



**КУЗНЕЦОВ Юрій Миколайович,**  
доктор технічних наук, професор,  
Національний технічний університет України  
«КПІ ім. Ігоря Сікорського»

**ПРИДАЛЬНИЙ Борис Іванович**  
кандидат технічних наук, доцент,  
Луцький національний технічний університет  
ORCID ID: 0000-0001-8565-5986  
Україна

## НОВІ ПОГЛЯДИ І ПІДХОДИ ДО СТВОРЕННЯ ЗАТИСКНИХ МЕХАНІЗМІВ ВЕРСТАТІВ З ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ ПРИВОДОМ

### 1. Актуальність проблеми створення затискних механізмів

Ефективність обробки на металорізальних верстатах залежить від характеристик їх основних вузлів і механізмів, серед яких важливе значення має шпиндельний вузол (ШВ), що містить у своєму складі затискний механізм (ЗМ)<sup>1</sup>. Для отримання необхідної точності й продуктивності формоутворення в технологічній системі будь-якого верстата повинен забезпечуватися координатний зв'язок елементів верстата і заготовки, а також зберігатися їх початкове (задане) положення при різних збуреннях. Для збереження заданого положення заготовки та різального інструменту в системі координат верстата служать ЗМ. Можливість затиску широкої номенклатури заготовок одним ЗМ з урахуванням зміни режимів різання і збурюючих впливів визначає необхідність застосування приводів затиску (ПрЗ) з відповідними характеристиками й широкими можливостями регулювання та управління. Існує виражена тенденція розвитку електромеханічних систем, що супроводжується розширенням області їх використання в складі вузлів технологічного обладнання. Доцільність їх використання є очевидною і часто пояснюється можливістю отримання заданих характеристик ро-

<sup>1</sup> Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. (2016). Приводи затискних механізмів металообробних верстатів : монографія / Під заг. ред. д.т.н., проф. Ю. М. Кузнецова. Луцьк : Вежа-Друк. 352 с.

боти вузла при відсутності громіздких механічних передач, що спричиняють втрати енергії. Зважаючи на те, що найбільш зручним, ефективним та поширеним способом подачі енергії для живлення технологічного обладнання є використання електричної енергії, можна зробити припущення про доцільність живлення окремих вузлів верстатів, і в тому числі ПрЗ, електричною енергією. Це зменшить кількість перетворювачів енергії та її втрати.

У ряді випадків, використання електричних систем у складі ПрЗ дає можливість спростити та підвищити ефективність передачі та перетворення енергії у ЗМ, і зокрема, підвести вхідне зусилля до електромеханічного ПрЗ (ЕМПрЗ) безконтактно – внаслідок електромагнітної взаємодії<sup>2</sup>. Використання ЕМПрЗ в складі ЗМ також дає змогу суттєво скоротити кількість кінематичних ланцюгів верстата для перетворення та передачі вхідного зусилля до ЕМПрЗ, що забезпечує більш ефективне використання енергії, необхідної для процесу «затиску-розтиску», підвищує надійність верстата та зменшує металоємність.

Використання ЕМПрЗ із засобами електроавтоматики дозволяє ефективно здійснювати дистанційне керування як зі стаціонарного, так і з переносного пульта, що досягається пускорегулювальною та комутаційною апаратурою. При цьому, величина зусилля затиску не залежить від положення затискних елементів, підтримується стабільною при заданій тривалості роботи й характеризується мінімальним розкидом при заданих налаштуваннях ЗМ. Двигун ЕМПрЗ працює в короткочасному проміжку лише під час здійснення затиску та розтиску, що забезпечує високі енергетичні показники. При цьому конструкція ЕМПрЗ повинна включати самогальмівну передачу. В сучасній і технічній літературі висвітлюються лише деякі часткові питання проектування досвіду експлуатації ЗМ з ЕМПрЗ, зокрема частина таких досліджень була проведена в КПІ ім. Ігоря Сікорського<sup>3</sup>.

## 2. Аналіз відомих затискних механізмів з електромеханічним приводом

Структурна схема найбільш простого цангового ЗМ з самогальмуванням та ЕМПрЗ з короткозамкнутим ротором представлена наступним набором структурних елементів (рис. 1): джерело енергії ДЕ –

2 Придальний Б.І. (2017). Електромеханічний привод затиску для токарних автоматів. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць, 40. Краматорськ. С. 225–230.

3 Кузнецов Ю.Н. (2012). Морфологический синтез станков и их механизмов : монография / Ю.Н. Кузнецов, Герра Ж.А. Хамуйела, Т.О. Хамуйела; под ред. Ю.Н. Кузнецова. К.: ООО "ГНОЗИС". 416 с.

завзичай цехову електромережу з напругою  $U$ ; комутаційний пристрій  $K$ , який керує роботою приводного двигуна  $D$ , що складається з статора та ротора (найчастіше обертового руху на валу якого виникає момент  $M_d$ ); приводний самогальмівний механізм  $ПрСМ$ , який також може бути виконаний у вигляді двох окремих структурних елементів (приводного механізму  $ПМ$  та самогальмівної передачі  $СП$ ), що змінює характеристики руху вихідної ланки приводного двигуна  $D$  та фіксує напружений стан  $ЗМ$  після його вимкнення; затискний патрон  $ЗП$ , що безпосередньо здійснює фіксацію об'єкта затиску  $ОЗ$  з радіальним зусиллям  $F_r$ . В  $ЗМ$  такого типу можуть бути реалізовані декілька варіантів<sup>4</sup> управління роботою двигуна  $D$ , з метою автоматичного регулювання параметрів роботи  $ЗМ$ , для яких характерними є використання зворотних зв'язків I, II та III. Система керування  $ЕМПрЗ$  з комутаційним пристроєм  $K$ , повинна забезпечувати крім контролю зусилля затиску  $F_r$  також взаємне блокування з приводом головного руху, подачу та допоміжних переміщень.

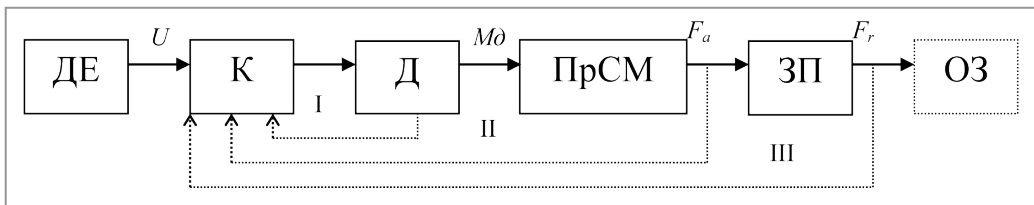


Рис. 1. Структурна схема цангового  $ЗМ$  з самогальмовуванням та  $ЕМПрЗ$

$ЗМ$  (рис. 2) містить  $ЕМПрЗ$ , що складається<sup>5</sup> з двостороннього високомоментного асинхронного електродвигуна 1, який встановлений з допомогою перехідної фланцевої втулки 2 на задній стінці шпиндельної бабки 3 токарного верстата. Корпус 4 та статор 5 нерухомі, що дозволяє підводити електричний струм до електродвигуна без застосування спеціальних струмопровідних пристроїв. Порожнистий вал 6 електродвигуна з'єднується із  $ЗП$  7 з допомогою труби затиску 8, що проходить через шпиндель 9. Кінці труби 8 оснащені шліцевою поверхнею. Даний  $ЕМПрЗ$  працює лише при затиску та розтиску деталі. Затиск деталі відбувається при зупиненому та загальмованому шпинделі. Обертальний рух від електродвигуна 1 через трубу 8 передається до механізованого  $ЗП$  7.

4 Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. (2014). Проектування цільових механізмів маніпулювання верстатів нового покоління / під заг. ред. проф. Ю.М.Кузнецова. Луцьк: Вежа-Друк, 428 с.

5 Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. (2016). Приводи затискних механізмів металообробних верстатів: монографія / Під заг. ред. д.т.н., проф. Ю.М. Кузнецова. Луцьк : Вежа-Друк. 352 с.

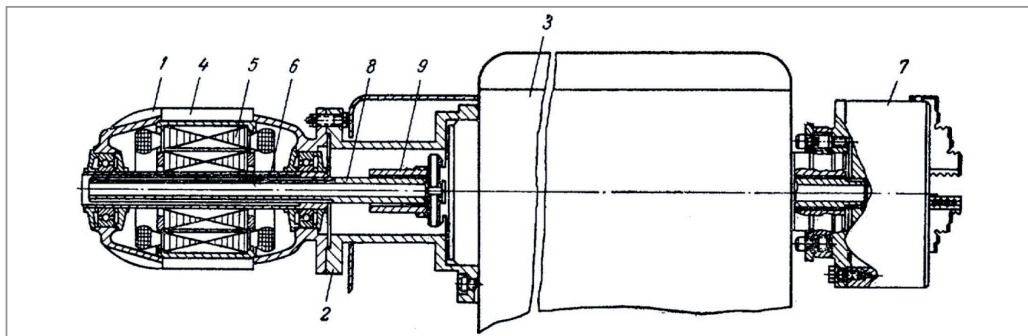


Рис. 2. ЗМ токарного верстата з електродвигуном в ПрЗ за а.с. СРСР №201877

ЗМ (рис. 3) містить ЕМПрЗ, в корпусі 1 якого розташований електродвигун 2, планетарний редуктор з косозубими колесами та центральним колесом 3 зовнішнього зачеплення, що жорстко закріплене на валу 4 електродвигуна 2, сателіти 5, рухоме центральне колесо 6 внутрішнього зачеплення, що з'єднане з ведомим валом 7, нерухомі центральні колеса 8 та 9 внутрішнього зачеплення, що з'єднані між собою (з метою вирівнювання навантаження між ними) з допомогою торсіона 10, фланця 11 та упорного важеля 12. Між валом 4 двигуна та кінцевим вимикачем 13 розташовано регулятор затискного моменту, що складається з гайки 14, пружини 15, штовхача 16, який одним торцем упирається через отвір, що виконано у фланці 11, в зовнішнє кільце підшипника вала 4, а протилежним – в кінцевий вимикач 13. За рахунок пружини 15 вал 4 двигуна 2 своїм конічним торцем підтиснутий до нерухомої конічної поверхні торсіона 10, утворюючи гальмівний пристрій 17. Корпус 18 струмозйомника 19 жорстко зв'язаний з корпусом 1.

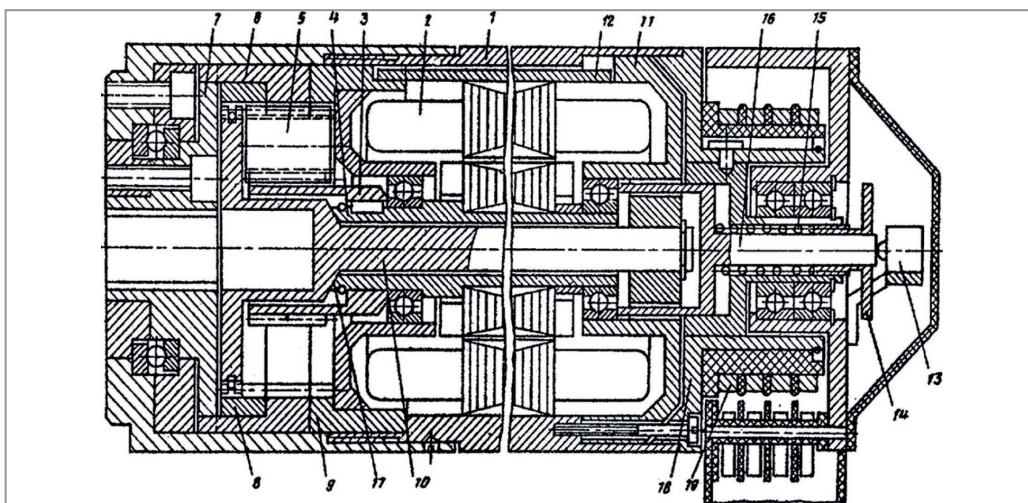


Рис. 3. ЕМПрЗ з планетарним редуктором за а.с. СРСР №837588

Цанговий ЗМ з електромагнітним ПрЗ (рис. 4) для багатошпindelного токарного автомата містить диск, що закріплений на приводній втулці і є якорем електромагніта, котушка якого встановлена на шпindelному барабані, причому між котушкою та диском розташована пружина. На передньому кінці шпинделя 1 рухомо встановлена затискна цанга 2, що з'єднана з трубою затиску 3, на яку надіта приводна втулка 4. На протилежному кінці труби нагвинчено диск 5 з захватами, що контактують з торцем стакана 6, що встановлений на приводній втулці. Між буртами втулки та стакана знаходиться пакет тарілчастих пружин 7, які стиснуті гайкою 8. На втулці контргайками 9 закріплено диск 10, що є якорем електромагніта, кільцева котушка 11 якого охоплює втулку та жорстко скріплена кронштейном 12 зі шпindelним барабаном. В корпусі кільцевої котушки та частково між котушкою та диском розташована повертаюча пружина 13. У момент подачі прутка котушка електромагніта без живлення, і пружина відтискає диск 10. При цьому зв'язані з диском приводна втулка, гайка та диск 5, що з'єднаний з трубою, вивільняють цангу від затиску. При ввімкненні електромагніта диск 10 з приводною втулкою притягується до торця кільцевої котушки, стискаючи пружину і, торцем стакана діючи на диск 5, зтягує через трубу цангу в конус шпинделя. При відключенні електромагніта пружина, під час розтиску переміщає диск 10 з приводною втулкою, і гайка передає зусилля через стакан на захвати диска 5. Переміщення диска 5 та труби вивільнює цангу від затиску.

