

## РОЗДІЛ 4. СТРУКТУРНО-СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЦІ

### ЕЛЕКТРОДВИГУНИ З ПРОСТОРОВО АДАПТИВНОЮ АКТИВНОЮ ЗОНОЮ В ТЕХНІЧНІЙ ЕВОЛЮЦІЇ МОТОР-ШПИНДЕЛІВ

**Шинкаренко В.Ф., професор, Красовський П.О., аспірант**

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електромеханіки*

В генетично організованих системах структурна різноманітність об'єктів регламентується генетичними програмами структуроутворення, а різноманітність способів їх технічної реалізації визначається і реалізується дослідником. Результатами попередніх досліджень було встановлено, що структури електромеханічних об'єктів (ЕМ-об'єктів), функціонування яких супроводжується зміною структури активної зони, на хромосомному рівні моделюються операторами структурних мутацій, які, в свою чергу, описуються групою топологічних перетворень [1, 2]. Поняттю структурних мутацій ставляться у відповідність локальні порушення структури, оптимальних геометричних співвідношень або пропорцій, шляхом відносної орієнтації, просторового положення або взаємного перекриття активних частин приводного електродвигуна. Зазначені порушення свідомо створюються і використовуються в адаптивному конструюванні мотор-шпинделів (М-Ш) для досягнення відповідного емерджентного ефекту. Тому метою даного дослідження є експериментальна перевірка достовірності теоретично визначених принципів і моделей генетичного структуроутворення просторово адаптивних електромеханічних структур (ЕМ-структур) на прикладі функціонального класу М-Ш для металообробних верстатів.

Сучасні М-Ш відносяться до класу міжсистемних гібридних систем, структури яких суміщують підсистеми різної генетичної природи. За висновками експертів М-Ш розглядаються як один з ключових об'єктів на шляху переходу до розумного виробництва, де інтелектуальні машини, системи та мережі здатні самостійно обмінюватися інформацією та реагувати на неї, керувати процесами промислового виробництва [3]. Тому задача геомно-еволюційного аналізу конкретизується ідентифікацією і аналізом структурних мутацій в технічній еволюції електромеханічних систем (ЕМ-систем) М-Ш.

Основою для постановки еволюційного аналізу М-Ш слугував розроблений авторами генетичний банк даних (ГБД), який відтворює технічну еволюцію електрошпинделів ( $T_E \approx 70$  років), з потужністю вибірки 100 еволюційних подій. ГБД – інтелектуально-інформаційна система, яка містить систематизовані результати інформаційного, генетичного, таксономічного та еволюційного аналізу об'єкта дослідження.

Результати генетичного і еволюційного аналізу об'єктів ГБД підтверджують генетичні принципи структуроутворення функціонального класу М-Ш, які характеризуються наявністю всіх генетичних операторів структуроутворення (рис. 1).

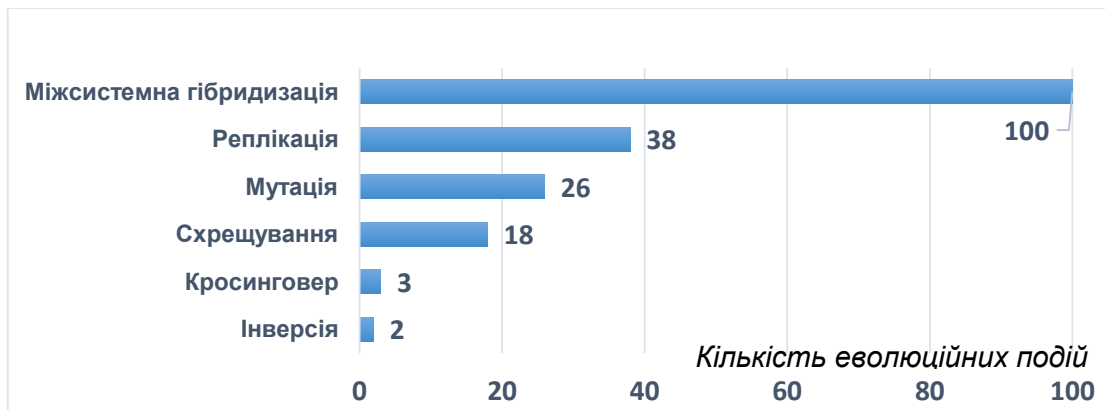


Рисунок 1 – Частота використання генетичних операторів і їх комбінацій в структуроутворенні М-III

