

Коефіцієнт відношення внутрішнього діаметру магнітопроводу статора до зовнішнього

$$K_D = 0.68$$

Внутрішній діаметр магнітопроводу статора, м

$$D' = K_D \cdot D_a = 0.68 \cdot 0.134 = 0.0911$$

Приймаємо

$$D = D' = 0.0911$$

Повітряний проміжок, мм:

$$\delta = \frac{D}{1.2} \cdot \left(1 + \frac{9}{2 \cdot p} \right) = \frac{0.0911}{1.2} \cdot \left(1 + \frac{9}{2 \cdot 3} \right) = 0.1898$$

Зовнішній діаметр ротора, м

$$D_2 = \left(D - 2\delta \cdot 10^{-3} \right) = 0.0907$$

Полюсна поділка, м

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{\pi \cdot 0.0911}{2 \cdot 3} = 0.0477$$

Розрахункова довжина пакету статора, см:

$$A = 85 \cdot D = D' \cdot 100 = 9.112 \quad k_B = 1.1 \quad B_\delta = 3000 \quad a_\delta = 0.66 \quad k_{01} = 0.92$$

$$l_\delta = \frac{8.62 \cdot 10^7 \cdot P'}{a_\delta \cdot k_B \cdot k_{01} \cdot B_\delta \cdot A \cdot D^2 \cdot n_1} = \frac{8.62 \cdot 10^7 \cdot 5.3204 \times 10^4}{0.66 \cdot 1.1 \cdot 0.92 \cdot 3 \times 10^3 \cdot 85 \cdot 9.112^2 \cdot 2.4 \times 10^4} = 13.5129$$

Відношення

$$\lambda = \frac{l_\delta}{D} = \frac{13.5129}{9.112} = 1.483$$

Отримане значення λ задовольняє рекомендованому значенню.

Розрахунок обмоток ротора і статора.

Приймаємо кількість пазів на полюс і фазу $q_1=2$

Тоді загальна кількість пазів статора :

$$q_1 = 2$$

$$Z_1 = q_1 \cdot 2p \cdot m = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 = 36$$

Зубцева поділка, см

$$t_{z1} = \frac{\pi D}{2p \cdot m \cdot q_1} = \frac{\pi \cdot 9.112}{2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 2} = 0.7952$$

Номінальний струм, А:

$$I_{1H} = \frac{P_{2H}}{m \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{26000}{3 \cdot 400 \cdot 0.95 \cdot 0.5} = 45.614$$

Число ефективних провідників у пазу

$$a_1 = 8$$

$$N_{п.} = \frac{A \cdot t_{z1} \cdot a_1}{I_{1H}} = \frac{85 \cdot 0.7952 \cdot 8}{45.614} = 11.8542$$

$$N_{\Pi} = 12$$

Число елементарних провідників в одному ефективному:

$$n_{\text{ел}} = 9$$

Для машин з водяним охолодженням статора, приймаємо густину струму в обмотці, а/мм²:

$$\Delta_{i1.} = 8.5$$

Поперечний переріз провідника (заздалегідь), мм²:

$$S_{i1.} = \frac{I_{1H}}{a_1 \cdot n_{\text{ел}} \cdot \Delta_{i1.}} = \frac{45.614}{8 \cdot 9 \cdot 8.5} = 0.0745$$

Обираємо провід марки ПЭВ-2:

$$d = 0.31 \quad d_{i3} = 0.37 \quad \frac{d}{d_{i3}} = 0.8378 \quad S_{i1} = 0.0755$$

Щільність струму в елементарному провіднику:

$$\Delta_{i1} = \frac{I_{1H}}{a_1 \cdot n_{\text{ел}} \cdot S_{i1}} = \frac{45.614}{8 \cdot 9 \cdot 0.0755} = 8.3911$$

Загальна кількість провідників в пазу:

$$n_{\Pi} = N_{\Pi} \cdot n_{\text{ел}} = 12 \cdot 9 = 108$$

Площа, займана ізольованими провідниками, мм²:

$$n_{\Pi} \cdot d_{i3}^2 = 14.7852$$

Для коефіцієнта заповнення паза $K_z = 0,4$ площа пазу без ізоляції:

$$S_{\Pi} = n_{\Pi} \cdot \frac{d_{i3}^2}{0.4} = 108 \cdot \frac{0.37^2}{0.4} = 36.963$$

Товщина ізоляції по ширині пазу на дві сторони:

$$2(0,1+0,15) = 0,5 \text{ мм}$$

Кількість витків фази :

$$w_1 = p \cdot q_1 \cdot \frac{N_{\text{п}}}{a_1} = 3 \cdot 2 \cdot \frac{12}{8} = 9$$

Обираємо петльову двошарову обмотку з укороченням кроку, що дозволяє поліпшити форму кривої поля, а отже, зменшити розсіювання і додаткові втрати.

Крок обмотки :

$$y = 0.8 \cdot 3 \cdot q_1 = 4.8$$

Обираємо:

$$y = 5$$

Крок обмотки в долях від полюсного поділу:

$$\beta = \frac{5}{6} = 0.8333$$

Обмоткові коефіцієнти по першій гармоніці рівні:

$$k_{p1} = 0.967 \ k_{y1} = 0.966 \ k_{o1} = 0.934$$

Магнітний потік в повітряному проміжку, мкс:

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_{1H} \cdot 10^8}{4 \cdot k_B \cdot w_1 \cdot k_{o1} \cdot f} = \frac{0.972 \cdot 400 \cdot 10^8}{4 \cdot 1.1 \cdot 9 \cdot 0.934 \cdot 1200} = 875997.664$$

Індукція в повітряному проміжку, Гс:

$$B_{\delta} = \frac{\Phi}{a_{\delta} \cdot 3.92 \cdot l_{\delta}} = \frac{8.76 \times 10^5}{0.66 \cdot 3.92 \cdot 13.5129} = 25056.6478$$

Для статора обраємо електротехнічну листову сталь марки E44 з товщиною пластин 0,2 мм. Ізоляція листів оксидна плівка. Коефіцієнт заповнення пакету сталлю $K_c = 0.89$.

Індукція в зубці статора, Гс:

$$k_c = 0.89$$

$$B'_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z1} \cdot l_{\delta}}{0.7 \cdot l_{\delta} \cdot k_c} = \frac{2.5057 \times 10^4 \cdot 0.7952 \cdot 13.5129}{0.7 \cdot 13.5129 \cdot 0.89} = 31981.292$$

Зовнішній діаметр пакету статора, м:

$$D_a = 0.134$$

Висота спинки статора, см:

$$h_c = \frac{D_a \cdot 100 - D}{2} - 1 = \frac{0.134 \cdot 100 - 9.112}{2} - 1 = 1.144$$

Індукція в спинці статора:

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_c \cdot l_{\delta} \cdot k_c} = \frac{8.76 \times 10^5}{2 \cdot 1.144 \cdot 13.5129 \cdot 0.89} = 31835.1532$$

Ротор виконується з закритими скошеними пазами. Число пазів $z_2 = 15$.

Зубцева поділка ротора :

$$Z_2 = 40$$

$$t_{z2} = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot 100}{Z_2} = \frac{\pi \cdot 0.0907 \cdot 100}{40} = 0.7127$$

Струм в стержні, А:

$$v_i = \frac{2 \cdot m \cdot w_1 \cdot k_{01}}{Z_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 9 \cdot 0.92}{40} = 1.242$$

$$k_i = 0.81$$

$$I_{2H} = k_i \cdot v_i \cdot I_{1H} = 0.81 \cdot 1.242 \cdot 45.614 = 45.8886$$

де $K_i = 0.81$ при $\cos \phi = 0.75$.

Струм у короткозамкненому кільці, А:

$$I_K = \frac{I_{2H}}{2 \cdot \sin\left(\pi \cdot p \div Z_2\right)} = \frac{45.8886}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 3}{40}\right)} = 98.2856$$

Щільність струму в стержні приймаємо (заздалегідь), А/мм² :

$$\Delta_{i2} = 5$$

Поперечний переріз елементарного стержня:

$$S_{ст} = \frac{I_{2н}}{\Delta_{i2}} = \frac{45.8886}{5} = 9.1777$$

Приймаємо діаметр стержня $d_{ст}=3,4$ мм, переріз стержня $S_{i2} = 9.0746$ мм².