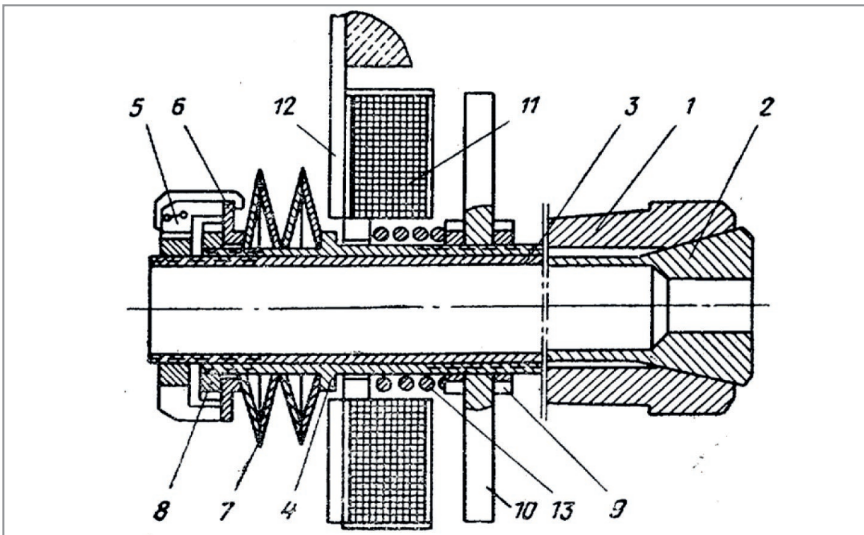


Рис. 4. Цанговий ЗМ з електромагнітним ПрЗ на задньому кінці шпинделя  
за а.с. СРСР №343774

### 3. Системно-морфологічний підхід

При наявності вихідних даних для проектування ЕМПрЗ, а також відомостей про процеси та явища з врахування вимог та головної мети, необхідно чітко сформулювати задачу, тобто обрати цільову функцію, критерії оптимізації та технічні обмеження, умови працездатності та моделі ЕМПрЗ (фізичні, динамічні, математичні). Розв'язок задачі проектування відбувається багатоциклічно шляхом вибору та подальшого аналізу з паралельним порівнянням декількох варіантів та вибором кращого із порівнюваних.

Системно-морфологічний передбачає два якісно різних етапи аналізу та синтезу. При проектуванні ЕМПрЗ, як складної технічної системи (ТС), одним з найбільш важливих етапів є синтез її оптимальної структури<sup>6</sup>, оскільки структура закономірні стійкі зв'язки між її елементами, що визначають просторове і тимчасове їх розташування та характер взаємодії.

Структура ЕМПрЗ може бути описана як сукупність взаємопов'язаних елементів, що забезпечують перетворення та передачу підведеної до ЗМ енергії на вхідну ланку-затискний патрон (ЗП). ЕМПрЗ функціонує в трьох основних станах (затиск, утримання та розтиск), кожен з яких містить декілька етапів. Вид та величина вхідного зусилля, що підводиться до ЕМПрЗ, визначаються його конструкцією і впливає на характер силової взаємодії ШВ із ЗМ та іншими підсистемами верстата. Споживана ЕМПрЗ енергія, що необхідна для затиску, надходить ззовні через передавально-підсилювальний механізм (ППМ), тому вхідні характеристики ЕМПрЗ, повинні бути оптимізовані через параметри (табл. 1), що обумовлюють його взаємодію зі спряженими (зовнішніми та внутрішніми) вузлами верстатної системи.

Структурно-схемний синтез ЕМПрЗ може здійснюватися варіюванням структурами та схемами з метою пошуку найкращого рішення на відносно великій множині відомих та невідомих в інженерній практиці варіантів. З інженерної точки зору різні структури досліджуваного ЕМПрЗ відрізняються один від одного числом елементів, самими елементами, характером зв'язків між елементами і т. д. З математичної точки зору, якщо при постановці задачі схемної та параметричної оптимізації (за одним і тим же критерієм якості) для двох варіантів ЕМПрЗ неможливо задати однакові цільові функції та функції обмежень, то ці варіанти мають різну структуру, тобто для різних структур існують різні за постановкою задачі схемної та параметричної оптимізації.

6 Пальчевський Б.О. (2011). Стратегія оптимізаційного синтезу технологічних машин. Науковий журнал «Технологічні комплекси», 3. Луцьк. С.3-11.

Для складних систем ЕМПРЗ постановки та розв'язання задачі структурної оптимізації зустрічається з двома ускладненнями: утворюється занадто велика кількість змінних; структурні змінні на різних рівнях мають занадто нерівномірний вплив на критерій якості, що призводить до великого числа малоефективних кроків пошуку, тому складну багаторівневу задачу доцільно розділити на прості дворівневі розгляди зверху до низу.

Таблиця 1

### Задачі структурно-схемного синтезу виконавчої частини ПрЗ

| Замикання          |                                  |                    | Основні критерії оптимальності |                                                               |                                                    | Основні обмеження                                  |           |
|--------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------|
| Вид                | Виконання                        |                    |                                |                                                               |                                                    |                                                    |           |
| силове             | механічне                        |                    | К.К.Д.                         | витрата                                                       | енергії                                            | швидкодія                                          |           |
|                    | електромагнітне                  |                    |                                |                                                               | рідини                                             |                                                    |           |
|                    | електростатичне і ін.            |                    |                                |                                                               | повітря (тепла)                                    |                                                    |           |
|                    | гідравлічне                      |                    |                                | передавальне відношення, коефіцієнт підсилення                |                                                    |                                                    |           |
|                    | пневматичне                      |                    |                                |                                                               |                                                    |                                                    |           |
| геометричне        | ІПМ                              | кулачковий         | К.К.Д.                         | передавальне відношення, коефіцієнт підсилення                | швидкодія                                          |                                                    |           |
|                    |                                  | кулаково-важільний |                                |                                                               |                                                    |                                                    |           |
|                    |                                  | кулаково-роликовий |                                |                                                               |                                                    |                                                    |           |
|                    |                                  | комбінований       |                                |                                                               |                                                    |                                                    |           |
|                    |                                  | інші               |                                |                                                               |                                                    |                                                    |           |
| самоза-гальмування | кінематичними ланцюгами          |                    | К.К.Д.                         | втрата енергії, передавальне відношення                       |                                                    | швидкодія                                          |           |
|                    | заклинюючими елементами          |                    |                                |                                                               |                                                    |                                                    |           |
|                    | комбіноване                      |                    |                                |                                                               |                                                    |                                                    |           |
| силове             | багатоступеневе                  |                    | К.К.Д.                         | витрата енергії, стабільність сили затиску                    |                                                    |                                                    | швидкодія |
|                    | з автопідналадкою                |                    |                                | стабільність сили затиску, чутливість та точність спрацювання |                                                    |                                                    |           |
|                    | з авторегулюванням               |                    |                                |                                                               |                                                    |                                                    |           |
| геометричне        | багатоступеневе                  |                    |                                |                                                               | витрата енергії, чутливість і точність спрацювання |                                                    |           |
|                    | з самопідналадкою                |                    |                                |                                                               |                                                    |                                                    |           |
|                    | з автопідналадкою                |                    |                                |                                                               |                                                    |                                                    |           |
|                    | з авторегулюванням               |                    |                                |                                                               |                                                    |                                                    |           |
| самоза-гальмування | з рухомим гальмом                |                    |                                | К.К.Д.                                                        |                                                    | витрата енергії, чутливість і точність спрацювання |           |
|                    | багатоступеневе                  |                    |                                |                                                               |                                                    |                                                    |           |
|                    | з самопідналадкою                |                    |                                |                                                               |                                                    |                                                    |           |
|                    | з механізмами, які перемикаються |                    |                                |                                                               |                                                    |                                                    |           |
| комбіноване        |                                  |                    |                                |                                                               |                                                    |                                                    |           |

Ефективне проектування ЕМПрЗ забезпечує структурно-системний підхід, а для оцінки й отримання конструкторських рішень, спрямованих на покращення характеристик ШВ з ЕМПрЗ, доцільно використовувати підходи, що ґрунтуються на методах морфологічного аналізу та синтезу<sup>7</sup>.

При блочно-ієрархічному підході до проектування кожному з ієрархічних рівнів відповідає свій визначений (певний) тип структури морфологічної матриці визначений ознаками та їх значеннями, що утворюють відповідно стрічки та стовбці морфологічної матриці. Для задач кожного рівня синтезу ШВ з ЕМПрЗ необхідно визначити можливість автоматизованого, автоматичного та неавтоматичного пошуку оптимальних проектних рішень, що ґрунтуються на морфологічних матрицях різної структури. Для комп'ютерної реалізації процесу проектування опис ШВ з ЕМПрЗ як ТС доцільно проводити з виділенням рівнів та відповідних їм головних задач, що пов'язані з вибором або генерацією<sup>8</sup>: 1. Головної корисної функції ТС, що визначається множиною потреб (наприклад виробництва) для задоволення яких проектується ТС; 2. Функціональних структур ТС, які являються собою сукупність її елементів, що визначають будову та алгоритм її функціонування 3. Принципів дії (функціонування), що дозволяють реалізувати сформульовані функції в найбільш повній мірі та є причиною зовнішніх властивостей системи; 4. Структури ТС, що може бути реалізована на визначених принципах функціонування та визначає алгоритм функціонування системи; 5. Оптимальних параметрів ТС, тобто визначенням кількісних технологічних та конструктивних параметрів.

Наразі виявлення нових структур ЕМПрЗ має здебільшого неформальний характер, оскільки елементи даної системи та зв'язки між ними не є повністю уніфікованими для можливості їх опису, наприклад у вигляді кодів, що складають базу даних. Введення нових елементів в структуру ЕМПрЗ пов'язано з невизначеністю щодо їх переваг і недоліків, а також рівнем сумісності з відомими елементами, яка залежить від ступеня схожості отриманої системи з відомим варіантом. Необхідною умовою для створення САПР таких ТС є побудова більш повної систематики предметної області.

7 Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. (2015). Передумови до генетико-морфологічного синтезу електромеханічних приводів затискних механізмів, що обертаються. Вісник НТУУ «КПІ». – Серія «Машинобудування», 3(75). Київ. С. 48–55.

8 Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. (2016). Передумови автоматизації пошукового проектування приводів затискних механізмів. Наукові нотатки, 55. Луцьк. С. 216–221

Представлений варіант морфологічної моделі (табл. 2) отримано внаслідок виділення функціонально важливих елементів з метою не створювати у моделі несуттєву інформацію, яка ускладнює вибір ко-рисної.

Морфологічна модель ПрЗ також представлена у вигляді морфологічних матриць  $M_{PP}^{\Pi}$ , що утворюються шляхом цифрового зазначення відповідних альтернатив вміщених у розділах морфологічної таблиці. Тобто в загальному випадку схему ПрЗ можна представити як:

$$M_{PP} = |M_{DE}| \wedge |M_{KEP}| \wedge |M_{Pr3}| \wedge |M_{3B}|.$$

Повна кількість варіантів схем ПрЗ (сполучень, альтернатив) вміщених в морфологічну матрицю є дуже великою  $N_{\Pi}=4478976$ , що тяжко піддається повному перебору та вимагає багато часу для вибору найкращих рішень.

Якщо обмежити кількість видів виконання конструктивних елементів та виділити найбільш прийнятні то морфологічна матриця в цьому випадку буде дещо спрощеною (усіченою)  $M_{PP}^y$  і загальна кількість можливих варіантів (рішень) схем стане значно меншою  $N_{\Pi}^y=61440$ .

Морфологічні матриці систем приводів затискного механізму:

$$\begin{array}{c} \text{повна} \\ M_{PP}^{\Pi} = \end{array} \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 1.1 & 2.1 & 3.1 & 4.1 \\ \hline 1.2 & 2.2 & 3.2 & 4.2 \\ \hline 1.3 & 2.3 & 3.3 & 4.3 \\ \hline 1.4 & 2.4 & 3.4 & 4.4 \\ \hline 1.5 & & 3.5 & 4.5 \\ \hline 1.6 & & 3.6 & 4.6 \\ \hline \end{array} \wedge \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline 5.1 & 6.1 & 7.1 & 8.1 & 9.1 \\ \hline 5.2 & 6.2 & 7.2 & 8.2 & 9.2 \\ \hline 5.3 & 6.3 & 7.3 & & 9.3 \\ \hline 5.4 & 6.4 & 7.4 & & 9.4 \\ \hline & 6.5 & 7.5 & & 9.5 \\ \hline & 6.6 & 7.6 & & 9.6 \\ \hline & & 7.7 & & \\ \hline & & 7.8 & & \\ \hline & & 7.9 & & \\ \hline \end{array} \wedge \begin{array}{|c|} \hline 10.1 \\ \hline 10.2 \\ \hline \end{array} ; (1)$$

$$\begin{array}{c} \text{усічена} \\ M_{PP}^y = \end{array} \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 1.1 & 2.1 & 3.1 & 4.1 \\ \hline 1.2 & 2.2 & 3.2 & 4.2 \\ \hline 1.3 & & 3.3 & 4.3 \\ \hline 1.4 & & 3.4 & 4.4 \\ \hline \end{array} \wedge \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline 5.1 & 6.1 & 7.1 & 8.1 & 9.1 \\ \hline 5.2 & 6.2 & 7.2 & 8.2 & 9.2 \\ \hline & 6.3 & 7.3 & & \\ \hline & 6.4 & 7.4 & & \\ \hline & 6.5 & 7.5 & & \\ \hline & & 7.6 & & \\ \hline \end{array} \wedge \begin{array}{|c|} \hline 10.1 \\ \hline 10.2 \\ \hline \end{array} . (2)$$