Принципи структурної мутації визначають структурну організацію і функціонування двоприводних М-III, в яких для забезпечення зворотно-поступального руху шпинделя використовується допоміжна пневматична система, яка через кінематичну ланку «шпиндель-пневмопоршень – гвинт – гайка» механічно зв'язана з ротором двигуна обертального руху [4]. Під дією стисненого газу на поршень, рухома система здійснює зворотно-поступальний рух в опорах ковзання за осью координатою  $OX$  відносно нерухомого статора, тому активна довжина ротора двигуна виконується більшою, ніж активна довжина статора, на максимальну величину робочого ходу шпинделя (рис. 2).

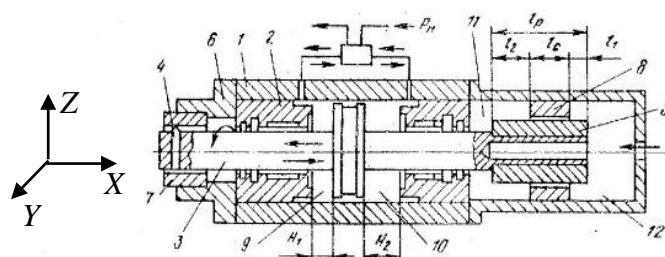


Рисунок 2 – Конструкція М-III, функціонування якого здійснюється зі змінною геометрією активної зони двигуна головного руху (хромосомна мутація  $M_L$ )

В робочих режимах, за умови реалізації двоступеневого руху шпинделя, ротор двигуна буде здійснювати обертально-поступальний (гвинтовий) рух з одночасною зміною свого просторового положення за координатою  $OX$ , відносно активної зони статора. Для забезпечення зворотно-поступального руху шпинделя використовується гібридна структура рухомої частини (ротор – вал – пневмопоршень – шпиндель) шпиндельного вузла, яка може функціонувати лише за умови порушення еквівалентності активної довжини статора і ротора ( $L_2 \gg L_1$ ). Зазначена особливість в генетичній формулі враховується оператором мутації  $M_L$  вторинної електромагнітної хромосоми

$$[(CL\ 0.2y)_1 \times (CL\ 0.2y)_2 : M_L] \times M_S \times M_P \times M_G]_{OX}, \quad (1)$$

де:  $(CL\ 0.2y)_1$  – генетичні коди первинної і вторинної електромагнітних хромосом двигуна обертального руху;  $M_L$  – оператор мутації;  $M_S$  – шпиндель;  $M_P$  – пневматична підсистема;  $M_G$  – передача «гвинт – гайка».

Порушення відповідності між активною довжиною статора і ротора ( $L_1 < L_2$ ) циліндричного приводного двигуна є ознакою наявності структурної мутації, яка моделюється оператором мутації  $M_L$ .

В процесі експлуатації шпindelних вузлів на опори шпинделя діють як радіальні, так і аксіальні навантаження. Суттєвий вплив мають осьові деформації шпинделя, зумовлені нагрівом опорних вузлів, що негативно впливає на його жорсткість. Це призводить до зниження точності і якості технологічної обробки. Одним з напрямів розв'язання зазначеної проблеми є створення і використання додаткової сили осьового натягу опорного вузла, орієнтованої у протилежному напрямі відносно напрямку дії сили температурної деформації.

Характерною особливістю функціонування таких систем полягає у необхідності забезпечення аксіального зміщення активної поверхні статора відносно ротора в сторону передньої опори. Зазначені порушення магнітної симетрії двигуна компенсуються емерджентним ефектом – забезпеченням динамічної жорсткості шпинделя і підвищенням якості процесу обробки. Одним з способів технічної реалізації є використання електромагнітних сил двигуна для забезпечення осьового натягу опор шпинделя. Наявність аксіальних складових електромагнітних сил є властивістю двигунів з конічною активною поверхнею, які в генетичній систематиці належать до Роду конічних (рис. 3).