Тоді:

$$S_{i2} = 9.0746$$

$$\Delta_{i2} = \frac{I_{2н}}{S_{i2}} = \frac{45.8886}{9.0746} = 5.0568$$

Попередньо приймаємо густину струму в короткозамкненому кільці:

$$\Delta_{к.} = 2$$

Переріз короткозамкненого кільця:

$$S_{к.} = \frac{I_{к.}}{\Delta_{к.}} = \frac{98.2856}{2} = 49.1428$$

Розміри і переріз короткозамкненого кільця:

$$S_{к} = 49$$

Густина струму в кільці:

$$\Delta_{к} = \frac{I_{к.}}{S_{к}} = \frac{98.2856}{49} = 2.0058$$

Приймаємо діаметр валу, см:

$$d_B = 2$$

Висота спинки ротора (без аксіальних каналів), см :

$$d_{ст} = 3.4$$

$$h_p = \frac{D_2 \cdot 100}{2} - 0.34 = \frac{0.0907 \cdot 100}{2} - 0.34 = 4.197$$

Індукція в спинці ротора :

$$B_p = \frac{\Phi}{2 \cdot h_p \cdot l_\delta \cdot k_c} = \frac{8.76 \times 10^5}{2 \cdot 4.197 \cdot 13.5129 \cdot 0.89} = 8677.4531$$

Електромагнітний розрахунок

Коефіцієнт повітряного проміжку :

$$a_c = 0.15$$

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{a_c}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{a_c}{\delta}} = \frac{\left(\frac{0.15}{0.1898}\right)^2}{5 + \frac{0.15}{0.1898}} = 0.1078$$

$$k_{\delta 1} = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \delta \cdot \gamma_1} = \frac{0.7952}{0.7952 - 0.1898 \cdot 0.1078} = 1.0264$$

$$k_{\delta 2} = 1$$

$k_{\delta 2}=1$, оскільки пази ротора закриті.

$$k_\delta = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} = 1.0264$$

Магнітна напруга повітряного проміжку :

$$F_\delta = 1.6 \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot k_\delta = 1.6 \cdot 2.5057 \times 10^4 \cdot 0.1898 \cdot 1.0264 = 7811.6335$$

Магнітна напруга зубців статора :

$$h_{z1} = 0.15 H_{z1} = 20$$

$$F_{z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 0.15 \cdot 20 = 6$$

Ширина зубця для круглого паза ротора, см:

$$d_2 = 0.34 h_4 = 0.05$$

$$b_{z2} = \frac{\pi \cdot \left(D_2 \cdot 100 - \frac{2}{3} \cdot d_2 - 2h_4 \right)}{Z_2} - 0.94 \cdot d_2 =$$

$$= \frac{\pi \cdot \left(0.0907 \cdot 100 - \frac{2}{3} \cdot 0.34 - 2 \cdot 0.05 \right)}{40} - 0.94 \cdot 0.34 = 0.3674$$

Індукція в зубці:

$$B_{z2} = \frac{B_\delta \cdot t_{z2} \cdot l_\delta}{b_{z2} \cdot l_\delta \cdot k_c} = \frac{2.5057 \times 10^4 \cdot 0.7127 \cdot 13.5129}{0.3674 \cdot 13.5129 \cdot 0.89} = 54609.0314$$

Магнітна напруга зубців ротора :

$$h_{z2} = 0.34 H_{z2} = 13$$

$$F_{z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2} = 2 \cdot 0.34 \cdot 13 = 8.84$$

Коефіцієнт насичення зубців :

$$k_z = \frac{F_{z1} + F_{z2} + F_\delta}{F_\delta} = \frac{6 + 8.84 + 7.8116 \times 10^3}{7.8116 \times 10^3} = 1.0019$$

Отримане значення мало відрізняється від прийнятого спочатку розрахунку $k_z = 1,1$, тому повторний розрахунок не потрібний.

Магнітна напруга спинки статора :

$$e = 0.61$$

$$L_{j1} = \frac{\pi \cdot (D_a \cdot 100 - h_c)}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0.134 \cdot 100 - 1.144)}{2 \cdot 3} = 6.4172$$

$$H_{j1} = 2.38$$

$$F_{j1} = e \cdot H_{j1} \cdot L_{j1} = 0.61 \cdot 2.38 \cdot 6.4172 = 9.3165$$

Магнітна напруга спинки ротора:

$$H_{j2} = 0.94 L_{j2} = 1.96$$

$$F_{j2} = e \cdot H_{j2} \cdot L_{j2} = 0.61 \cdot 0.94 \cdot 1.96 = 1.1239$$

Намагнічуюча сила ланцюга (на два полюси):

$$F_{\text{ланк}} = F_{z1} + F_{z2} + F_{\delta} + F_{j1} + F_{j2} = 6 + 8.84 + 7.8116 \times 10^3 + 9.3165 + 1.1239 = 7836.9138$$

Загальний коефіцієнт насичення:

$$k_{\text{нас}} = \frac{F_{\text{ланк}}}{F_{\delta}} = \frac{7.8369 \times 10^3}{7.8116 \times 10^3} = 1.0032$$

Намагнічувальний струм:

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_{\text{ланк}}}{0.9 \cdot m \cdot w_1 \cdot k_{01}} = \frac{3 \cdot 7.8369 \times 10^3}{0.9 \cdot 3 \cdot 9 \cdot 0.92} = 1051.6524$$

у відсотках від номінального струму

$$\frac{I_{\mu}}{I_{1H}} \cdot 100 = 2305.5457$$

Розрахунок параметрів робочого режиму

Середня ширина секції:

$$\tau_y = \frac{\pi \cdot (D + h_{z1})}{2p} = \frac{\pi \cdot (9.112 + 0.15)}{2 \cdot 3} = 4.8496$$

Довжина лобової частини обмотки статора :

$$k = 1.3 \quad L = 1.15$$

$$l_{\text{л1}} = \tau_y \cdot k + L = 4.8496 \cdot 1.3 + 1.15 = 7.4544$$

Довжина вильоту лобової частини:

$$f = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{l_{\text{л1}}^2 - \tau_y^2} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{7.4544^2 - 4.8496^2} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = 2.4514$$

Середня довжина напіввитка обмотки статора:

$$l_{\text{ср}} = l_{\delta} + l_{\text{л1}} = 13.5129 + 7.4544 = 20.9674$$

Загальна довжина провідників фази обмотки статора, м:

$$L_1 = l_{cp} \cdot 2w_1 \cdot 10^{-2} = 20.9674 \cdot 2 \cdot 9 \cdot 10^{-2} = 3.7741$$

Активний опір обмотки статора, Ом:

$$\rho_{15} = 0.0175$$

$$a = \sqrt{\frac{10 \cdot 0.31 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot f}{5.7 \cdot 1.24 \cdot 0.0175}} = 0.3446$$

$$e_{\cdot} = 0.31 \cdot a = 0.1068$$

$$k_r = 1 + \frac{m^2 - 0.2 \cdot e_{\cdot}^4}{15.25} = 1 + \frac{3^2 - 0.2 \cdot 0.1068^4}{15.25} = 1.5902$$

$$r_1 = 1.24 \cdot \rho_{15} \cdot k_r \cdot \frac{L_1}{n_{ел} \cdot S_{i1} \cdot a_1} = 1.24 \cdot 0.0175 \cdot 1.5902 \cdot \frac{3.7741}{9 \cdot 0.0755 \cdot 8} = 0.024$$

Число провідників по ширині пазу $n = 10$. Ширина пазу $a_{II} = 5,7$ мм. Число рядів провідників в пазу $m = 8$.

У відносних одиницях:

$$r'_1 = \frac{I_{1H} \cdot r_1}{U_{1H}} = \frac{45.614 \cdot 0.024}{400} = 0.0027$$

Опір стержня:

$$r_{ст} = 1.24 \cdot 0.0496 \cdot \frac{l_{\delta} \cdot 10^{-2}}{S_{i2}} = 1.24 \cdot 0.0496 \cdot \frac{13.5129 \cdot 10^{-2}}{9.0746} = 915.8532 \times 10^{-6}$$

Активний опір обмотки ротора:

$$r_2 = r_{ст} + \frac{2 \cdot 0.123 \cdot 10^{-4}}{0.416^2} = 0.0011$$

Опір частини короткозамкненого кільця між сусідніми стержнями:

$$a = 0.43$$

$$D_k = D_2 \cdot 100 - a = 0.0907 \cdot 100 - 0.43 = 8.644$$

$$r_k = 0.0496 \cdot \frac{\pi D_k}{Z_2 \cdot S_k} = 0.0496 \cdot \frac{\pi \cdot 8.644}{40 \cdot 49} = 687.2139 \times 10^{-6}$$

Коефіцієнт приведення параметрів білячої клітки до обмотки статора :

$$k_{\Pi} = \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot k_{01})^2}{Z_2} = \frac{4 \cdot 3 \cdot (9 \cdot 0.92)^2}{40} = 20.5675$$

Активний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора:

$$r'_2 = r_2 \cdot k_{\Pi} = 1.058 \times 10^{-3} \cdot 20.5675 = 0.0218$$

у відносних одиницях:

$$r'_3 = \frac{I_{1H} \cdot r'_2}{U_{1H}} = \frac{45.614 \cdot 0.0218}{400} = 0.0025$$

Якщо порівняти опори r_1^* і $r_2'^*$ проектованої високочастотної мікромашини з аналогічними опороми звичайних асинхронних машин потужністю близько сотень кіловат, то можна бачити, що вони близькі за величиною.