Таблиця 2

## Морфологічна таблиця систем приводів затискного механізму

| Джерело енергії ( $M_{де}$ ) |                       |                          | 4. Вузол керування ( $M_{кер}$ )  | Привод затиску ( $M_{прз}$ )    |                                  |                                      |                  | 10. Зв'язок із затискним патроном ( $M_{зв}$ ) |                          |
|------------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|------------------|------------------------------------------------|--------------------------|
| 1. Робоче середовище         | Перетворювачі енергії |                          |                                   | 5. Структура                    | 6. Замикання                     | 7. Передатно-підсилюючий механізм    | 8. Пружина ланка |                                                | 9. Регулююча ланка       |
|                              | 2. Кількість          | 3. Вид                   |                                   |                                 |                                  |                                      |                  |                                                |                          |
| 1.1.1. Струм                 | 2.1. Один             | 3.1. Електродвигун       | 4.1. Розподільчий вал з кулачками | 5.1. Постійна                   | 6.1. Силове не пружне            | 7.1. Важільний                       | 8.1. Є           | 9.1. Переміщення                               | 10.1. Безпосередньо      |
| 1.1.2. Рідина                | 2.2. Два              | 3.2. Соленоїд            | 4.2. Електро-перемикачі           | 5.2. Змінна без авторегулювання | 6.2. Силове пружне               | 7.2. Клиновий                        | 8.2. Нема        | 9.2. Компенсації відцентрових сил              | 10.2. Через трубу (шток) |
| 1.1.3. Електромагнітне поле  | 2.3. Кілька           | 3.3. Гідронасос          | 4.3. Гідро (пневмо) золотники     | 5.3. Змінна з авторегулюванням  | 6.3. Геометричне з охопленою МЗ  | 7.3. Клиновий важільний              | 9.3. Натягу      | 9.4. Жорсткості пружної системи                |                          |
| 1.1.4. Відцентрові сили      | 2.4. Нема             | 3.4. Компресор           | 4.4. ЧПК                          | 5.4. Комбінована                | 6.4. Геометричне з охоплюючою МЗ | 7.4. Клиновий кулачковий (роликівий) | 9.5. Комбінована | 9.6. Нема                                      |                          |
| 1.1.5. Повітря               |                       | 3.5. Магнітний постійний | 4.5. Комбінація                   |                                 | 6.5. Фрикційне (самогальмування) | 7.5. Клинокулачковий багаторядний    |                  |                                                |                          |
| 1.1.6. Магнітне поле         |                       | 3.6. Нема                | 4.6. Нема                         |                                 | 6.6. Комбіноване                 | 7.6. Гвинтовий                       |                  |                                                |                          |
|                              |                       |                          |                                   |                                 |                                  | 7.7. Зубчастий                       |                  |                                                |                          |
|                              |                       |                          |                                   |                                 |                                  | 7.8. Спеціальний                     |                  |                                                |                          |
|                              |                       |                          |                                   |                                 |                                  | 7.9. Нема                            |                  |                                                |                          |

Серед різних варіантів синтезованих схем ПрЗ шляхом експертної оцінки поетапно обираються ті, що мають покращенні експлуатаційні характеристики морфологічні формули яких фіксуються для подальшої оцінки. Для підвищення ефективності пошуку необхідно обмежити кількість варіантів рішення, що визначаються призначенням ЕМПрЗ верстатів певної групи.

Для оптимального проектування ЕМПрЗ для ШВ верстатів певної групи на різних рівнях необхідно систематично враховувати всі фактори, що впливають на об'єкт і вести цілеспрямований планомірний пошук необхідного технічного рішення з використанням системних підходів, тобто об'єкт і процес проектування розглядають у взаємодії із зовнішнім для проектованої системи середовищем. Сукупність вимог до ЗМ та їх підсистем може бути виражена через кількісні або якісні показники, які формують часткові критерії для відбору кращих рішень (табл.3). Стосовно ЗМ зручно використовувати часткові показники, що формують комплексний показник, шляхом їх приведення до однорідного безрозмірного вигляду<sup>9</sup>, при якому кожен з них в ідеальному випадку прагне до 1 в інтервалі 0 – 1.

На кожному рівні багаторівневого морфологічного синтезу кожна подія вибору кращого варіанта може бути охарактеризована векторною оцінкою  $K$  – множини часткових показників  $K_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ). У міру переходу від першого рівня до другого і далі відбувається конкретизація конструкції та збільшення часткових показників, тобто коли множина показників  $K_I$  першого рівня належить множині показників  $K_{II}$  другого рівня і т.д.

Таблиця 3

### Критерії відбору ЕМПрЗ на різних рівнях проектування

| № п/п | Критерій                                                                | Позначення | Рівні |    |     |    |   |
|-------|-------------------------------------------------------------------------|------------|-------|----|-----|----|---|
|       |                                                                         |            | I     | II | III | IV | V |
| 1     | 2                                                                       | 3          | 4     | 5  | 6   | 7  | 8 |
| 1     | Величина вихідного зусилля                                              |            |       | L  |     | +  | + |
| 2     | Залежність величини вихідного зусилля від частоти обертання             |            |       | L  | ⊥   | +  | + |
| 3     | Залежність величини вихідного зусилля від відхилення діаметра заготовки |            |       |    | ⊥   | +  | + |
| 4     | Характеристики жорсткості ПрЗ                                           |            |       |    | L   | ⊥  | + |
| 5     | Можливість роботи (затиск, розтиск) під час обертання ШВ                |            |       | ⊥  | +   | +  | + |
| 6     | Можливість регулювання величини вихідного зусилля під час обертання ШВ  |            |       | L  | ⊥   | +  | + |
| 7     | Легкість балансування                                                   |            |       |    | L   | L  | + |

<sup>9</sup> Агрегатно-модульне технологічне обладнання: / Крижанівський В.А., Кузнецов Ю.М., Кириченко А.М. та ін. / Під ред. Ю.М. Кузнецова. Навч. посібник для ВНЗ у 3-х част. Кіровоград, 2003. Частина I. Принципи побудови агрегатно-модульного технологічного обладнання. 422 с.

Продовження табл. 3

| 1  | 2                                                                    | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----|----------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|
| 8  | Вплив спрацювання на збереження збалансованості                      |   |   |   |   | L | + |
| 9  | Характери навантаження інших підсистем ШВ (підшипники)               |   |   | L | ⊥ | + | + |
| 10 | Ресурс роботи                                                        |   |   |   |   | L | ⊥ |
| 11 | Надійність роботи                                                    |   |   |   | L | ⊥ | ⊥ |
| 12 | Параметрична надійність                                              |   |   |   |   | ⊥ | ⊥ |
| 13 | Металоємність                                                        |   |   |   | L | + | + |
| 14 | Технологічність виготовлення                                         |   |   |   | L | ⊥ | + |
| 15 | Коефіцієнт корисної дії                                              |   |   |   | ⊥ | + | + |
| 16 | Швидкодія                                                            |   |   |   | L | ⊥ | + |
| 17 | Автоматичне керування вихідним зусиллям                              |   |   | L | ⊥ | + | + |
| 18 | Швидкопереналагоджуваність                                           |   |   |   | L | + | + |
| 19 | Широкодіапазонність                                                  |   |   | L | ⊥ | + | + |
| 20 | Безпека                                                              |   |   |   | L | ⊥ | ⊥ |
| 21 | Безшумність                                                          |   |   |   | L | L | + |
| 22 | Зручність експлуатації та обслуговування                             |   |   | L | ⊥ | + | + |
| 23 | Можливості інтеграції (влаштування) в ШВ традиційної конструкції     |   |   | L | L | ⊥ | + |
| 24 | Можливість роботи в автоматичному циклі обробки                      |   |   | L | ⊥ | + | + |
| 25 | Необхідність підводу енергії під час утримування заготовки (обробка) |   |   | ⊥ | ⊥ | + | + |
| 26 | Керування величиною ходу вихідної ланки                              |   |   | L | ⊥ | + | + |

Позначення критеріїв: | – неформалізований; L – напівформалізований; ⊥ – напіввизначений (напівдетермінований); + – визначений (детермінований); □ – відсутній.

Це можна представити (рис. 5) у вигляді дерева цілей<sup>10</sup> як дерева якісних та кількісних показників для відбору кращих рішень на основі вимог, що пред'являються до конструкції ШВ з ЕМПРЗ та його елементів. При цьому важливо враховувати критерії, що визначають міру їх досконалості та прогресивності орієнтуючись на кращі світові досягнення в даному напрямку.

В загальному випадку для ТС повний набір критеріїв включає чотири групи<sup>11</sup>, що також актуальні для ШВ з ЕМПРЗ: – функціональні, що характеризують найважливіші показники реалізації функцій об'єкта; – технічні, пов'язані з можливістю і простотою виготовлення об'єкта; – економічні, що визначають економічну доцільність реалізації функцій об'єкта; – пов'язані з дією позитивних і негативних факторів на людей, викликаних створенням технічного об'єкта ЗМ.

10 Глушков В.М. (1970) О прогнозировании на основе экспертных оценок. Науковедение – информатика. К.: Наукова думка. С. 201–204.

11 Кузнецов Ю.М., Новосолов Ю.К., Луців І.В. Теорія технічних систем. Під ред. Ю.М. Кузнецова. К.: Севастополь. 2011. 246 с. (укр.), 2012. 246 с. (англ.)

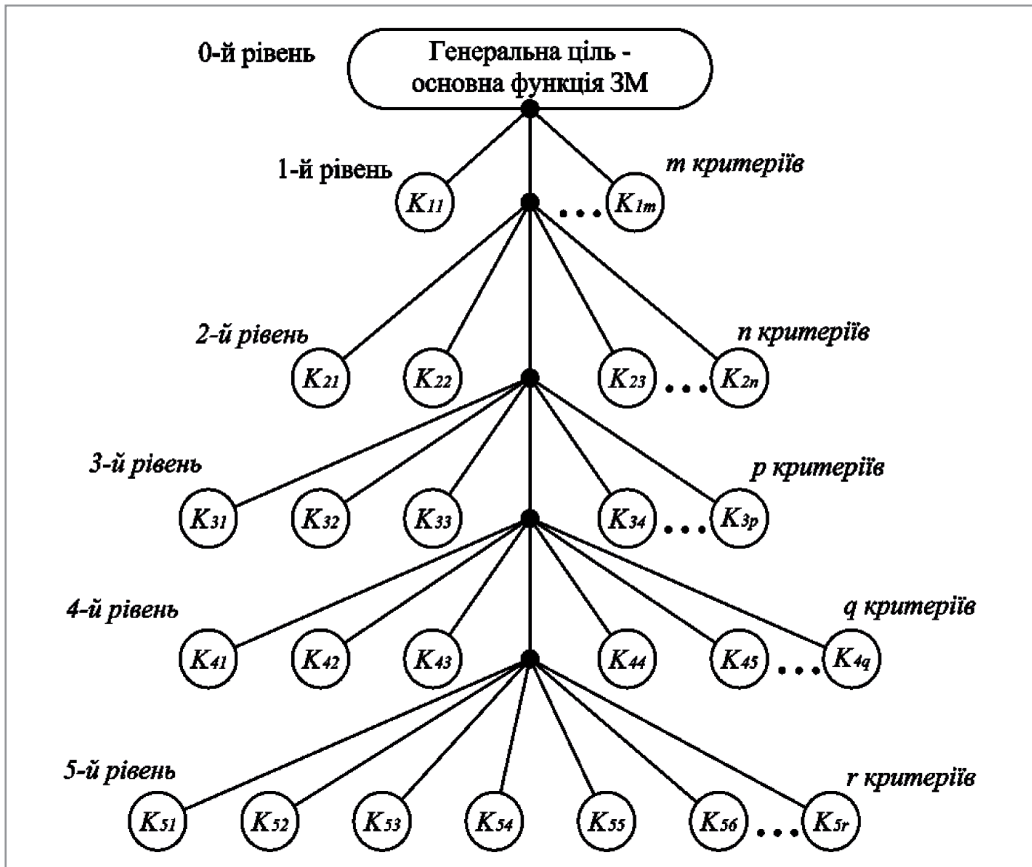


Рис.5. Дерево цілей – часткових критеріїв на різних рівнях морфологічного синтезу системи ПрЗ

Для критеріїв розвитку ШВ з ЕМПРЗ повинні вибиратися тільки такі параметри, які допускають можливість кількісної оцінки. Критерій повинен мати одиницю виміру для порівняння різних варіантів ЗМ. Він може бути представлений безрозмірними питомими величинами, а у випадку якісного порівняння бальною або ваговою оцінкою. При відборі критеріїв повинні виконуватися умови винятковості, постійності, мінімальності та незалежності.

#### 4. Новий погляд на матеріальну точку

Завдяки принципам самоорганізації і генетичному<sup>12</sup> принципу «від простого до складного» запропонований новий погляд на матеріальну точку, як носія генетичної інформації при створенні ТС типу «об'єкт» і «процес». Ця матеріальна точка на генетичному рівні умовна названа механічним геном і несе

12 Shynkarenko V. Genetic Foresight in Science and Technology: from Genetic Code to innovative Project. 10th Anniversary International scientific Conference «Unitech' 10». 19-20 November 2010. Gabrovo, Bulgaria. Vol. II. pp. 297–302.

інформацію про поступальні та обертові рухи, навантаження та їх напрямки. Вона може бути нерухомою (знаряддя праці, спорудження, несучі системи технологічного обладнання), як інформація про статичні ТС типу «об'єкт» і динамічні – типу «процес». Рухому матеріальну точку<sup>13</sup> (рис. 6) з нарощуванням генетичної інформації та ускладненням структури використовують як для перенесення інформації від однієї точки до іншої, так і для їх взаємодії<sup>14</sup>.