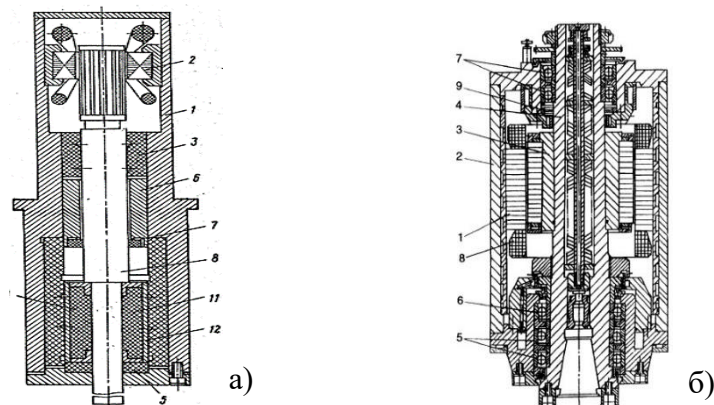


Рисунок 3 – Електрошпindelі з гібридним приводом обертального і поступального руху шпинделя (мутація типу  $M_L$ ): а) з газостатичними опорами [5]; б) з радіально-упорними підшипниками [6].

Принципова родова відмінність конічних двигунів від двигунів Роду циліндричних полягає в тому, що на довільну точку конічної активної поверхні ротора, окрім радіальної складової електромагнітної сили, буде діяти і аксіальна її складова  $F_A$

$$F_A = F_{EM} \cos \alpha, \quad (2)$$

де,  $F_{EM}$  – результуюча електромагнітна сила;  $\alpha$  – просторовий кут конусної активної поверхні ротора. Динамічний режим ротора такого двигуна буде визначатися його обертальним рухом з можливістю здійснення знакозмінних аксіальних переміщень зі зміною просторового положення і величини повітряного зазору відносно нерухомого статора.

Як приклад, на рис. 4, а показана конструкція М-Ш з асинхронним конічним приводним двигуном (структурний представник Виду KN 0.2у) на гідростатичних опорах. Для електромагнітної компенсації сили тиску рідини, площина магнітної симетрії ротора зміщена відносно площини магнітної симетрії статора за аксіальним напрямком на величину  $\Delta x$ . В робочих режимах контрольований тиск рідини в гідростатичних опорах врівноважується електромагнітними силами, що забезпечує компенсацію аксіальних теплових деформацій шпинделя.

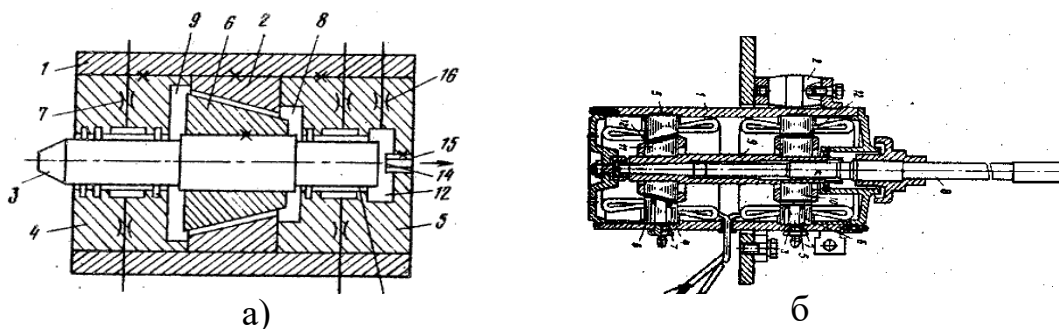


Рисунок 4 – Принцип структурної мутації в конструкціях М-Ш з конічним двигуном головного руху: а) з конічним двофункціональним електродвигуном [7]; б) з гібридним двигуном [8].

В процесі експлуатації шпиндельного вузла конічний двигун виконує функції головного приводу обертального руху шпинделя. За рахунок осьового зміщення та наявності аксіальної складової електромагнітної сили, забезпечується компенсація теплових деформацій шпинделя і врівноважується тиск рідини в гідростатичних опорах. Генетична формула шпиндельного вузла

$$[(KN\ 0.2y):M_{OX}:M_{\delta} \times M_S \times M_N]_{OX}, \quad (3)$$

де: KN 0.2у – генетичний код Виду конічних електричних машин;  $M_N$  – гідравлічна підсистема.