Коефіцієнти магнітної провідності розсіювання статора :

1) для пазового розсіювання:

$$\lambda_{\Pi 1} = 0.43$$

2) для диференційного розсіювання:

$$\lambda_{д1} = 0.51$$

3) для розсіювання лобових частин :

$$\lambda_{л1} = 0.34 \cdot \frac{q_1}{l_{\delta}} \cdot (l_{л1} - 0.64\tau) = 0.34 \cdot \frac{2}{13.5129} \cdot (7.4544 - 0.64 \cdot 0.0477) = 0.3736$$

Індуктивний опір розсіювання обмотки статора без урахування скошу пазів:

$$x_1 = 0.158 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_\delta}{p \cdot q_1} \cdot (\lambda_{п1} + \lambda_{л1} + \lambda_{д1}) =$$

$$= 0.158 \cdot \frac{1.2 \times 10^3}{100} \cdot \left(\frac{9}{100} \right)^2 \cdot \frac{13.5129}{3 \cdot 2} \cdot (0.43 + 0.3736 + 0.51) = 0.0454$$

у відносних одиницях:

$$x'_{1.} = x_1 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0.0454 \cdot \frac{45.614}{400} = 0.0052$$

Коефіцієнт магнітної провідності розсіювання ротора:

1) для пазового розсіювання закритого круглого паза при:

$$\lambda_{п2} = 2.17$$

2) для диференціального розсіювання:

$$\lambda_{д2} = 0.78$$

3) для розсіювання лобових частин:

$$\lambda_{л2} = 0.44$$

Індуктивний опір розсіювання обмотки ротора:

$$x_2 = 7.9 \cdot f \cdot l_\delta \cdot (\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}) \cdot 10^{-6} =$$

$$= 7.9 \cdot 1.2 \times 10^3 \cdot 13.5129 \cdot (2.17 + 0.44 + 0.78) \cdot 10^{-6} = 0.4343$$

Приводимо до числа витків статора:

$$x'_2 = x_2 \cdot \frac{4m \cdot (w_1 \cdot k_{01})^2}{Z_2} = 0.4343 \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (9 \cdot 0.92)^2}{40} = 8.9318$$

Відносне значення:

$$x'_{2.} = x'_2 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 8.9318 \cdot \frac{45.614}{400} = 1.0185$$

Опір x'_2 більший, ніж у звичайних машин, оскільки паз ротора закритий і

частота досить висока $f_1 = 2500$ Гц.

Індуктивний опір взаємної індукції:

$$x_{12} = \frac{U_{1H} - x_1 \cdot I_\mu}{I_\mu} = \frac{400 - 0.0454 \cdot 1.0517 \times 10^3}{1.0517 \times 10^3} = 0.3349$$

У відносних одиницях:

$$x'_{12} = x_{12} \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0.3349 \cdot \frac{45.614}{400} = 0.0382$$

Скіс пазів на роторі - на один зубцевий поділ статора, см:

$$b_{ск} = t_{z1} = 0.7952$$

Кут скосу пазів в електричних градусах:

$$a_{ск} = \frac{360 \cdot t_{z1}}{\pi \cdot 2.5} = 36.448$$

Відношення:

$$\varepsilon = \frac{U_{1H}}{I_\mu \cdot x_1} = \frac{400}{1.0517 \times 10^3 \cdot 0.0454} = 8.3716$$

Розрахунок втрат в сталі та механічних втрат

Вага спинки статора, кг:

$$\gamma = 7.55$$

$$m_{ac} = \gamma \cdot h_c \cdot l_\delta \cdot k_c \cdot L_{j1} \cdot 2 \cdot p \cdot 10^{-3} = 7.55 \cdot 1.144 \cdot 13.5129 \cdot 0.89 \cdot 6.4172 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 3.9996$$

Втрати в спинці статора:

$$\begin{aligned} \Pi_{cj1} &= \left(2.85 \cdot 10^6 \cdot 2.4 \cdot f + 4.4 \cdot 10^6 \cdot 2.4 \cdot f^2 \cdot \delta^2 \right) \cdot B_a^2 \cdot 10^{-16} \cdot m_{ac} = \\ &= \left[2.85 \cdot 10^6 \cdot 2.4 \cdot 1.2 \times 10^3 + 4.4 \cdot 10^6 \cdot 2.4 \cdot (1.2 \times 10^3)^2 \cdot 0.1898^2 \right] \cdot \\ &\cdot (3.1835 \times 10^4)^2 \cdot 10^{-16} \cdot 3.9996 = 225451.765 \end{aligned}$$

Коефіцієнт $k_{J\mathcal{E}} - k_{J\Phi} = 2,4$ враховує нерівномірність індукції і вплив додаткових вихрових струмів.

Вага зубців статора, кг:

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot 0.7 \cdot 10^{-3} \cdot Z_1 \cdot l_{\delta} \cdot k_c \cdot \gamma = 0.15 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3} \cdot 36 \cdot 13.5129 \cdot 0.89 \cdot 7.55 = 0.3432$$

Втрати в зубцях статора:

$$\begin{aligned} P_{cz1} &= \left(2.85 \cdot 10^6 \cdot 1.2 \cdot f + 4.4 \cdot 10^6 \cdot 1.5 \cdot f^2 \cdot \delta^2 \right) \cdot B'_{z1}{}^2 \cdot 10^{-16} \cdot m_{z1} = \\ &= \left[2.85 \cdot 10^6 \cdot 1.2 \cdot 1.2 \times 10^3 + 4.4 \cdot 10^6 \cdot 1.5 \cdot (1.2 \times 10^3)^2 \cdot 0.1898^2 \right] \cdot \\ &\cdot (3.1981 \times 10^4)^2 \cdot 10^{-16} \cdot 0.3432 = 12167.3282 \end{aligned}$$

Оскільки пази на роторі закриті, то поверхневі втрати в статорі дорівнюють нулю.

Питомі поверхневі втрати:

$k_0 = 2,5$ - дослідний коефіцієнт.

$$k_{02} = 2.5$$

Амплітуда коливань індукції в повітряному проміжку:

$$a_2 = 0 \quad \beta_{02} = 0.25$$

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta} = 0.25 \cdot 1.0264 \cdot 2.5057 \times 10^4 = 6429.6807$$

$$\begin{aligned} P_{пов2} &= 0.5 \cdot k_{02} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n_1}{10000} \right)^{1.5} \cdot \left(\frac{B_{02} \cdot t_{z1}}{1000} \right)^2 = \\ &= 0.5 \cdot 2.5 \cdot \left(\frac{36 \cdot 2.4 \times 10^4}{1 \times 10^4} \right)^{1.5} \cdot \left(\frac{6.4297 \times 10^3 \cdot 0.7952}{1 \times 10^3} \right)^2 = 26241.0743 \end{aligned}$$

Поверхневі втрати в зубцях ротора:

$$P_{пов2} = P_{пов2} \cdot \left(\frac{t_{z2} - a_2}{t_{z2}} \right) \cdot 2 \cdot p \cdot \tau \cdot l_{\delta} \cdot 10^{-7} =$$

$$= 2.6241 \times 10^4 \cdot \frac{0.7127 - 0}{0.7127} \cdot 2 \cdot 3 \cdot 0.0477 \cdot 13.5129 \cdot 10^{-7} = 0.0102$$

Амплітуда пульсацій індукції в середньому перерізі зубця :

$$B_{\text{пул2}} = \frac{\gamma_1 \cdot \delta \cdot 10^{-3}}{2 \cdot t_{z2}} \cdot B_{z2} = \frac{0.1078 \cdot 0.1898 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0.7127} \cdot 5.4609 \times 10^4 = 0.7843$$

Вага зубців ротора :

$$\gamma_c = 7.8$$

$$m_{z2} = Z_2 \cdot h_{z2} \cdot b_{z2} \cdot 10^{-3} \cdot l_{\delta} \cdot k_c \cdot \gamma_c = 40 \cdot 0.34 \cdot 0.3674 \cdot 10^{-3} \cdot 13.5129 \cdot 0.89 \cdot 7.8 = 0.4687$$