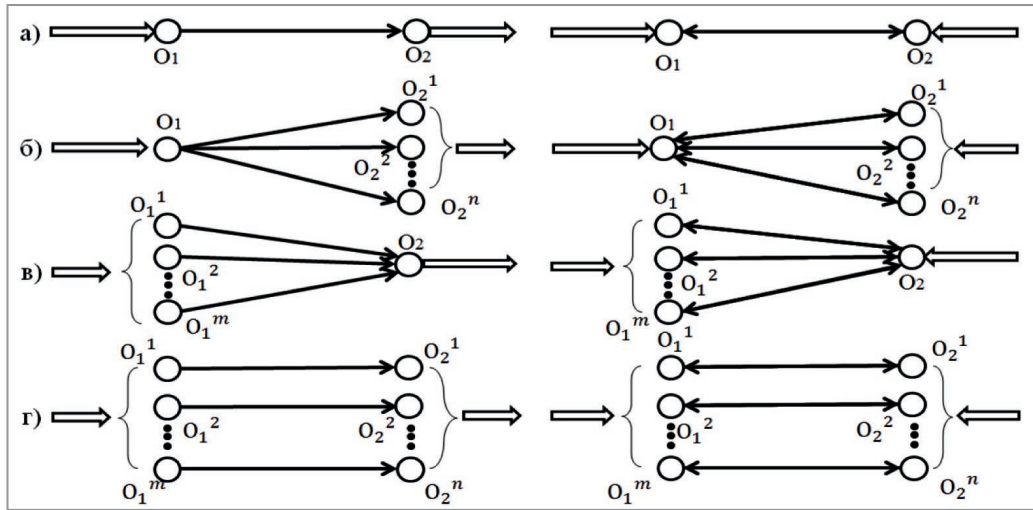


Рис. 6. Варіанти перенесення інформації та взаємодії матеріальних точок згідно з систематикою по Флінну: а – один вхід, один вихід; б – один вхід, кілька виходів; в – кілька входів, один вихід; г – кілька входів, кілька виходів

Новий погляд в механіці на матеріальну точку як носія генетичної інформації<sup>15</sup> дав можливість створити узагальнену класифікацію (породжувальну систему) різних принципів дії при затиску (загальна кількість 72) (табл. 4), виконувати цілеспрямований синтез і передбачити появу невідомих до цього часу ЗМ і ЗП<sup>16</sup> при використанні 5 універсальних генетичних операторів синтезу: реплікації, інверсії, схрещування, кросинговеру, мутації. Нерухому матеріальну точку з нарощуванням генетичної інформації і ускладненням структури використовують при геометричних побудовах статичних ТС (рис. 7).

13 I.F.S. Alrefo, Joaquim A.G. Hamuyela, Kuznetsov Iu.N. (2015) Genetic And Morphological Approach for Description And Synthesis of Gripping Devices of Robots and Manipulators // Journal of the Technical University of Gabrovo, Vol. 49'. pp. 8–10.

14 Хамуйела Ж.А. Герра. (2017). Генетико-морфологический синтез зажимных патронов: монография / Ж.А. Герра Хамуйела, Ю.Н. Кузнецов, Т.О. Хамуйела; под ред. Ю.Н. Кузнецова. Луцк: Вѣжа-Друк. 328 с.

15 Hamuyela J.A. Guerra, Kuznetsov Y.N., Ibrahim Al-Refo Farhan. (2013). Creation of new clamping mechanisms using genetic-morphological method // Journal of mechanical engineering NTUU «Kyiv Polytechnic Institute» №67, 2013, ISSN 2305-9001. pp. 155–162

16 Кузнецов Ю.М. Опис самоналагоджувальних приводів затиску на різних рівнях складності структури і генетичної інформації / Ю.М. Кузнецов, Б.І. Придальний // Міжвузівський збірник "Наукові нотатки". Луцьк : 2015, № 50. С.108–111.

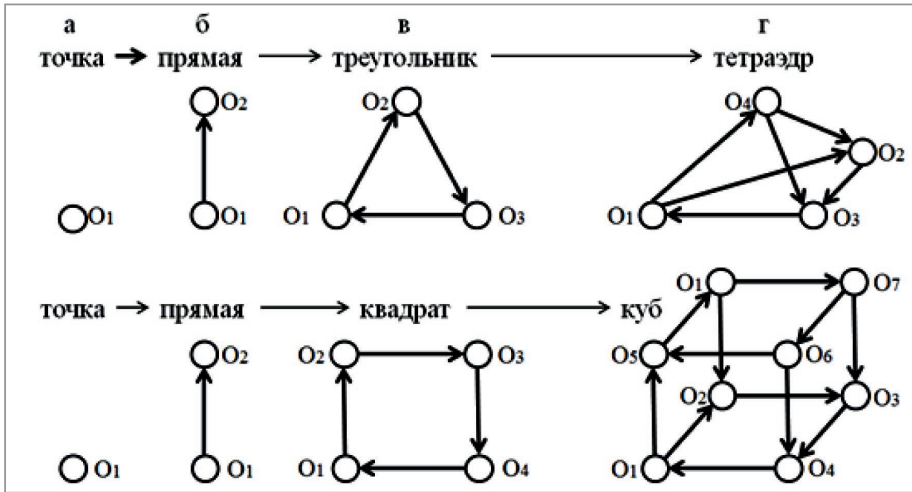


Рис.7. Приклади перенесення матеріальної точки (а) і ускладнення об'єкта з накопиченням генетичної інформації при побудові зображень, фігур і тіл в одновимірному (б), двохвимірному.

Таблиця 4

**Генетична класифікація принципів затиску осесиметричних ЗМ, що обертаються, в циліндричній системі координат**

| Від джерела енергії      |                   | Вид сили (моменту)           | Напрямок | Вихід до об'єкта затиску<br>Вихідна сила $F_2$ |                                           |                               |                                           |                               |                                           |
|--------------------------|-------------------|------------------------------|----------|------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------|
|                          |                   |                              |          | Осьова сила $F_{a_2}$                          |                                           | Радіальна сила $F_{r_2}$      |                                           | Тангенціальна сила $F_{t_2}$  |                                           |
|                          |                   |                              |          |                                                |                                           |                               |                                           |                               |                                           |
| 1                        | 2                 | 3                            | 4        | 5                                              | 6                                         | 7                             | 8                                         | 9                             | 10                                        |
| Вхід від джерела енергії | Вхідна сила $F_1$ | Осьова сила $F_{a_1}$        |          | $F_{a_1}-F_{a_2}$                              | $F_{a_1}-\underline{F_{a_2}}$             | $F_{a_1}-F_{r_2}$             | $F_{a_1}-\underline{F_{r_2}}$             | $F_{a_1}-F_{t_2}$             | $F_{a_1}-\underline{F_{t_2}}$             |
|                          |                   |                              |          | $\underline{F_{a_1}}-F_{a_2}$                  | $\underline{F_{a_1}}-\underline{F_{a_2}}$ | $\underline{F_{a_1}}-F_{r_2}$ | $\underline{F_{a_1}}-\underline{F_{r_2}}$ | $\underline{F_{a_1}}-F_{t_2}$ | $\underline{F_{a_1}}-\underline{F_{t_2}}$ |
|                          |                   | Радіальна сила $F_{r_1}$     |          | $F_{r_1}-F_{a_2}$                              | $F_{r_1}-\underline{F_{a_2}}$             | $F_{r_1}-F_{r_2}$             | $F_{r_1}-\underline{F_{r_2}}$             | $F_{r_1}-F_{t_2}$             | $F_{r_1}-\underline{F_{t_2}}$             |
|                          |                   |                              |          | $\underline{F_{r_1}}-F_{a_2}$                  | $\underline{F_{r_1}}-\underline{F_{a_2}}$ | $\underline{F_{r_1}}-F_{r_2}$ | $\underline{F_{r_1}}-\underline{F_{r_2}}$ | $\underline{F_{r_1}}-F_{t_2}$ | $\underline{F_{r_1}}-\underline{F_{t_2}}$ |
|                          |                   | Тангенціальна сила $F_{t_1}$ |          | $F_{t_1}-F_{a_2}$                              | $F_{t_1}-\underline{F_{a_2}}$             | $F_{t_1}-F_{r_2}$             | $F_{t_1}-\underline{F_{r_2}}$             | $F_{t_1}-F_{t_2}$             | $F_{t_1}-\underline{F_{t_2}}$             |
|                          |                   |                              |          | $\underline{F_{t_1}}-F_{a_2}$                  | $\underline{F_{t_1}}-\underline{F_{a_2}}$ | $\underline{F_{t_1}}-F_{r_2}$ | $\underline{F_{t_1}}-\underline{F_{r_2}}$ | $\underline{F_{t_1}}-F_{t_2}$ | $\underline{F_{t_1}}-\underline{F_{t_2}}$ |

Продовження табл. 4

| 1                        | 2                    | 3                              | 4                                                                                 | 5                       | 6                                   | 7                       | 8                                   | 9                       | 10                                  |
|--------------------------|----------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| Вхід від джерела енергії | Вхідний момент $M_1$ | Навколо осі обертання $Ma_1$   |  | $Ma_1-Fa_2$             | $Ma_1-\underline{Fa_2}$             | $Ma_1-Fr_2$             | $Ma_1-\underline{Fr_2}$             | $Ma_1-Ft_2$             | $Ma_1-\underline{Ft_2}$             |
|                          |                      |                                |  | $\underline{Ma_1}-Fa_2$ | $\underline{Ma_1}-\underline{Fa_2}$ | $\underline{Ma_1}-Fr_2$ | $\underline{Ma_1}-\underline{Fr_2}$ | $\underline{Ma_1}-Ft_2$ | $\underline{Ma_1}-\underline{Ft_2}$ |
|                          |                      | Навколо радіуса $Mr_1$         |  | $Mr_1-Fa_2$             | $Mr_1-\underline{Fa_2}$             | $Mr_1-Fr_2$             | $Mr_1-\underline{Fr_2}$             | $Mr_1-Ft_2$             | $Mr_1-\underline{Ft_2}$             |
|                          |                      |                                |  | $\underline{Mr_1}-Fa_2$ | $\underline{Mr_1}-\underline{Fa_2}$ | $\underline{Mr_1}-Fr_2$ | $\underline{Mr_1}-\underline{Fr_2}$ | $\underline{Mr_1}-Ft_2$ | $\underline{Mr_1}-\underline{Ft_2}$ |
|                          |                      | В площині осі обертання $Mt_1$ |  | $Mt_1-Fa_2$             | $Mt_1-\underline{Fa_2}$             | $Mt_1-Fr_2$             | $Mt_1-\underline{Fr_2}$             | $Mt_1-Ft_2$             | $Mt_1-\underline{Ft_2}$             |
|                          |                      |                                |  | $\underline{Mt_1}-Fa_2$ | $\underline{Mt_1}-\underline{Fa_2}$ | $\underline{Mt_1}-Fr_2$ | $\underline{Mt_1}-\underline{Fr_2}$ | $\underline{Mt_1}-Ft_2$ | $\underline{Mt_1}-\underline{Ft_2}$ |
| Принцип затиску          |                      |                                |                                                                                   | Торцевий                |                                     | Радіальний              |                                     | Тангенціальний          |                                     |

## 5. Комбінаторні алгоритми при передбаченні ЗМ

Одним зі шляхів творчого мислення була спроба структурно-схемного синтезу і передбачення нових ЗМ з використанням морфологічного підходу і комбінаторних алгоритмів<sup>17</sup>, які представляють комбінаторні обчислювання з набору спеціальних методів і прийомів, наприклад, двійкову систему наявності або відсутності елементів в системі ЗМ, що удосконалюється або спрощується (1–є, 0–нема).

Починаючи з перших механізованих осесиметричних ЗМ, які широко використовуються в токарних, свердлильних, фрезерних, шліфувальних і багатоцільових верстатах, присутні наступні елементи системи (рис. 8): джерело енергії (ДЕ), перетворювачі енергії (ПЕ), привод затиску (ПЗ), затискний патрон (ЗП), об'єкт затиску (ОЗ). Останній може бути штучною, прутковою, трубною чи іншою заготовкою для виготовленої деталі, наприклад, у токарних верстатах, або інструментом (свердлом, фрезою, шліфувальним кругом тощо).

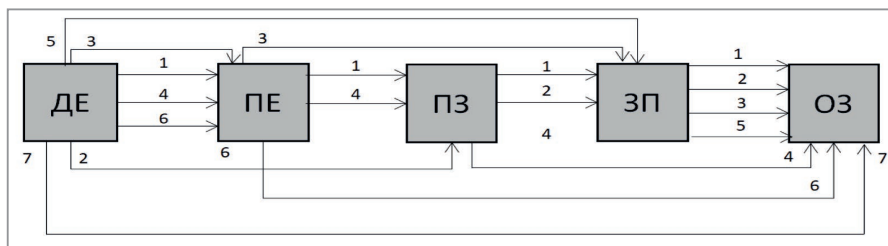


Рис. 8. Елементи системи ЗМ і зв'язки між ними

<sup>17</sup> Kuznetsov Y.N., The description of drive of clamping mechanism of automatic lathes by using genetic-morphological approach / Kuznetsov Y.N., B. I. Prydalnyi, Hamuyela J.A. Guerra // «Machines, technologies, materials international journal» Published by Scientific technical Union of Mechanical Engineering. Sofia, Bulgaria, 2015. №4. pp. 35–39.