Допустимий діапазон коливання величини повітряного зазору і зміна аксіального положення активної поверхні ротора відносно активної поверхні статора, моделюється генетичними операторами мутації  $M_{OX}$  та  $M_{\delta}$ .

Аналогічно пропонується вирішити проблему жорсткості шпинделя в електромеханічній системі приводу високошвидкісного М-Ш [9]. Генетичний аналіз структури ідентифікує його як структурного представника міжродового ( $CL \leftrightarrow KN$ ) гібридного Виду, приналежного до класу геометричних моногібридів  $G$

$$\{[(CL\ 0.2y):M_{OX} \times (KN\ 0.2y):M_{\delta}] \times M_S \times M_{PM}\}_{OX} \subset G$$

Вертикальний гібридний електропривод головного руху шпинделя представлений двигуном циліндричного типу (верхній) і конічним двигуном (нижній) з гібридною підсистемою газоманітного підвісу  $M_{PM}$  (рис. 4, б). Для отримання необхідної величини аксіальної складової електромагнітної сили

натягу, ротор циліндричного двигуна зміщений відносно статора (мутація  $M_{Ox}$ ), а активна конічна поверхня нижнього двигуна виконує одночасно функцію газомагнітної опори (мутація  $M_{\delta}$ ) для рухомої частини (шпindelь - ротор CL – ротор KN) шпindelьного вузла. Для забезпечення необхідної електродинамічної сили відштовхування (левітації), активна поверхня конічного ротора виконується з високопровідним металевим покриттям, наприклад, з алюмінію.

**Висновок.** Результати аналізу технічної еволюції М-Ш підтверджують теоретичні положення генетичного структуроутворення ЕМ-структур з просторово адаптивною активною зоною. Аналіз структурних мутацій в генетичних формулах М-Ш показує, що ЕМ-системи зі змінною геометрією активної зони широко використовуються в одноприводних і двоприводних конструкціях електрошпindelів з різними типами опор (механічними, газостатичними, гідростатичними, газомагнітними). Емерджентний ефект зазначених нововведень визначається використанням аксіальних складових електромагнітних і електродинамічних сил приводних двигунів.

#### Перелік посилань

1. Шинкаренко В. Ф. Принципи структуроутворення просторово адаптивних електромеханічних систем зі змінною структурою і геометрією активної зони / В. Ф. Шинкаренко, В. В. Котлярова, П. О. Красовський, Н. А. Місан // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 62-70.
2. 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), 2020. P. 512-525.
3. Hongrui Caoa, Xingwu Zhanga, Xuefeng Chenb The concept and progress of intelligent spindles: A review // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, №112, 2017. – p.p. 21-52. [www.elsevier.com/locate/ijmactool](http://www.elsevier.com/locate/ijmactool)
4. Пат. SU 917929. Шпindelьный узел / Шиманович М.А. Заявл. 15.08.1980. Опубл. 07.04.1982. БИ № 13.
5. Пат. SU1811985А. Электрошпindelь на опорах скольжения с газовой смазкой. / Пальцев Ю.В. и др. Заявл. 15.05.1990. Опубл. 30.04.1993.
6. Пат. RU 2230652. Электрошпindelь. / А.П. Кушнир, Е.В. Курнасов. Заявл. 08.10.2002. Публ. 27.05.2004.
7. Пат. SU 917930. Шпindelьный узел / Шиманович М.А. Заявл. 28.08.1980. Опубл. 07.04.1982. БИ № 13.
8. Пат. SU 1070226. Электроверетено / Шнайдер А.Г. Заявл. 02.07.1982. Опубл. 30.01.1984. БИ №4.
9. Шинкаренко В.Ф. Системність принципів гібридизації в структурній організації і еволюції технічних систем. Матеріали XII міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2022), (м. Чернігів, 26–27 травня 2022 р.): – Т.1. – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2022. – С. 19-20.