Пульсаційні втрати в зубцях ротора :

$$P_{\text{пул2}} = 0.14 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n_1}{1000 \cdot 10000} \cdot B_{\text{пул2}} \right)^2 \cdot m_{z2} =$$

$$= 0.14 \cdot \left(\frac{36 \cdot 2.4 \times 10^4}{1 \times 10^3 \cdot 1 \times 10^4} \cdot 0.7843 \right)^2 \cdot 0.4687 = 301.3104 \times 10^{-6}$$

Втрати в сталі (основні, додаткові і загальні):

$$P_{\text{ст.осн}} = P_{\text{cj1}} + P_{\text{cz1}} = 2.2545 \times 10^5 + 1.2167 \times 10^4 = 237619.0932$$

$$P_{\text{ст.дод}} = P_{\text{пов2}} + P_{\text{пул2}} = 0.0102 + 3.0131 \times 10^{-4} = 0.0105$$

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ст.осн}} + P_{\text{ст.дод}} = 2.3762 \times 10^5 + 0.0105 = 237619.1036$$

Втрати на тертя ротора об повітря:

$$\Omega_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_2}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 23280}{60} = 2437.8759$$

$$P_{\text{тр}} = 1.1 \cdot 10^{-6} \cdot \Omega_2^2 \cdot D_2^5 \cdot \left(1 + 5 \cdot \frac{l_{\delta}}{D_2} \right) \cdot 10^3 =$$

$$= 1.1 \cdot 10^{-6} \cdot (2.4379 \times 10^3)^2 \cdot 0.0907^5 \cdot \left(1 + 5 \cdot \frac{13.5129}{0.0907}\right) \cdot 10^3 = 29.9861$$

де c - постійна, яка залежить від жорсткості поверхні ротора для шліфувального ротора, $c = 1,1 \cdot 10^{-8}$;

Втрати на тертя в підшипниках:

$$P_{\text{т.п.}} = \frac{0.0025 \cdot 1.85 \cdot 99 \cdot 736}{75} = 4.4933$$

де $f_{\text{пр}} = 0,0025$ - приведений коефіцієнт тертя для радіально упорних шарикопідшипників; $R_{\text{п}} = 1,85$ кГ - навантаження на підшипнику.

Розрахунок робочих характеристик

Активна складова струму при ковзанні $s=0$ дорівнює:

$$I_{\text{ca}} = \frac{P_{\text{ст.осн}} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1}{3 \cdot U_{1\text{н}}} = \frac{2.3762 \times 10^5 + 3 \cdot (1.0517 \times 10^3)^2 \cdot 0.024}{3 \cdot 400} = 264.2563$$

Коефіцієнт схеми заміщення

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{0.0454}{0.3349} = 1.1357$$

$$S_m = \frac{c_1 \cdot r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 \cdot x'_2)^2}} = \frac{1.1357 \cdot 0.0218}{\sqrt{0.024^2 + \left(\frac{0.0454}{1.1357} \cdot 8.9318\right)^2}} = 0.069$$

Струм ротора при критичному ковзанні:

$$I_{2m} = 3.82$$

Кратність максимального обертового моменту (без урахування насичення від полів розсіювання)

$$M_{\text{max}*} = \left(\frac{I_{2m}}{2.2}\right)^2 \cdot \frac{s_3 \div 100}{S_m} = \left(\frac{3.82}{2.2}\right)^2 \cdot \frac{\frac{3}{100}}{0.069} = 1.3108$$

Визначаємо кратність максимального обертового моменту з урахуванням насичення.

Вторинний струм з урахуванням насичення:

$$I_{2mn} = k_{\text{нас}} \cdot I_{2m} = 3.8324$$

де I_{2m} - струм при s_m без врахування насичення.

Визначимо x_1 та x_2 з врахуванням насичення. Середня н.с., віднесена до одного пазу статора:

$$\begin{aligned} F_{\text{п.ср}} &= 0.7 \cdot \frac{I_{2mn} \cdot N_{\text{п.}}}{a_1} \cdot \left(0.88 + 0.966 + \frac{k_{01} \cdot Z_1}{Z_2} \right) = \\ &= 0.7 \cdot \frac{3.8324 \cdot 11.8542}{8} \cdot \left(0.88 + 0.966 + \frac{0.92 \cdot 36}{40} \right) = 10.6294 \end{aligned}$$

де $k\beta = 0.88$ — коефіцієнт, який враховує зменшення н.с. внаслідок укороченого кроку.

Фіктивна (умовна) індукція в повітряному зазорі:

де коефіцієнт:

$$C_n = 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{z1} + t_{z2}}} = 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{0.1898}{0.7952 + 0.7127}} = 1.527$$

$$B_{\text{ср}\delta} = \frac{F_{\text{п.ср}}}{\delta \cdot 1.6 \cdot C_n} = \frac{10.6294}{0.1898 \cdot 1.6 \cdot 1.527} = 22.9172$$

Для закритого паза ротора зменшення коефіцієнта провідності пазової розсіювання через насичення:

$$\lambda_{\text{п2н}} = 1.56$$

$$\Delta\lambda_2 = \lambda_{\text{п2}} - \lambda_{\text{п2н}} = 2.17 - 1.56 = 0.61$$

Сума коефіцієнтів провідності при врахуванні насичення зубців:

$$\Sigma\lambda_{3н} = \lambda_{\text{п2н}} + \lambda_{\text{д2}} + \lambda_{\text{п2}} = 1.56 + 0.78 + 2.17 = 4.51$$

Індуктивний опір розсіювання ротора з урахуванням насичення:

$$x'_{3п} = x'_2 \cdot \frac{\Sigma \lambda_{3н}}{\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}} = 8.9318 \cdot \frac{4.51}{2.17 + 0.44 + 0.78} = 11.8827$$

Визначення першої критичної швидкості:

Асинхронний електрошпіндель на кулькових підшипниках виготовляється з ексцентриситетом ротора не більше 0,01б.

$$e_0 = 0.01 \cdot \delta = 0.0019$$

Величина максимальної питомої сили магнітного притягання, кг/см:

$$t = 1.5 \cdot D_2 \cdot 100 \cdot \frac{l_\delta}{\delta} = 1.5 \cdot 0.0907 \cdot 100 \cdot \frac{13.5129}{0.1898} = 968.8781$$

Початкова сила одностороннього магнітного притягнення:

$$T_0 = 1.5 \cdot D_2 \cdot 100 \cdot \frac{l_\delta \cdot e_0}{\delta} = 1.5 \cdot 0.0907 \cdot 100 \cdot \frac{13.5129 \cdot 1.8983 \times 10^{-3}}{0.1898} = 1.8393$$

Динамічний прогин валу від одиничної сили, прикладеної до середини ротора, при номінальній швидкості обертання ротора і відсутності навантаження на валу:

Момент інерції перерізу:

$$J = \frac{\pi \cdot d_B^4}{64} = 0.7854$$

$$\varphi_1 = \frac{3 \cdot 6.2^2 \cdot 3.1 - 4 \cdot 3.1^3}{48 \cdot 2.2 \cdot 10^6 \cdot 0.7854} = 2.8736 \times 10^{-6}$$

де модуль пружності сталі, кг/см²:

$$E = 2.2 \cdot 10^6$$

Вага валу, кг:

$$G_B = 0.3311$$

Вага пакету ротора, кг:

$$G_p = 9.31462$$

Динамічний прогин на середині валу від сумарної сили, що діє на ротор, см

$$f_1 = \frac{(G_B + G_p + T_0) \cdot \varphi_1}{1 - t \cdot \varphi_1} =$$

$$= \frac{(0.3311 + 9.3146 + 1.8393) \cdot 2.8736 \times 10^{-6}}{1 - 968.8781 \cdot 2.8736 \times 10^{-6}} = 33.0949 \times 10^{-6}$$

Критична швидкість обертання, об/хв:

$$n_k = \frac{300}{\sqrt{f_1}} = \frac{300}{\sqrt{3.3095 \times 10^{-5}}} = 52148.3677$$

При роботі МШ в процесі шліфування з'являється радіальна сила від навантаження $P_{\text{макс}}$.

Номінальний обертовий момент, кг/см:

$$M_H = \frac{100 \cdot P_{2H}}{1.028 \cdot n_2} = \frac{100 \cdot 26000}{1.028 \cdot 23280} = 108.6419$$

Максимальний обертовий момент:

$$M_{\text{макс}} = 1.78 \cdot 108.6419 = 193.3826$$

Реакція передачі, кг:

$$P_{\text{макс}} = \frac{2 \cdot M_{\text{макс}}}{3} = 128.9217$$

де радіус шліфувального круга $R = 3$ см, коефіцієнт передачі $k_2 = 2$.