В будь-якій системі ЗМ обов'язково повинні бути вхід (джерело енергії-вага 1) і вихід (об'єкт затиску-вага 1). Всі інші елементи в послідовному ланцюгу без врахування системи керування (ПЕ, ПЗ, ЗП) в принципі згідно з комбінаторикою можуть бути і не бути, коли мова йде про спрощення і скорочення ланцюга.

Згідно з теорією еволюційного і генетичного синтезу<sup>18</sup> виникає можливість 100 % прогнозування і спрямованого синтезу нових ЗМ з використанням породжувальних систем з заданою цільовою функцією<sup>19</sup>, що вимагає складних математичних перетворень з побудовою моделей мікро і макроеволюцій, а також написанням громіздких структурних генетичних формул<sup>20</sup>. Тому в роботі запропонований спрощений системно-морфологічний підхід з побудовою цифрової матриці з поступовим вилученням елементів системи при двійковому кодуванні. Таким чином в еволюційному розвитку системи ЗМ можна передбачити від минулого через сучасне до майбутнього при переборі всіх варіантів лише 7 комбінаторних сполучень з наступними кодами: ЗМ1-11111, ЗМ2-10111, ЗМ3-11011, ЗМ4-11101, ЗМ5-10011, ЗМ6-11001, ЗМ7-10001 (рис. 9). Дотепер у виробництві переважно використовуються системи ЗМ1-ЗМ3, частково ЗМ4. Кожний код дає поштовх для пошуку різних варіантів його реалізації.

| Елемент системи<br>Варіант системи | ДЕ | ПЕ | ПЗ | ЗП | ОЗ |
|------------------------------------|----|----|----|----|----|
| <b>ЗМ1</b>                         | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| <b>ЗМ2</b>                         | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  |
| <b>ЗМ3</b>                         | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  |
| <b>ЗМ4</b>                         | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  |
| <b>ЗМ5</b>                         | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  |
| <b>ЗМ6</b>                         | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  |
| <b>ЗМ7</b>                         | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  |

Рис.9. Двійкова морфологічна матриця еволюції удосконалення системи ЗМ

Побудова і дослідження математичної моделі є одним з трудомістких етапів в проектуванні нових виробів. В даний час на це, особливо, для дослідження динаміки систем твердих тіл, витрачається невиправдано багато часу. Це пов'язано з тим, що не розроблений універсальний підхід до опису зв'язків між тілами. Можливо, тому до цього часу для кожного випадку розробляється своя окрема модель.

18 Шинкаренко В.Ф. (2002). Основи теорії еволюцій електромеханічних систем. К. : Наукова думка. 288 с.

19 Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. (2015). Генетичні формули опису і структурні схеми самоналагоджувальних приводів затиску. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем, 36. Краматорськ. С. 150–153.

20 Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. (2015). Опис самоналагоджувальних приводів затиску на різних рівнях складності структури і генетичної інформації. Міжвузівський збірник "Наукові нотатки" 50. Луцьк. С.108–111.

## 6. Генетичний підхід

ЕМПрЗ відносять до динамічних перетворювачів енергії. Відповідно до генетичного підходу до опису ТС<sup>21</sup> структуру ЕМПрЗ можна представити у вигляді силового потоку. Ці структури є тривимірними об'єктами з явно вираженою геометричною інформацією, що пов'язано з багатоваріантністю можливих просторових компонувань і різноманітністю форм активних частин передавального-підсилювальних ланок. Крім того, така структура відтворює просторову геометрію і топологію взаємопов'язаних силових контурів і силових потоків. Тому в найзагальнішому вигляді можна зазначити, що всі явища пов'язані з перетворенням та передачею зусиль в ПрЗ мають відповідні геометричні прообрази (геометричні моделі).

Відповідно до генетичного підходу<sup>22</sup> ля опису ПрЗ на хромосомному рівні необхідно використовувати елементарний силовий потік, враховуючи що: 1.Силових (енергетичних) потоків може бути кілька за входами і виходами. 2. Вхідні та вихідні силові потоки можуть бути однаковими та різними і складатися з обмеженої кількості їх видів та обмеженого набору варіантів просторового розташування (координатних рухів). 3.Силові потоки можуть бути з зовнішнім джерелом енергії переважно і внутрішнім джерелом рідше (використання відцентрових сил, магнітного поля, сил пружності тощо). 4. З'єднання окремих силових потоків може бути послідовним, паралельним, паралельно-послідовним. 5. Між входом і виходом силового потоку ПрЗ є різні перетворювачі, але їх кількість обмежена (наприклад, до механічних перетворювачів відносяться важільні, клинові, плунжерні, спіральні, зубчасті, гвинтові, пружні). 6. Можлива комбінація перетворювачів в силових потоках ПрЗ і ЗП, а можливий один перетворювач для ЗМ, коли функції ПрЗ виконує сам ЗП. 7. Передача та перетворення (трансформація) силових потоків може відбуватися у різних середовищах (твердих, плинних, сипучих, рідинних, повітряних, електромагнітних, магнітострикційних, біологічних та інших поки нам невідомих).

Основними критеріями, що визначають структурну організацію ПрЗ в його виконавчій частині є характеристики перетворювачів енергії, що змінюють характеристики вхідного силового потоку (зусилля) відповідно до певних законів, чим забезпечують появу та підтримку напруженого стану (силового поля) ЗМ за заданим законом функціонування механізму. Отже,

21 Хамуйела Ж.А. Герра. (2017) Генетико-морфологический синтез зажимных патронов. Дис. докт. техн. наук. К.: НТУУ «КПИ им. И.Сикорского». 379 с.

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

концептуально ПрЗ є проміжним перетворювачем силових потоків (енергії у формі силового потоку) між джерелом і перетворювачем енергії ПЕ і ЗП (рис. 10, а). Умовно кажучи, якщо абстрактно уявити ЗМ, якого ще не існує, але який треба створити, то модель силових (енергетичних) потоків буде складатися з двох елементарних потоків: один в ПрЗ  $F_0(M_0) - F_1(M_1)$ , а другий в ЗП  $F_1(M_1) - F_2$  без вказівки координатного напрямку сил (моментів) на вході та виході. Тоді повний потік від джерела енергії Е через перетворювачі ПЕ до об'єкта затиску (ОЗ) запишеться у вигляді генетичної формули ЗМ – взаємодії трьох матеріальних точок (генів  $O, O_P, O_2$ ) (рис. 10, б)

$$F_0(M_0) - F_1(M_1) - F_2$$

де на хромосомному рівні для ПрЗ генетичний код буде  $F_0(M_0) - F_1(M_1)$ , а для ЗП –  $F_1(M_1) - F_2$ .

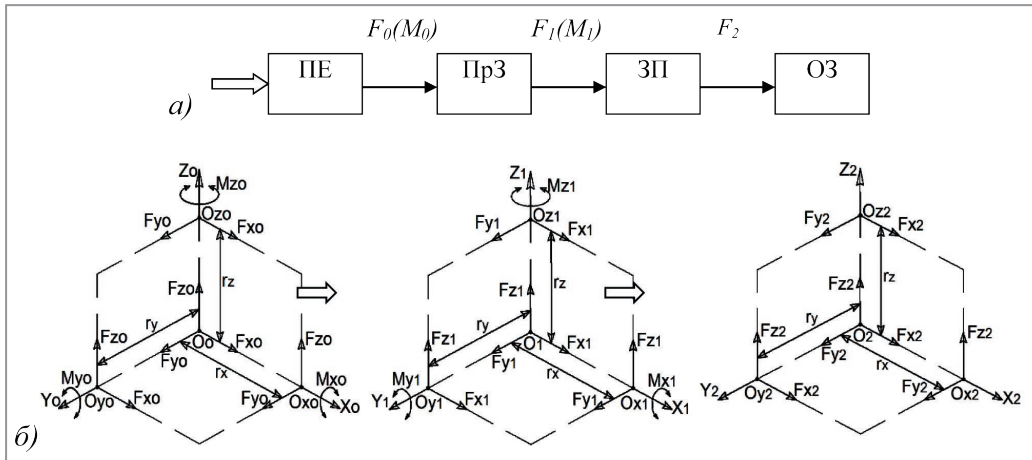


Рис. 10. Узагальнені структура (а) і модель силових (енергетичних) потоків (б) в затискному механізмі: Е – джерело енергії; ПЕ – перетворювач енергії; ПрЗ – привод затиск; ЗП – затискний патрон; ОЗ – об'єкт затиску

Як для ЗП на об'єктному рівні елементарний силовий контур може бути замкнений відкритий, замкнений закритий, розімкнений і комбінований, так і в ПрЗ елементарний силовий контур може бути із замиканням: силовим не пружним (відкритий контур, що завжди пов'язаний з джерелом та перетворювачем енергії); силовим пружним (за рахунок потенційної енергії пружного елемента, наприклад, пакету тарілчастих пружин); геометричним при відключенні від джерела енергії і натягом пружної системи механізм; фрикційним із само загальмовуванням; комбінованим<sup>23</sup>.

Силовий контур позначається цифрами 1, 0 зверху після запису генетичного коду в прямих дужках (табл. 5). За видом енергії силових потоків, що

<sup>23</sup> Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. (2015). Аналіз процесу затиску-розтиску тіл обертання в затискному механізмі з електромеханічним приводом Інженерні науки : вісник ХНТУ, №4 (55), 2015. С. 48–56.

використовується ПрЗ можуть бути: механічні, електромагнітні, рухомих середовищ (гідро-пневно) та їх комбінації, що визначає вид енергетичних потоків (взаємодія твердих тіл, електромагнітна взаємодія, тиск рухомих середовищ)<sup>24</sup>. Таким чином в ЗМ і, зокрема в ПрЗ, можливе використання різних середовищ і полів в силових потоках з наступними позначеннями:

MSB (mechanical solid body) – механічні передачі і перетворювачі за допомогою твердих тіл; EMF (electromagnetic field) – електромагнітні поля, що діють безпосередньо або в складі (структурі) електромеханічних систем передачі і перетворення; LFM (liquid flowing medium) – рідинно-плинні та в'язкі середовища для передачі та перетворення (зміни параметрів потоку); AVM (air and vacuum medium) – газові (повітряні) середовища для передачі і перетворення, в тому числі вакуум; CMF (constant magnetic field) – магнітні поля притягання та відштовхування; TRF (thermal field) – теплові потоки, що спричиняють сили теплового розширення (звуження) речовини; CFF (centrifugal force) – відцентрові сили при обертанні незрівноважених мас (частин). На даному етапі розвитку ЗМ верстатів токарної групи найбільшого поширення набули ПрЗ механічного виконання. У виконавчій частині (ППМ) механічні ПрЗ мають геометричні прообрази кількості видів яких є обмежена (рис. 11): важільні, клинові, плунжерні, спіральні, зубчасті, гвинтові, пружні.

Таблиця 5

### Позначення силового контуру

| Затискний патрон (ЗП)              |              | Привод затиску (ПрЗ)                       |                    |
|------------------------------------|--------------|--------------------------------------------|--------------------|
| Вид контуру                        | Позначення   | Вид замикання                              | Позначення         |
| замкнений закритий                 | [1]          | геометричне                                | [1]                |
| замкнений відкритий                | 1            | фрикційне                                  | 1                  |
| розімкнений                        | 0            | силове непружне                            | 0                  |
| комбінований: замкнено-розімкнений | [1],0<br>1,0 | силове пружне                              | [0]                |
| комбінований: розімкнено-замкнений | 0,1<br>0,[1] | комбіноване: геометричне – силове непружне | [1],0<br>0,[1]     |
|                                    |              | комбіноване: геометричне-фрикційне         | [1],1<br>1,[1]     |
|                                    |              | комбіноване: геометричне-силове пружне     | [1],[0]<br>[0],[1] |
|                                    |              | комбіноване: фрикційне-силове пружне       | 1,[0]<br>[0],1     |
|                                    |              | комбіноване: фрикційне-силове непружне     | 1,0<br>0,1         |

24 Hamuyela J.A. Guerra, Kuznetsov Y.N., Ibrahim Al-Refo Farhan. (2013). Creation of new clamping mechanisms using genetic-morphological method. Journal of mechanical engineering NTUU «Kyiv Polytechnic Institute» 67. pp. 155–162.

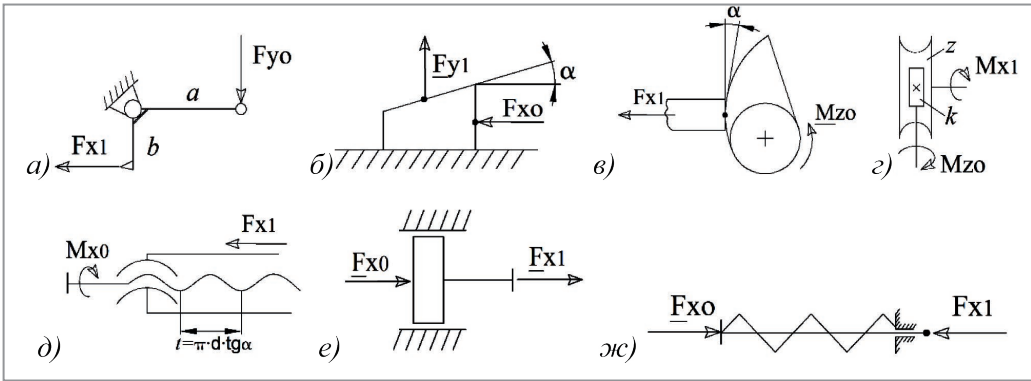


Рис. 11. Варіанти механічних перетворювачів енергії ПрЗ токарного автомата:  
 а – важіль (LV); б – клин (WD); в – спіраль (SP); г – зубчата передача (GR);  
 д – гвинт (SC); е – плунжер (PL); ж – пружина (SR)

Кількість перетворювачів силових потоків та їх видів (з числа вище перерахованих) може бути різною та комбінуватися. Відповідно у ПрЗ механічного виконання можуть існувати вхідні та вихідні силові потоки у вигляді сил та моментів сил. Очевидною є можливість існування ПрЗ, силові потоки яких розташовуються у тримірному просторі та мають інший набір координатних рухів. Для виявлення нових видів ПрЗ доцільно провести аналіз можливих варіантів просторового розташування та взаємної орієнтації вхідних та вихідних силових потоків.