Прогин валу від одиничної сили, прикладеної в точці прикладання реакції передачі $P_{\text{макс}}$.

$$\varphi_2 = \frac{6.2^2 \cdot 3.3}{16 \cdot 2.2 \cdot 10^6 \cdot 0.7854} = 4.5884 \times 10^{-6}$$

Прогин валу:

$$f_2 = \frac{P_{\text{макс}} \cdot \varphi_2}{1 - t \cdot \varphi_1} = \frac{128.9217 \cdot 4.5884 \times 10^{-6}}{1 - 968.8781 \cdot 2.8736 \times 10^{-6}} = 593.1994 \times 10^{-6}$$

Результуючий прогин з урахуванням напрямку дії сил, см:

$$f_{\Sigma} = \sqrt{f_1^2 + f_2^2} = \sqrt{(33.0949 \times 10^{-6})^2 + (593.1994 \times 10^{-6})^2} = 594.1218 \times 10^{-6}$$

Критична швидкість обертання:

$$n_{\text{к.}} = \frac{300}{\sqrt{f_{\Sigma}}} = \frac{300}{\sqrt{594.1218 \times 10^{-6}}} = 12307.887$$

Пуск електрошпинделя проводиться без навантаження. У номінальному режимі при $n_2 = 23280$ об / хв шпиндель не досягне критичної швидкості $n_{\text{к}} = 12307.887$ об / хв). Жорсткість валу діаметром $d_v = 20$ мм при зазначених умовах є достатньою.

Спроектований електродвигун за конструкцією аналогічний конструкції двигуна головного руху електрошпинделя типу CS-20-135 (рис. 5.9).

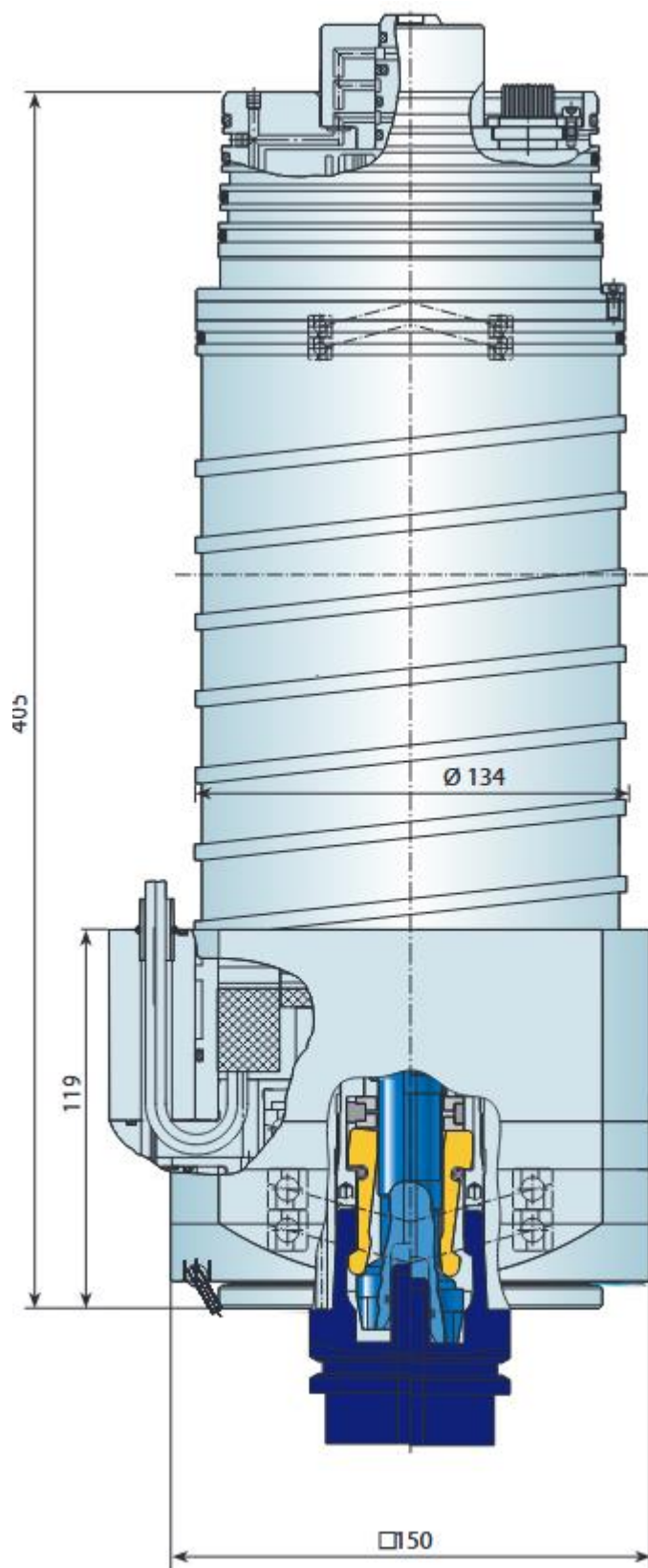


Рис. 5.9. Високошвидкісний електрошпиндель CS-20-135.

Було здійснено комп'ютерне моделювання розподілу магнітної індукції (рис. 5.10), струмів в обмотках (рис. 5.11), векторного магнітного потенціалу

(рис. 5.12) і ізоліній магнітного поля двигуна.

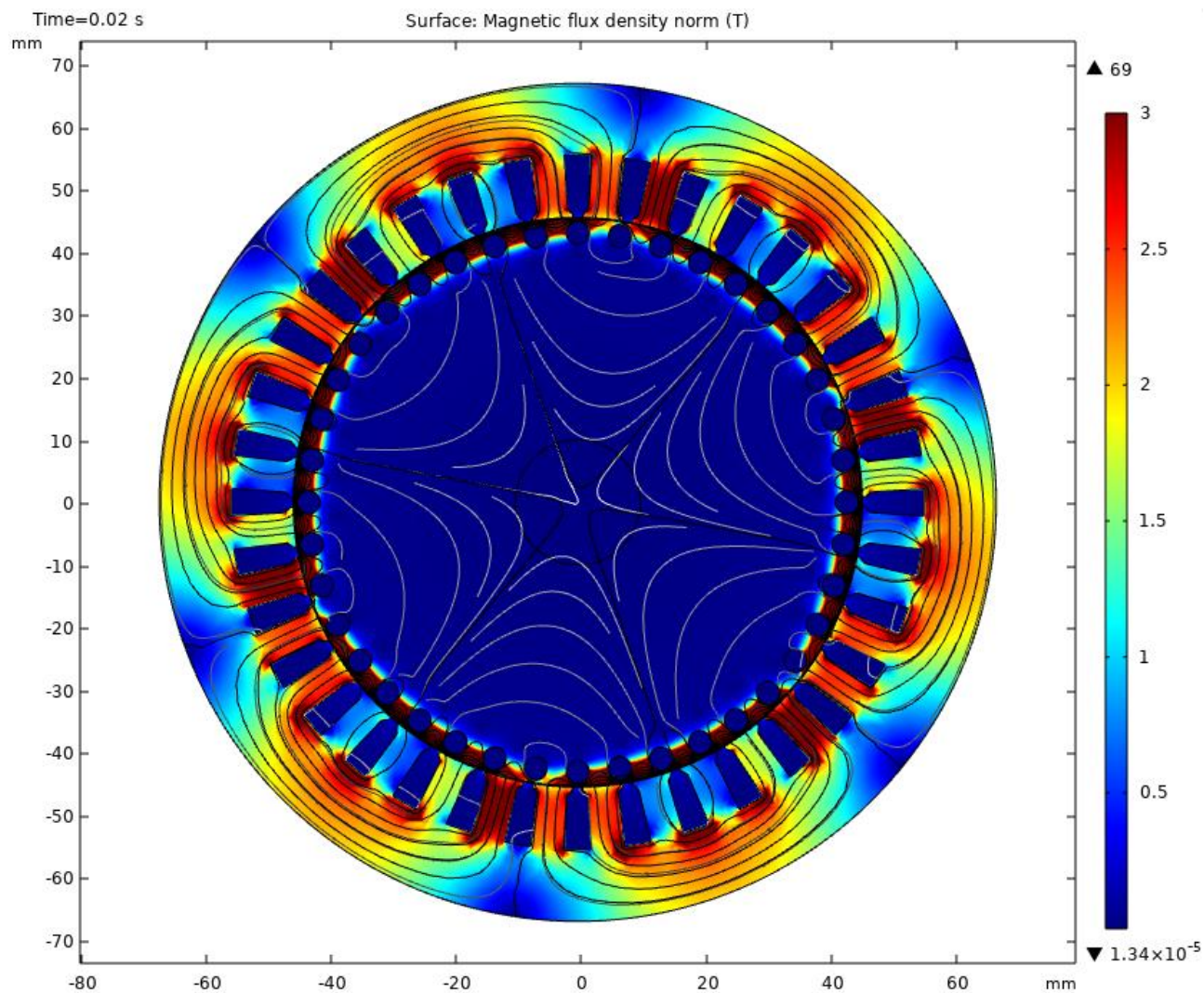


Рис. 5.10. Розподіл індукції і ізоліній магнітного поля двигуна головного руху мотор-шпинделя.

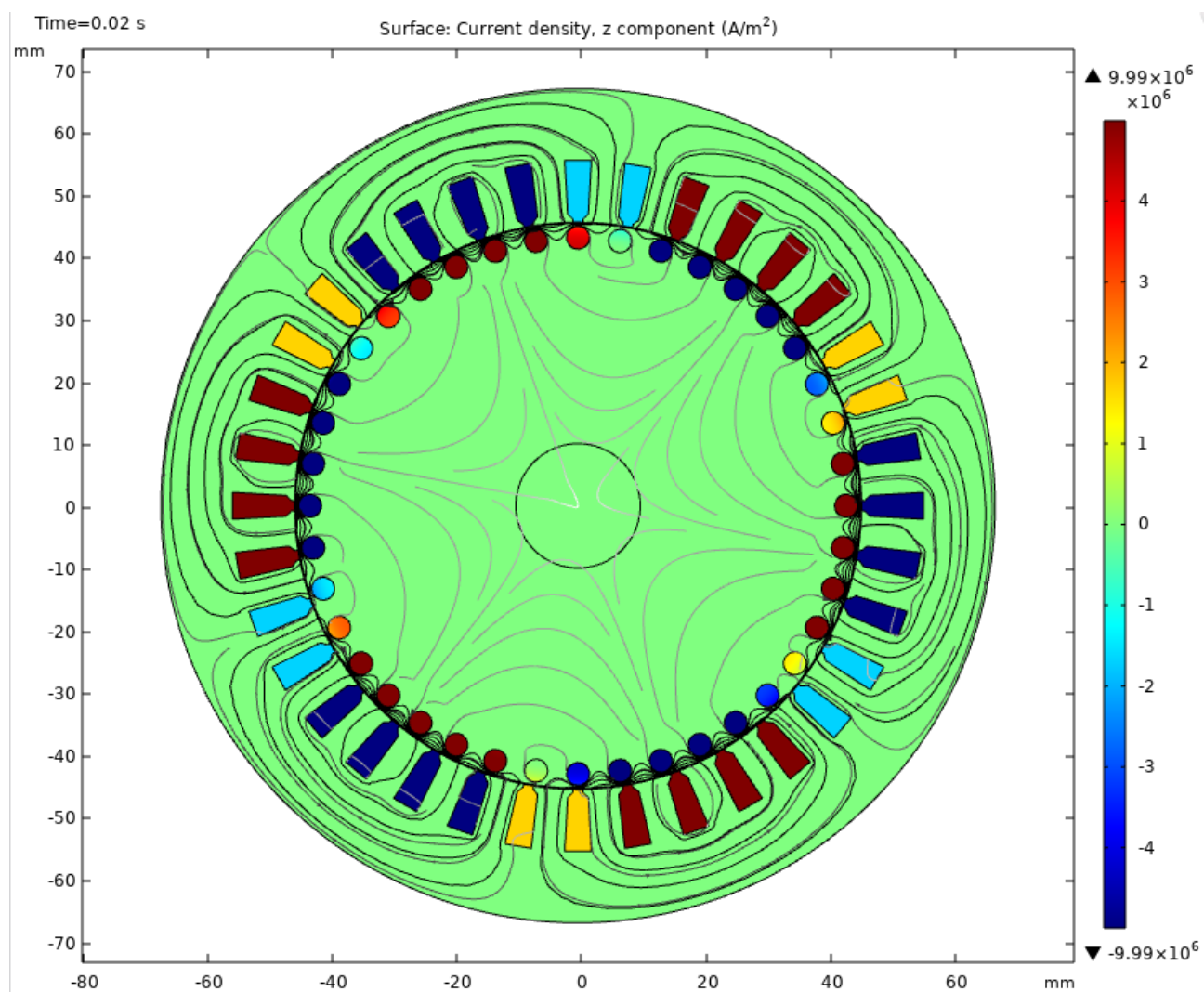


Рис. 5.11. Розподіл струмів в обмотках і ізоляції магнітного поля.

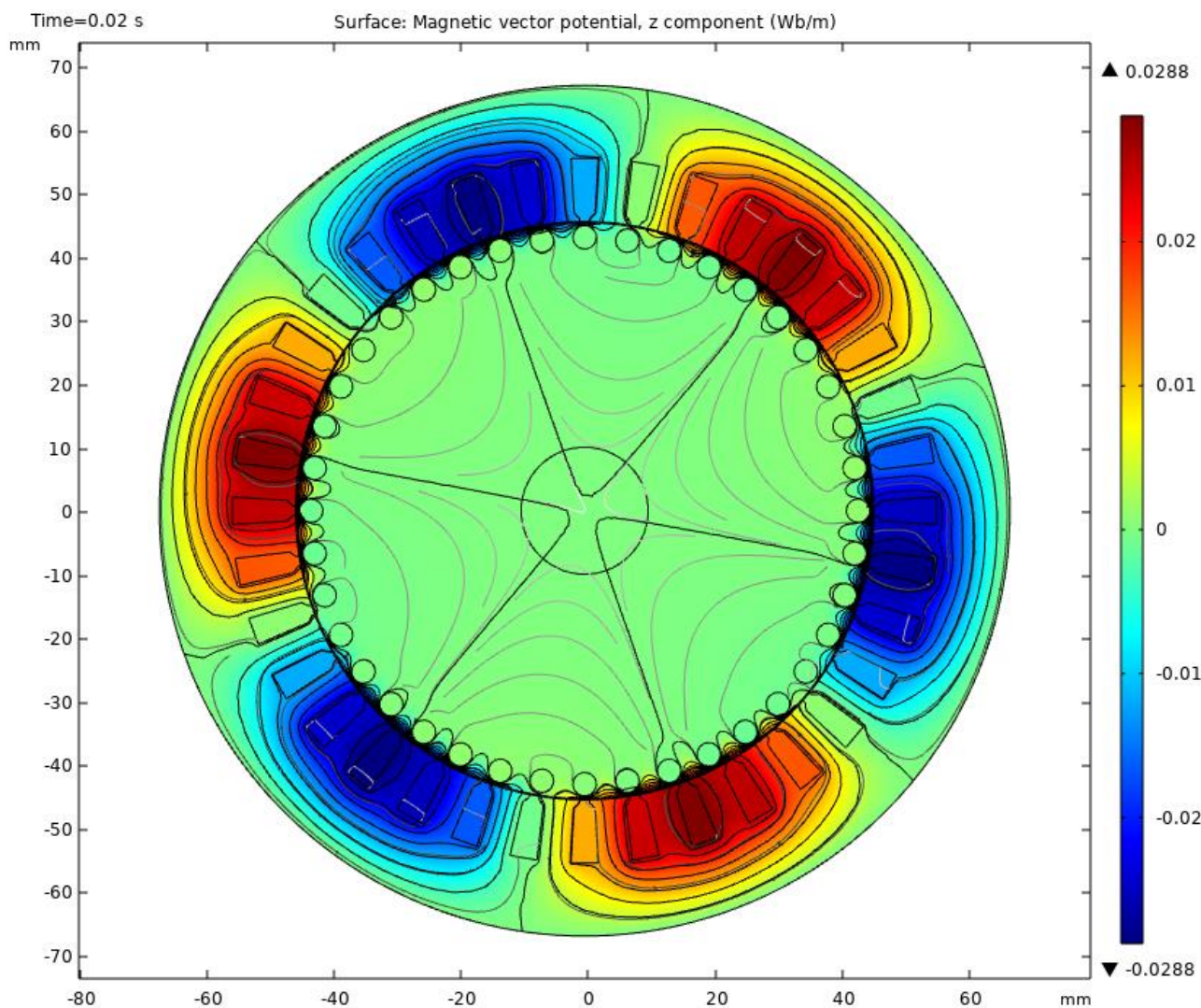


Рис. 5.12. Розподіл векторного магнітного потенціалу.

Результати моделювання підтверджують достовірність розрахункового аналізу.

5.5. Висновки до розділу 5.

1) Здійснено постановку і аналіз еволюційних експериментів, які визначають тенденції і напрями родової і видової еволюції мотор шпинделів і підтверджують достовірність теоретичних положень і принципів генетичного структуроутворення в межах досліджуваного функціонального класу.