## 7. Напрями розвитку методів і підходів до створення мотор-шпинделів із затискними патронами у складі шпиндельного вузла

В останній час в шпиндельних вузлах широко використовують мотор-шпинделі (М-Ш), які суттєво скорочують кінематичні ланцюги в приводі головного руху, зменшують витрати металу й енергії. Для пошуку нових технічних рішень використаний генетичний підхід, описаний вище. Забезпечення вимоги з підвищення питомих показників на хромосомному рівні вирішується шляхом відбору хромосом, що мають схильність до максимального використання активної поверхні. Вимога конкурентоспроможності підтверджується на завершальному етапі структурно синтезу отриманням охоронного документа.

Пред'явленій сукупності вимог до системи електроприводу, найбільшою мірою схильні батьківські хромосоми  ${}^3\text{ЦЛ } 0.2\text{y}$  (ізотоп) і  $\text{ЦЛ } 2.0\text{x}$ . Результати синтезу на основі вказаних хромосом представлені на рис. 12 і табл. 6. Проаналізувавши отримані результати спрямованого синтезу, варто зазначити,

що всі синтезовані системи мають модульний принцип. Для подальшого розгляду і аналізу з переліку систем слід обрати систему з відносно більшою питомою потужністю основного руху різання (обробки). Такою системою є синтезована система S09. Далі в роботі розглянуто тільки частину обраної системи, що реалізує поступальний рух (він же рух подач).

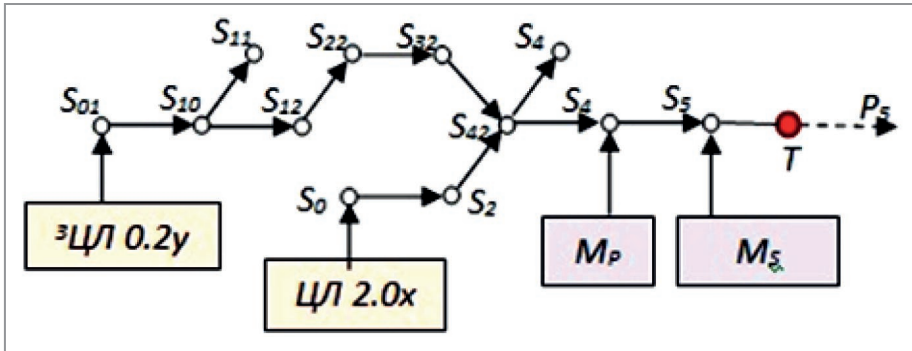


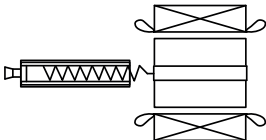
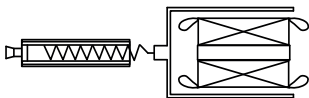
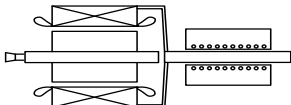
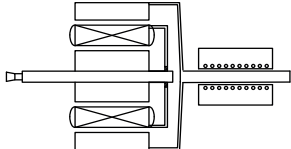
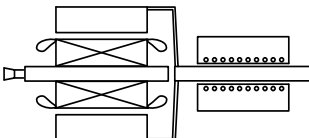
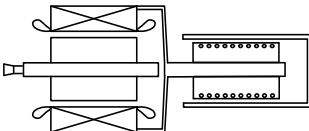
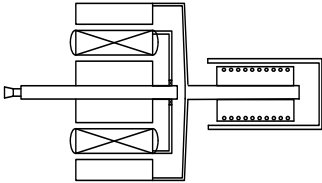
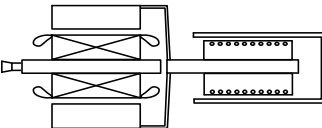
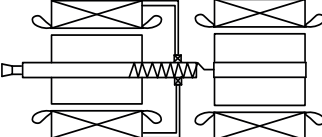
Рис.12. Генетична модель синтезу гібридної структури ТС

Таблиця 6

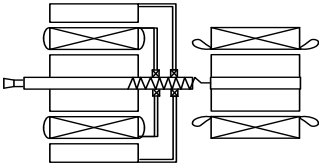
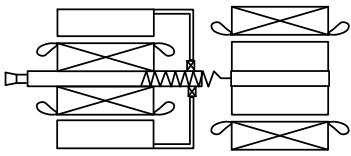
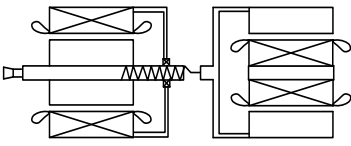
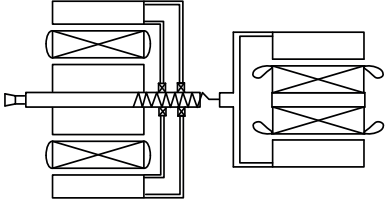
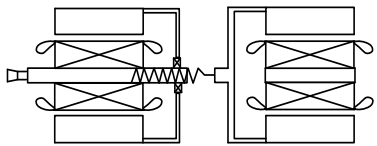
### Результати спрямованого структурного синтезу М-Ш

| Функція М-Ш      | Синтезована структура | Структурна схема | Генетичний код                                                                      |
|------------------|-----------------------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                | 2                     | 3                | 4                                                                                   |
| Обертовий рух    | $S_{01}$              |                  | ЦЛ 0.2у<br>Однороторна обертова машина                                              |
|                  | $S_{02}$              |                  | ЦЛ 0.0у<br>Двороторна обертова машина                                               |
|                  | $S_{03}$              |                  | ЦЛ 0.2у <sup>-1</sup><br>Обертова машина із зовнішнім вторинним елементом           |
| Поступальний рух | $S_{n1}$              |                  | ЦЛ 2.0х<br>Машина поступального руху з одним вторинним елементом                    |
|                  | $S_{n2}$              |                  | ЦЛ 2.0х <sup>-1</sup><br>Машина поступального руху із зовнішнім вторинним елементом |

Продовження табл. 6

| 1                                                                                           | 2         | 3                                                                                   | 4                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Поступальний рух (шляхом механічного перетворення обертового руху ЕМ)                       | $S_{r1}$  |    | ЦЛ0.2у xSm<br>Однороторна обертова машина з рухом подачі шпинделя, реалізованим системою «гвинт-гайка»                                                                    |
|                                                                                             | $S_{r2}$  |    | ЦЛ 0.2у <sup>-1</sup> xSm<br>Обертова машина із зовнішнім ротором. Рух подачі шпинделя забезпечується системою «гвинт-гайка»                                              |
| Незалежний обертово-поступальний рух<br>Функція М-Ш<br>Незалежний обертово-поступальний рух | $S_{on1}$ |    | ЦЛ 0.2у x ЦЛ 2.0х=<br>ЦЛ (0.2у x 2.0х)<br>Однороторна обертово-поступальна машина                                                                                         |
|                                                                                             | $S_{on2}$ |    | ЦЛ 0.0у x ЦЛ 2.0х=<br>ЦЛ (0.0у x 2.0х)<br>Двороторна обертово-поступальна машина                                                                                          |
|                                                                                             | $S_{on3}$ |    | ЦЛ 0.2у <sup>-1</sup> x ЦЛ 2.0х=<br>ЦЛ (0.2у <sup>-1</sup> x 2.0х)<br>Обертово-поступальна машина із зовнішнім вторинним елементом обертової машини                       |
|                                                                                             | $S_{on4}$ |   | ЦЛ 0.2у x ЦЛ 2.0х <sup>-1</sup> =<br>ЦЛ (0.2у x 2.0х <sup>-1</sup> )<br>Обертово-поступальна машина із зовнішнім вторинним елементом поступальної машини                  |
|                                                                                             | $S_{on5}$ |  | ЦЛ 0.0у x ЦЛ 2.0х-1=<br>ЦЛ (0.0у x 2.0х-1)<br>Обертово-поступальна машина із подвійним обертовим вторинним елементом та зовнішнім вторинним елементом поступальної машини |
|                                                                                             | $S_{on6}$ |  | ЦЛ 0.2у-1 x ЦЛ 2.0х-1=<br>ЦЛ (0.2у-1 x 2.0х-1)<br>Обертово-поступальна машина із зовнішніми вторинними елементами                                                         |
|                                                                                             | $S_{on7}$ |  | 2ЦЛ0.2у xSm<br>Обертово-поступальна машина з рухом подачі шпинделя, реалізованим системою «гвинт-гайка»                                                                   |

Продовження табл. 6

| 1                                                                                                                     | 2     | 3                                                                                   | 4                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Незалежний<br>обертово-<br>посту-<br>пальний рух<br>Функція М-III<br>Незалежний<br>обертово-<br>посту-<br>пальний рух | Sop8  |    | ЦЛ (0.0 x 0.2) x Sm<br>Обертово-поступальна<br>машина із подвійним<br>обертовим вторинним<br>елементом та рухом подачі<br>шпинделя, реалізованим<br>системою «гвинт-гайка»                                                       |
|                                                                                                                       | Sop9  |    | ЦЛ (0.2y-1 x 0.2) x Sm<br>Обертово-поступальна<br>машина із зовнішнім<br>обертовим вторинним<br>елементом та рухом подачі<br>шпинделя, реалізованим<br>системою «гвинт-гайка»                                                    |
|                                                                                                                       | Sop10 |    | ЦЛ (0.2y x 0.2y-1) x Sm<br>Обертово-поступальна<br>машина із зовнішнім<br>ротором приводу подачі;<br>поступальний рух шпинделя<br>реалізований системою<br>«гвинт-гайка»                                                         |
|                                                                                                                       | Sop11 |   | ЦЛ (0.0y x 0.2y-1) x Sm<br>Обертово-поступальна ма-<br>шина із подвійним обер-<br>товим вторинним елемен-<br>том та зовнішнім ротором<br>приводу подачі; поступаль-<br>ний рух шпинделя реалізо-<br>ваний системою «гвинт-гайка» |
|                                                                                                                       | Sop12 |  | 2 ЦЛ 0.2y-1 x Sm<br>Обертово-поступальна ма-<br>шина із зовнішнім обертовим<br>вторинним елементом та<br>зовнішнім ротором приводу<br>подачі; поступальний рух<br>шпинделя реалізований<br>системою «гвинт-гайка»                |

Представлена на рис. 12 модель, по суті, є графічним відображенням генетичної програми шуканого ЕМ-об'єкту, структура якого визначається суміщеною хромосомою п'ятого покоління S54 (табл. 7).

Таблиця 7

### Результати розшифровки генетичної програми синтезованої гібридної структури

| Шифр<br>хромосоми     | Структурна формула                                   | Статус хромосоми      | Коефіцієнт<br>відповідності |
|-----------------------|------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| 1                     | 2                                                    | 3                     | 4                           |
| ${}^3\text{ЦЛ } 0.2y$ | ${}^3\text{ЦЛ } 0.2y$                                | Батьківська (ізопоп)  | 0,15                        |
| $S_{0l}$              | $({}^3\text{ЦЛ } 0.2y)_1 \times (\text{ЦЛ } 0.2y)_2$ | Породжувальна (парна) | -                           |

Продовження табл. 7

| 1                 | 2                                                                                                                                                                                         | 3                                                              | 4    |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------|
| $S_{10}$          | $(^3\text{ЦЛ } 0.2y)_1 \times [2(\text{ЦЛ } 0.2y):R]_2$                                                                                                                                   | Інформаційна (реплікована $S_{01}$ )                           |      |
| $S_{11}$          | $(^3\text{ЦЛ } 0.2y)_1 \times [2(\text{ЦЛ } 0.2y):R_{ox}]_2$                                                                                                                              | Інформаційна (аксіальний ізомер)                               |      |
| $S_{12}$          | $(^3\text{ЦЛ } 0.2y)_1 \times [2(\text{ЦЛ } 0.2y):R_{\mu}]_2$                                                                                                                             | Інформаційна (радіальний ізомер)                               |      |
| $S_{22}$          | $(^3\text{ЦЛ } 0.2y)_1 \times [2(\text{ЦЛ } 0.2y):R:M(r_2 > r_1)]_2$                                                                                                                      | Інформаційна (мутований ізомер)                                |      |
| $S_{32}$          | $(^3\text{ЦЛ } 0.2y)_1 \times [2(\text{ЦЛ } 0.2y):R:M(r_2 > r_1):I_{ox}]_2$                                                                                                               | Породжувальна (просторово-інверсна)                            |      |
| $\text{ЦЛ } 2.0x$ | $\text{ЦЛ } 2.0x$                                                                                                                                                                         | Батьківська                                                    | 0,13 |
| $S_{02}$          | $(\text{ЦЛ } 2.0x)_1 \times (\text{ЦЛ } 2.0x)_2$                                                                                                                                          | Породжувальна (парна)                                          |      |
| $S_{20}$          | $(\text{ЦЛ } 2.0x)_1 \times [(\text{ЦЛ } 2.0x):M(L_2 > L_1)]_2$                                                                                                                           | Породжувальна (мутована)                                       |      |
| $S_{42}$          | $\{(^3\text{ЦЛ } 0.2y)_1 \times [2(\text{ЦЛ } 0.2y):R:M(r_2 > r_1):I_{ox}]_2\} \times \{(\text{ЦЛ } 2.0x)_1 \times [(\text{ЦЛ } 2.0x):M(L_2 > L_1)]_2\}$                                  | Інформаційна (гібридна)                                        |      |
| $S_{43}$          | $\{(^3\text{ЦЛ } 0.2y)_1 \times [2(\text{ЦЛ } 0.2y):R:M(r_2 > r_1):I_{ox}]_2\} \times \{(\text{ЦЛ } 2.0x)_1 \times [(\text{ЦЛ } 2.0x):M(L_2 > L_1)]_2\} : I_R$                            | Інформаційна (гібридний ізомер – радіальний)                   |      |
| $S_{44}$          | $\{(^3\text{ЦЛ } 0.2y)_1 \times [2(\text{ЦЛ } 0.2y):R:M(r_2 > r_1):I_{ox}]_2\} \times \{(\text{ЦЛ } 2.0x)_1 \times [(\text{ЦЛ } 2.0x):M(L_2 > L_1) : I_L]_2\} \times (M_p)$               | Породжувальна (аксіальний ізомер, суміщений з пінолією $M_p$ ) |      |
| $S_{54}$          | $\{(^3\text{ЦЛ } 0.2y)_1 \times [2(\text{ЦЛ } 0.2y):R:M(r_2 > r_1):I_{ox}]_2\} \times \{(\text{ЦЛ } 2.0x)_1 \times [(\text{ЦЛ } 2.0x):M(L_2 > L_1):I_L]_2\} \times (M_p \rightarrow T_s)$ | Породжувальна ( $S_{44}$ , суміщена зі шпинделем $M_s$ )       | 0,9  |

Синтезована хромосома  $S_{54}$  на 90% задовольняє задану  $F_s$  за виключенням вимоги конкурентоздатності ( $K_s > K_A$ ), яка визначається на етапі розробки технічного рішення і його наступного патентування. При подачі напруги на обмотку 2 індуктори обертального руху 3, виникає магнітне поле, яке взаємодіє з двосторонньою активною поверхнею шпинделя 1 і, таким чином, змушує шпиндель 1 обертатися з необхідною частотою обертання  $n(\omega)$ . Для забезпечення подачі шпинделя, подається напруга на обмотку 6 індуктора поступального руху 5, електромагнітне поле якої взаємодіє з вторинним елементом з постійними магнітами 4 і забезпечує потрібну подачу  $S$ . Анало-

гічним чином була побудована генетична модель синтезу (рис. 13) суміщених електромеханічних структур М-Ш з реалізацією зворотно-поступального руху, в яких рух подачі здійснюється шляхом перетворення обертального руху на поступальний завдяки застосуванню системи «гвинт-гайка».

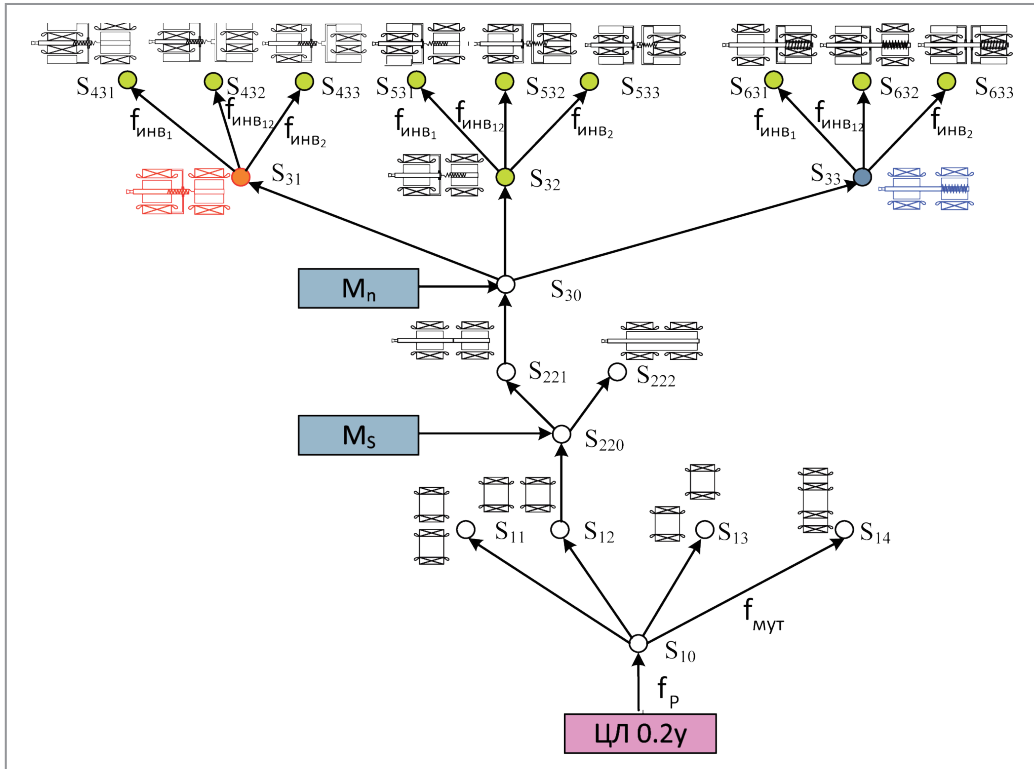


Рис. 13. Генетична модель синтезу гібридних структур мотор-шпинделів

Якщо генетичний синтез дозволяє знайти нові структури М-Ш і шпиндельних вузлів на їх основі, то для синтезу схем і конструкцій доцільно використовувати системно-морфологічний підхід. Теоретико-множинною мовою морфологічний опис містить четвірку:

$$S_m = \{E, R, Str, K\}, \quad (3)$$

де  $E = \{E_i\}_i$  – множина елементів і їх властивостей; елемент-підсистема, всередину якої морфологічний опис не проникає;  $R = \{R_i\}_i$  – множина зв'язків;  $Str$  – структура (визначається генетичним кодом);  $K$  – композиція (компонування в просторі).

Для розробки морфологічної моделі оберемо функціональні ознаки, які розкладемо на три групи відповідно до модульного принципу: 1. Модуль приводу обертального головного руху; 2. Модуль приводу поступального руху (подачі); 3. Модуль затискного механізму.

Для першого модуля обираємо ознаки: 1. Джерело енергії; 2. Первинне джерело поля (ПДП); 3. Кількість шпинделів; 4. Вид опор шпинделя; 5. Опори радіальної фіксації шпинделя; 6. Опори осьової фіксації шпинделя; 7. Зв'язок між шпинделями; 8. Зв'язок шпинделя з ПДП; 9. Геометрична вісь шпинделя; 10. Відносне розташування шпинделів; 11. Виконання корпусу ШВ.

Для другого модуля: 12. Джерело енергії; 13. ПДП; 14. Вид перетворювача руху; 15. Розташування напрямних; 16. Виконання напрямних.

Для третього модуля: 17. Тип затискного патрона по перетворювачу руху і сили; 18. Поверхня базування затискного патрона для приєднання до шпинделя; 19. Джерело енергії в приводі затиску-розтиску; 20. ПДП; 21. Вид перетворювача енергії (сили).

Після розробки морфологічної моделі переходять до синтезу варіантів. Кількість варіантів може визначатися астрономічними числами, тому що кожна з характеристик (ознак) має різні варіанти (альтернативи). Сукупність варіантів морфологічної моделі дозволяє визначити повну кількість рішень.

З урахуванням варіантів реалізації морфологічних ознак отримаємо морфологічну модель, для якої морфологічна матриця в згорнутому вигляді

$$M_{\text{шв}} = M_{\text{ш}} \wedge M_{\text{п}} \wedge M_{\text{з}} \quad (4)$$

де  $M_{\text{ш}}$ ,  $M_{\text{п}}$ ,  $M_{\text{з}}$  – морфологічні матриці відповідно модуля обертового руху шпинделя, модуля приводу подач (поступального руху) і модуля затиску-розтиску (затискного механізму).

У морфологічних моделях з роботи В.Ф. Шинкаренко взято первинні джерела поля (ПДП) і, зокрема, електромагнітного поля: ЦЛ – циліндричне; КН – конічне; ТП – тороїдальне плоске; ТЦ – тороїдальне циліндричне.

Розгорнемо морфологічну модель для першого модуля:

$$M_{\text{ш}} = \begin{vmatrix} 1.1 & 2.1 & 3.1 & 4.1 & 5.1 & 6.1 & 7.1 & 8.1 & 9.1 & 10.1 & 11.1 \\ 1.2 & 2.2 & 3.2 & 4.2 & 5.2 & 6.2 & 7.2 & 8.2 & 9.2 & 10.2 & 11.2 \\ 1.3 & 2.3 & 3.3 & 4.3 & 5.3 & 6.3 & 7.3 & 8.3 & 9.3 & 10.3 & 11.3 \\ 1.4 & 2.4 & & 4.4 & 5.4 & 6.4 & & & 9.4 & & 11.4 \\ & & & 4.5 & & 6.5 & & & & & \end{vmatrix} \quad (5)$$

Загальна кількість варіантів конструктивних схем першого модуля складає  $N_{\text{ш}} = 4 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 4 = 3078400$

Те ж саме зробимо для другого і третього модулів:

$$M_{\text{п}} = \begin{vmatrix} 12.1 & 13.1 & 14.1 & 15.1 & 16.1 \\ 12.2 & 13.2 & 14.2 & 15.2 & 16.2 \\ 12.3 & 13.3 & 14.3 & 15.3 & 16.3 \\ 12.4 & & & 15.4 & 16.4 \end{vmatrix} \quad (6)$$

$$M_3 = \begin{vmatrix} 17.1 & 18.1 & 19.1 & 20.1 & 21.1 \\ 17.2 & 18.2 & 19.2 & 20.2 & 22.2 \\ 17.3 & 18.3 & 19.3 & & 23.3 \\ 17.4 & 18.4 & 19.4 & & \end{vmatrix} \quad (7)$$

Звідки загальна кількість варіантів конструктивних схем другого модуля  $N_{II} = 4 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 4 = 576$ , а третього модуля  $N_3 = 4 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 3 = 384$ .

Таким чином запропонована модель дає загальну кількість шпindelьних вузлів і М-Ш, серед яких є багато до цього часу невідомих:

$$N_{шв} = N_{ш} \cdot N_3 \cdot N_{II} = 3078400 \cdot 576 \cdot 384 = 680882825600$$

Ця астрономічна кількість варіантів може бути закладена в генетичний банк даних і знань про ЕМ-системи, які можуть бути використані в майбутньому в верстатному обладнанні.

Якщо вважати, що створення високошвидкісних шпindelьних вузлів з використанням тільки джерела енергії – електричного (альтернативи 1.1, 12.1, 19.1), ПДП – ЦЛ, КН (альтернатива 2.1, 2.2) в першому модулі; із виключенням механічних зв'язків між шпindelями (залишаються альтернативи 7.1, 7.2); з виключенням розташування (альтернатива 15.4), виконання напрямних ковзання в пазах (залишаються альтернатива 16.1, 16.2, 16.3); з виконанням затискних механізмів з клиновими, спіральними та пружними патронами (альтернативи 17.1, 17.2, 17.2), базування по конічній поверхні й торцю (альтернативи 18.1, 18.3), то ми отримуємо усічені морфологічні матриці:

$$M_{ш} = \begin{vmatrix} 1.1 & 2.1 & 3.1 & 4.1 & 5.1 & 6.1 & 7.1 & 8.1 & 9.1 & 10.1 & 11.1 \\ & 2.2 & 3.2 & 4.2 & 5.2 & 6.2 & 7.2 & 8.2 & 9.2 & 10.2 & 11.2 \\ & & 3.3 & 4.3 & 5.3 & 6.3 & & 8.3 & 9.3 & 10.3 & 11.3 \\ & & & 4.4 & 5.4 & 6.4 & & & 9.4 & 10.4 & 11.4 \\ & & & & 4.5 & & 6.5 & & & & \end{vmatrix} \quad (8)$$

$$M_{II} = \begin{vmatrix} 12.1 & 13.1 & 14.1 & 15.1 & 16.1 \\ & 13.2 & 14.2 & 15.2 & 16.2 \\ & & 13.3 & 14.3 & 15.3 & 16.3 \end{vmatrix} \quad (9)$$

$$M_3 = \begin{vmatrix} 17.1 & 18.1 & 19.1 & 20.1 & 21.1 \\ 17.2 & 18.2 & & 20.2 & 22.2 \\ 17.3 & & & & 23.3 \end{vmatrix} \quad (10)$$

Кількість варіантів конструктивних схем суттєво знизиться:

$N'_{\text{ш}} = 2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 4 = 76800$ ,  $N'_{\text{п}} = 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 = 81$ ,  $N'_3 = 3 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3 = 36$ , а загальна кількість стане  $N'_{\text{шв}} = N'_{\text{ш}} \cdot N'_3 \cdot N'_{\text{п}} = 76800 \cdot 81 \cdot 36 = 223948800$ , що теж дуже багато при сформульованому конкретному завданні.

Згідно з морфологічними моделями й матрицями, синтезовані шпиндельні вузли за патентами України № 91154 (рис. 14) і №116050 (рис. 15) можуть бути записані у вигляді морфологічних формул. Генетико-морфологічний підхід сприяє пошуку нових класів ЕМ-систем, які дозволяють у верстатах позбавитися від механічних передач і перейти до передачі руху завдяки електромагнітному полю. Зокрема це стосується багатошпиндельних верстатів, багатопозиційних шпиндельних головок, револьверних головок з інструментами, що обертаються.