2) За результатами експериментів встановлено, що технічна еволюція Мотор-шпинделів реалізується в межах чотирьох родів – CL, KN, TP і PL, з домінуванням домінування структурних представників Роду циліндричних

(92,5% еволюційних подій), у порівнянні з Родом конічних (5,4%), Родом плоских (1,05%) та Родом тороїдальних плоских (1,05%). Вид CL 0.2у є домінуючим. 81% мотор-шпинделів реалізовано з однокоординатним обертальним головним рухом шпинделя, 19% з двокоординатним обертально-поступальним.

3) Виконано електромагнітний розрахунок і комп'ютерне моделювання високошвидкісного трифазного асинхронного двигуна для шліфувального мотор-шпинделя.

6. Стартап - проєкт.

6.1 Опис ідеї проєкту.

Основною ідеєю проєкту є розробка модульного багатокоординатного мотор-шпиндельного агрегата з просторово адаптивною структурою приводних ЕМ-систем, які суміщують функції багатокоординатного поворотного стола і високошвидкісного мотор-шпинделя.

В таблиці 6.1 зведено і проаналізовано зміст ідеї, що пропонується, напрямки та застосування і представлені основні переваги для потенційних клієнтів.

Таблиця 6.1. Опис ідеї стартап-проєкту.

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Пропонується багатокоординатний мотор-шпиндельний агрегат	Металообробка машинобудування, верстатобудування та інші галузі	На основі уніфікованого мотор-шпиндельного агрегату реалізує зміну положення заготовки в багатьох площинах, тим самим дозволяючи обробляти деталі складної форми з надзвичайною якістю поверхні та високою точністю
		Мотор-шпиндель дозволяє реалізовувати як обертальний рух, так і обертально-поступальний, що може бути корисним в залежності від поставленої задачі
		Агрегат забезпечує широкий діапазон технологічних операцій і режимів металообробки: фрезерування, розточування, шліфування та ін.

6.2 Технологічний аудит ідеї проєкту.

В даному підрозділі описаний аудит, за допомогою якого реалізується ідея проєкту (технологія створення товару). А також проаналізовані складові, результати чого наведені в таблиці 6.2:

Таблиця 6.2. Технологічна здійсненність ідеї стартап-проекту.

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Надання повного спектру інженерних послуг	Реалізація включатиме в себе інженерів, які виконуватимуть інтелектуальну працю, випускатимуть і модернізуватимуть продукцію, яка буде патентуватись по мірі створення. Створення сайту, та оренда офісу для роботи персоналу	В наявності	Доступна
Багаторівнева модульна система	Мотор-шпиндельний агрегат складається з окремих електричних машин-модулів.	В наявності	Доступна
Розробка системи керування режимами роботи	Робота програмістів зі створення програмного забезпечення для МША	В наявності	Доступна
3-координатний поворотний стіл для додаткової просторової адаптації	Створення додаткової системи, яка відповідає необхідним розмірам і забезпечує позиціонування	Наявна, але без конкретного виробництва	Вимагає розробки

За результатами аналізу наявності і доступності технологій для ідеї стартап-проекту, бачимо, що проект має всі шанси на реалізацію, але деякі ідеї вимагають додаткової розробки або пристосування під вимоги конкретного МША.

6.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.

Для забезпечення хорошого підґрунтя для реалізації проекту необхідно провести аналіз і охарактеризувати потенційний ринок на якому буде сформований стартап-проект.

Таблиця 6.3. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту.

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	Не визначена
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	Більше 50000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Конкурентність
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ДСТУ, ГОСТ, ISO
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	Оцінка неможлива

Також варто оцінити характеристики потенційних груп клієнтів (табл. 6.4).

Таблиця 6.4. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту.

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти Ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Металообробка заготовок складної форми з високою точністю	Підприємства, які виконують технологічні операції з обробки металу, міжнародний ринок	Модульність агрегатів дозволить легко адаптуватись під конкретні вимоги клієнтів	Потенційні вимоги клієнтів приблизно однакові і полягають в простоті користування, надійності товару, ремонтпридатності, адаптивності і можливості переконфігурації.

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту показала, що цільовою аудиторією є крупні промислові підприємства з обробки металічних деталей.

Таблиця 6.5. Фактори загроз.

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Важкість виходу на міжнародний ринок	Всі потенційні конкуренти розташовані за кордоном, складний вихід	Залучення міжнародних компаній, інвестиції від закордонних партнерів, тісна співпраця з ними
2	Висока вартість	Мотор-шпиндельний агрегат включає в себе багато дороговартісних електричних машин, оскільки кожна з яких повинна забезпечувати дуже високу точність, керованість та надійність	Вартість МША виправдовується дуже високою якістю продукції, можливо, її кількістю, а також автоматизованістю виробництва (менші витрати). Можлива оптимізація окремих модулів.

Аналіз ринкового середовища виявив фактори загроз, які можуть завадити впровадженню проекту.

Таблиця 6.6. Фактори можливостей.

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція
1	Відносно вільний ринок	Аналогів багатокоординатному МША досить небагато	Можливість впливу на ринок
2	Вихід на міжнародний ринок	Унікальність ідеї відкриє можливість експорту закордон	Збільшення клієнтів
3	Багатофункціональність, адаптивність, універсальність	Використання широкого діапазону об'єктів оперування, операції, адаптація під конкретні вимоги	Зниження ціни, а також задоволення потреб клієнтів

Провідні виробники сучасних мотор-шпинделів створюють широкий спектр мотор-шпиндельних агрегатів з просторово адаптивною структурою приводних ЕМ-систем, але, на даний час багатокоординатні МША майже не досліджені, а їх практичне використання обмежується агрегатами двокоординатного руху. Це дає можливість подальшого дослідження, розвитку, патентування та поширення багатокоординатних МША на ринку.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.

В магістерській дисертації узагальнено результати досліджень, спрямованих на вирішення актуального науково-технічного завдання з поширення і практичної апробації методології генетичного синтезу на класи гібридних мотор-шпиндельних агрегатів з розширеними функціональними можливостями. Основні результати досліджень і розробок можна узагальнити наступними положеннями:

1. Вперше здійснено постановку задачі міждисциплінарного синтезу мотор-шпиндельних агрегатів, системну основу якої становить концепція генетичного і енергетичного ядра складної технічної системи, що відкриває можливість поширення моделей і методів генетичної електромеханіки на класи міжсистемних гібридних об'єктів, які суміщують компоненти різної генетичної природи.
2. Вперше розроблено узагальнену генетичну модель синтезу гібридних структур багатокоординатних мотор-шпиндельних агрегатів, за результатами аналізу якої визначено структурні формули популяцій гібридних структур з реалізацією дво-, три- і чотирикоординатного просторового руху робочого інструменту МША.
3. За результатами синтезу створено генетичний каталог синтезованих структур, а також розроблено конкурентоспроможні технічні рішення багатокоординатних МША модульного виконання, які забезпечують функціонування мотор-шпинделя в багатокоординатному технологічному просторі з можливістю просторової адаптації власної модульної структури.
4. Результати досліджень передано Замовнику - Словацькому технічному університету у Братиславі, а також впроваджено в навчально-методичну роботу кафедри електромеханіки (ФЕА) і кафедри конструювання машин (ММІ).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.

1. Angelo Cabrera, “Everything You Need To Know About CNC Spindle Motors”, 14 September 2022
<https://industrialautomationco.com/blogs/news/everything-you-need-to-know-about-cnc-spindle-motors>
2. К. О. Олійник, “СИНТЕЗ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ НА БАЗІ МОТОР-ШПИНДЕЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СИСТЕМНО-МОРФОЛОГІЧНОГО ПІДХОДУ”, Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського, Випуск 4/2020 (123)
http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2020_5_2020-5-6-133.pdf
3. “One Spindle Housing, Two Dedicated Spindle Motors”, 2/24/2015
<https://www.mmsonline.com/articles/one-spindle-housing-two-dedicated-spindle-motors>
4. “Spindle Knowledge Motor spindle”,
<https://www.spindeldoctor.com/en/spindleknowledge/motor-spindle/>
5. Семенов А.С., Никулин Ю.В., “Исследование перспективных электродвигателей станков с ЧПУ”, Издатель ФГБОУ ВПО “МГТУ им. Н.Э. Баумана”. Эл № ФС 77 - 48211. ISSN 1994-0408, <http://engineering-science.ru/doc/129589.html>
6. “Сервопривод или шаговый двигатель?” <https://tehprivod.su/poleznaya-informatsiya/servoprivod-ili-shagovyy-dvigatel.html>
7. Шинкаренко В.Ф. Основи теорії еволюції електромеханічних систем / В.Ф. Шинкаренко. – К.: Наукова думка, 2002. – 288с.
8. Урманцев Ю.А. “Эволюционика или общая теория развития систем природы, общества и мышления.” - М.: К-. дом « ЛИБРОКОМ», 2009. – 240 с.
9. Словник із структурної і генетичної електромеханіки / В. Ф. Шинкаренко, А.А. Шиманська. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 112 с.
10. Шинкаренко В.Ф., Котлярова В.В., Красовський П.О., Місан Н.А. “Принципи структуроутворення просторово адаптивних електромеханічних систем зі змінною структурою і геометрією активної зони” // Вісник

Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 62-70.

11. Шинкаренко В.Ф., Красовський П.О. “Рівні просторово-функціональної адаптації електромеханічних систем.” Збірка тез XIV Міжнародної науково-технічної конференції «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси «ІРТК-2021», 19 – 20 травня, НАУ (м. Київ). – С. 164 – 167.

12. Шинкаренко В.Ф. Лабораторія синтезу знань кафедри електромеханіки. <https://em.fea.kpi.ua/index.php/nauka/laboratoriia-syntezu-znan>

13. Моделювання електромеханічних систем. Підручник / В.Ф. Шинкаренко, А.А. Шиманська, В.В. Котлярова. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. - 258 с. Рекомендовано Вченою радою НТУУ «КПІ» (протокол № 10, від 04.11.19). – 258 с

14. Шинкаренко В.Ф., Гайдаєнко Ю.В. Генетические принципы структурообразования гибридных электромеханических систем. - Вісник КДУ імені Михайла Остроградського. Випуск 3/2010 (62). Частина 2. – С. 47 – 50.

15. Shynkarenko V., Gaidaienko Iu., Ahmad N. Al-Husban. Genetic Programs of structural Evolution of Hybrid Electromechanical Objects // International journal of Engineering & Technology. Vol 2, No 1 (2013). - P. 44-49.

16. Shynkarenko V., Kuznietsov Y., Gaidaienko J., Oliynyk K. The Operability Analysis of Spindle-Motors Hybrid Electromechanical Systems. 13 th Anniversary International scientific Conference «Unitech’13», 22 – 23 November 2013. Gabrovo, Bulgaria. Vol. III, 2013. – P. 268 – 272.

17. Shynkarenko V., Gaidaienko Iu., Ahmad N. Al-Husban. Decoding and functional Analysis of genetic Programs of Hubrid Electromechanical Structures // Modern Applied Science. Vol 8, No 2 (2014). - P. 36 – 48.

18. Shynkarenko V., Kuznetsov Y. Interdisciplinary Approach to Modeling and Synthesis of difficult Technical Systems // Journal of the Technical University of Gabrovo, Vol. 52, 2016. - P. 24-28.

19. Шинкаренко В.Ф., Шиманская А.А., Гайдаєнко Ю.В. Инновационный синтез электромашинных агрегатов двойного вращения на основе их

- генетических программ // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Харків: НТУ «ХПІ», № 11, 2016. – С. 93-101.
20. V. Shynkarenko, A. Makki, V. Kotliarova and A. Shymanska, "Modular Principle in the Structural organization and Evolution of Electromechanical Objects," 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2019, pp. 162-165. doi: 10.1109/MEES.2019.8896446
21. V. Shynkarenko, A. Makki, A. Shymanska and V. Kotliarova, "Genetic Synthesis of Electromechanical Objects of the Modular Type," 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2019, pp. 166-169. doi: 10.1109/MEES.2019.8896596
22. 187. V. Shynkarenko, A. Makki, V. Kotliarova, A. Shymanska, P. Krasovskyi, "Genetic Organization and Evolution of Electromechanical Objects with Adaptive Geometry of Active Zone," Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J. (USA), 5(5), 512-525, 2020. doi:10.25046/aj050564
23. Давиденко В.В., Мирошниченко В.В., Шинкаренко В.Ф. Форми подання закону гібридизації електромеханічних структур // [Електронний ресурс]: Статті та тези доповідей за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. – Київ: ФЕА КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – С. 202-206. – Режим доступу:
24. Vasyl Shynkarenko, Yuriy Kuznetzov, Lubomir Soos, Anna Shymanska, Viktoriia Kotliarova and Pavlo Krasovskyi. The Principle of Hybridization in the Structural Organization and Evolution of Electromechanics Objects. Journal of MECHANICAL ENGINEERING, Vol 72 (2022), No 2, 173 – 188.
25. Шинкаренко В.Ф., Котлярова В.В., Монахов Є.А., Красовський П.О. Структурні мутації в адаптивній еволюції електромеханічних перетворювачів енергії // Технічні науки та технології, № 2 (28), 2022. – С. 111- 126.

26. Yurii Kuznietsov, Ľubomír Šooš, Vasyl Shynkarenko, Oleksandr Shevchenko, Oksana Yurchyshyn, Anna Shymanska, Viktoriia Kotliarova. Current Status and Development Prospects of Motor-Spindles for Machine Tools // Journal of the Technical University of Gabrovo, Vol. 65, 2022. – P.p. 28-31.
27. https://www.spindelhersteller.com/ru/produkte/shpindeli_tokarnogo_stanka.php
28. <https://dmliefer.ru/content/weiss>
29. https://www.preciserotation.ru/index/shpindeli_diebold_motor_shpindeli_diebold/0-58 Высокотехнологичные шпиндели Diebold
30. <https://mall.industry.siemens.com/mall/ru/ru/Catalog/Products/10030549>
31. <https://kodtnved.ru/podbor/motorshpindeli.html> Поиск кода ТН ВЭД по базе ТС 2022
32. https://machine-service.ru/spindle_shpindel_taiwan_royal_motorized_spindles Мотор-шпиндели Royal
33. <https://ctbservo.com/wp-content/uploads/2020/05/202001161202225.pdf> Мотор-шпиндели серии ES CTB Co.,Ltd
34. <https://www.hedelius.de/ru/tehnologii/motor-shpindeli-s-zhidkostnym-ohlazhdeniem/motor-shpindeli-s-zhidkostnym-ohlazhdeniem.html> HEDELIUS
35. <https://www.mtmarchetti.com/ru/prodotti/x11-elettromandrino-motorizzato.html> M.T. S.r.l

ДОДАТКИ.

Додаток А

Перелік опублікованих статей і підготовлених доповідей за темою магістерської дисертації

1. Давиденко В.В., **Мирошніченко В.В.**, Шинкаренко В.Ф. Форми подання закону гібридизації електромеханічних структур // [Електронний ресурс]: Статті та тези доповідей за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. – Київ: ФЕА КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – С. 202-206. – Режим доступу: <http://jour.fea.kpi.ua/article/view/254896>

2. Давиденко В.В., **Мирошніченко В.В.** Дистанційна доповідь на науковому семінарі кафедри електромеханіки, на тему: «Топологічні і геометричні моногібриди в структурній організації і еволюції електричних машин» (Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 24.02.2022 р.).

3. Давиденко В.В., **Мирошніченко В.В.** Дистанційна доповідь на міжвузівській конференції призерів II етапу Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт, на тему: «Топологічні і геометричні моногібриди в структурній організації і еволюції електричних машин» (Кременчук, КНУ ім. Михайла Остроградського, квітень, 2022 р.).

„ЗАТВЕРДЖУЮ”
заст. декана з наукової роботи
факультету електроенерготехніки та автоматики
КПІ імені Ігоря Сікорського
Вадим ЧУМАК
„28 ” грудня 2021 р.

А К Т
впровадження результатів дослідницької роботи
«Топологічні і геометричні гібриди в структурній організації і технічній
еволюції електричних машин»
в навчально-методичну роботу кафедри електромеханіки.

Комісія у складі: заступника завідувача кафедри електромеханіки з навчально-методичної роботи доцента А.А. Шиманської, професора кафедри електромеханіки В.Ф. Шинкаренка і вченого секретаря кафедри електромеханіки доц. С.С. Цивінського, на підставі розгляду представлених матеріалів встановила наступне.

Представлені на конкурс результати досліджень студентів 4 курсу Давиденка Вадима Володимировича і Мирошніченка Владислава Валерійовича, виконаних за тематикою їх бакалаврської роботи, відповідають наряду наукових досліджень кафедри електромеханіки. Основні результати виконаного етапу досліджень впроваджено в навчально-методичну роботу кафедри електромеханіки, зокрема:

- в лекційних заняттях з дисципліни „Основи інноваційного синтезу електромеханічних систем» («Принципи і моделі структуроутворення гібридних електромеханічних об'єктів»;
- при викладанні курсу „Основи теорії структур електромеханічних систем» (при проведенні лекційних та практичних занять на тему: «Визначення і розшифрування генетичних програм гібридних електромелектромеханічних систем»;
- в тематиці курсових робіт інноваційного спрямування з дисципліни «Спеціальні електричні машини».

Заст. завідувача кафедри
з навчально-методичної роботи, доцент
Професор
Вчений секретар, доцент

Анна Шиманська
Василь Шинкаренко
Сегій Цивінський