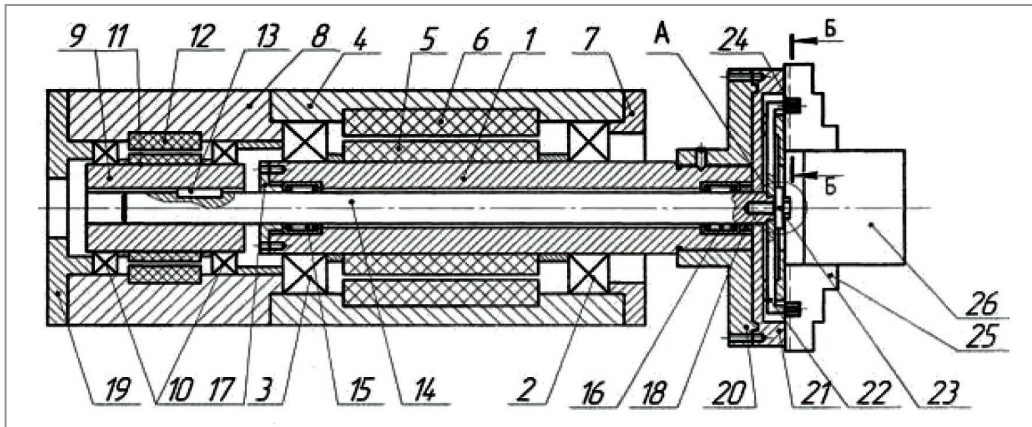


Рис.14. Синтезований варіант ШВ1 за патентом України № 91154

$$\begin{aligned} \text{ШВ1} \rightarrow & |1.1-2.1-3.2-4.4-5.2-6.2-7.2-8.2-9.1-11.1| \wedge \\ & |12.1-13.1-14.2-15.3-16.4| \wedge |17.1-18.1-19.2| \end{aligned} \quad (11)$$

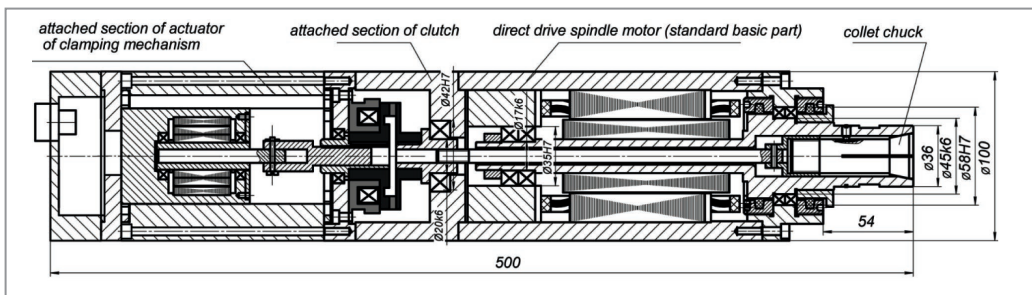


Рис.15. Синтезований варіант ШВ2 за патентом України № 116050

$$\begin{aligned} \text{ШВ2} \rightarrow & |1.1-2.1-3.1-4.1-5.4-6.3-7.1-8.2-9.1-11.2| \wedge \\ & |12.1-13.1-14.1-15.3-16.4| \wedge |17.1-18.1-19.2| \end{aligned} \quad (12)$$

## 8. Опис ЕМПрЗ, що обертаються, на різних рівнях складності структури

Відповідно до теоретичних припущень та аксіом, що лежать в основі генетичної концепції побудови та розвитку технічних систем загалом (наприклад, «спадковість») і ПрЗ зокрема, суттєві властивості структур ПрЗ можуть успадковуватися у процесі розвитку (ускладнення) структури ПрЗ відповідно до певних правил шляхом синтезу на їх основі нових структур. Тому створення нових конструкцій ПрЗ передбачає збереження (успадкування) генетично-морфологічної інформації (первинних структур силових потоків  $Fa_0 - Fa_1$  та  $Ma_0 - Fa_1$ ) через підвищення рівня структурної організації ПрЗ шляхом застосування електричних систем. У цьому випадку зусилля, що подається на «силовий вхід» ПрЗ, можна отримати шляхом електромагнітної взаємодії нерухомого відносно корпусу верстата статора та рухомого відносно елементів шпинделя ротора. Оскільки величина зусилля магнітної взаємодії елементів має квадратичну залежність від відстані між ними, то в такому випадку ця відстань розподілена між декількома (реплікація, відображено символом « $K_R$ » у структурних формулах) магнітними елементами СМЕ (constant magnetic element), котрі взаємодіють послідовно (рис. 16).

Нові конструкції ПрЗ (рис. 16, 17) містять (успадкують) базові структури силових потоків ( $Fa_0 - Fa_1$ ) та ( $Ma_0 - Fa_1$ ), що реалізовані на вищих рівнях складності<sup>19</sup>, тобто розвинуті у напрямі підвищення рівня структурної організації ПрЗ. При цьому у нових конструкціях збереглася інформація від попередніх «поколінь» у вигляді структури силових потоків. Синтезовані ПрЗ також «успадкували» простоту конструкцій (мінімальна кількість елементів, зокрема рухомих) і набули в ході «еволюційних перетворень» властивостей, що сприяють покращенню експлуатаційних характеристик ЗМ: підвищення стабільності затиску при відхиленні діаметра заготовки від номінального значення, можливість регулювання сили затиску під час обробки (зменшення негативного впливу зовнішніх збурювальних впливів), підвищення автономності роботи та керування механізмом, покращення можливостей інтеграції ПрЗ у склад системи керування верстата, пониження металоємності та складності конструкції верстата шляхом усунення механічної системи живлення та керування ПрЗ (зникає необхідність у використанні механізму відбору потужності для розподільчого вала, розподільчих валів, важільних передач та ін.) та ін. У запропонованих конструкціях електромеханічних ПрЗ система керування становить елек-

тронний блок, а система живлення – статор, нерухомо зафіксований на корпусі верстата. При цьому вхідна ланка ПрЗ оснащується ротором.

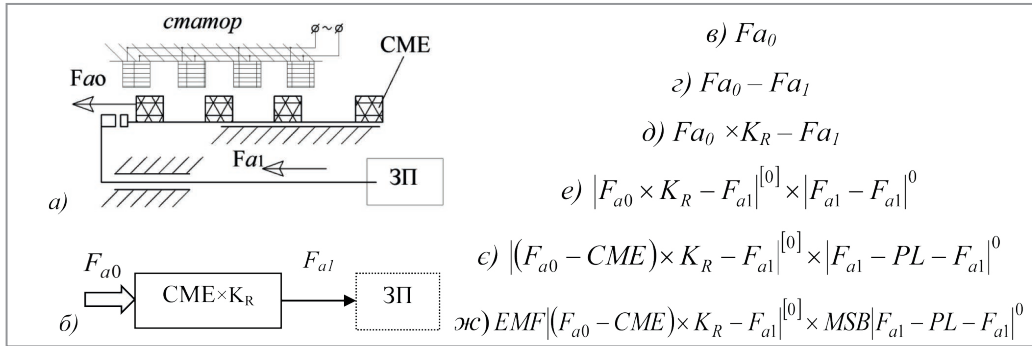


Рис. 16. Принципова (а) і структурна (б) схеми електромеханічного ПрЗ з поступальним рухом ротора і структурою силового потоку на різних рівнях складності: в – генетичному, з – хромосомному, д – об'єктному, е – популяційному, є – видовому, ж – системному

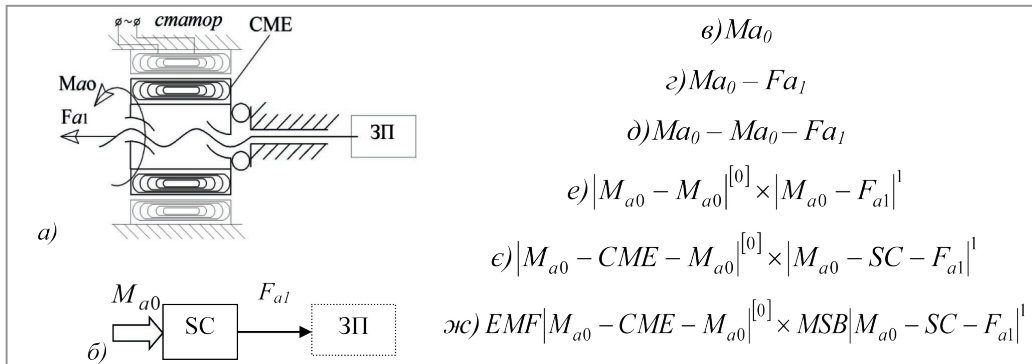


Рис. 17. Принципова (а) і структурна (б) схеми електромеханічного ПрЗ з магнітними елементами на різних рівнях складності: в – генетичному, з – хромосомному, д – об'єктному, е – популяційному, є – видовому, ж – системному

## 9. Моделювання шпиндельного вузла фрезерного верстата із мотор-шпинделем і ЗМ

Моделювання у вигляді структурних (генетичних і морфологічних) формул ШВ фрезерних верстатів, що містять мотор-шпиндель та ЗМ з електромеханічними ПрЗ дозволяє створити банк даних для подальшого передбачення нових структур, схем і конструкцій для верстатів нового покоління, в тому числі з каркасними несучими системами й механізмами паралельної структури.

Гібридні електромеханічні структури характеризуються змішаною генетичною інформацією<sup>18</sup>, тому їх функціональні властивості визначаються відповідними функціями, які властиві породжувальним видам. В основі

синтезогенезу гібридних видів лежать генетичні процеси схрещування, які зумовлюють ускладнення структур з одного боку, і розширення їх функціональних властивостей, з іншого. Основу суміщених структур ЕМПЕ становлять принципи просторового суміщення двох або декількох ЕМ-структур, які можуть відноситись до різних базових видів.

Системи типу «мотор-шпиндель» являють собою складні суміщені електромеханічні структури<sup>12</sup>, які мають механічну і електромагнітну частини (рис. 18). До механічної частини відноситься сам шпиндель, а до електромагнітної відносяться обмотки, які являються джерелом виникнення електромагнітного поля.

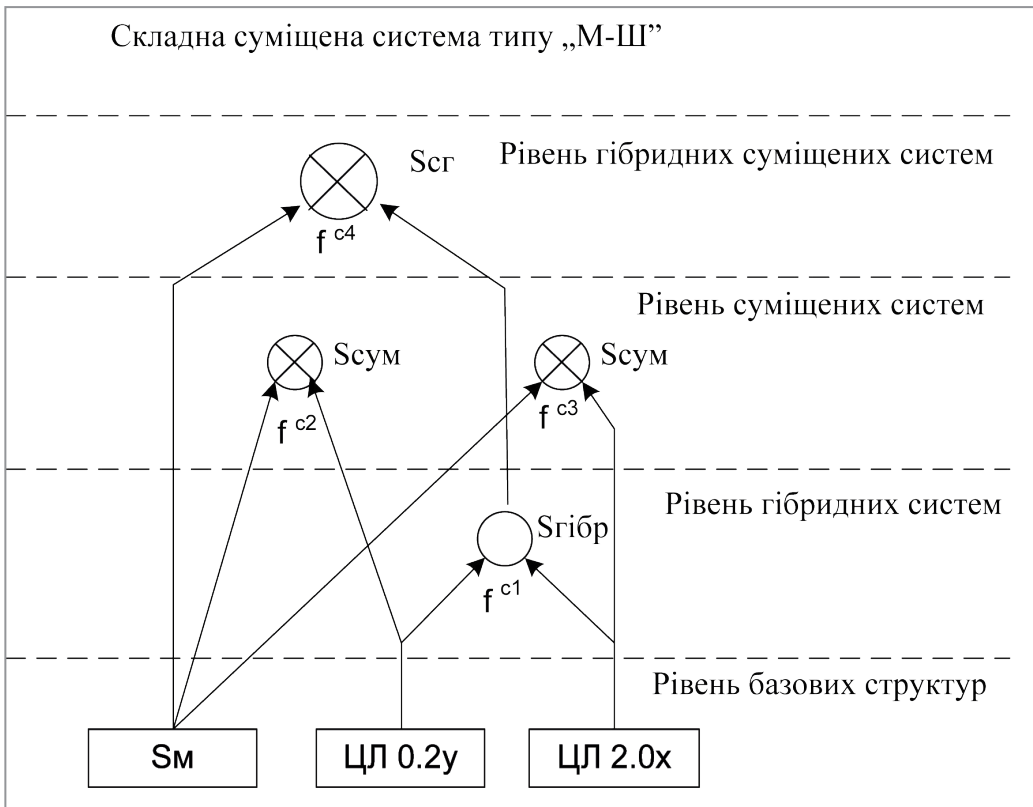


Рис. 18. Модель утворення складної суміщеної системи типу «М-Ш»

Суміщена ЕМ-система становить собою просторову композицію принаймні двох елементарних структур, кожна з яких виконує свою функцію в системі. Тому в такій суміщеній системі просторова форма і кількість рухомих та нерухомих частин, повітряних проміжків, систем живлення і керування визначається конкретною цільовою функцією, відповідною просторовою геометрією і кількістю суміщених елементарних ЕМ-структур.

Для опису структури ШВ із 3М фрезерного верстата на хромосомному рівні необхідно використовувати елементарний силовий потік, вводячи для різних варіантів кількості силових потоків їх комбінацію в залежності від поставленого завдання, характеристик об'єкта затиску (ОЗ) і розташування робочої зони обробки стосовно нього, що залежить від технологічних можливостей верстата і конструкції його елементів і, в першу чергу ШВ, наявності додаткових пристроїв на лінії шпинделя (осі ОЗ).

Спільність структурного і інформаційного базису електромеханічних та механічних об'єктів відкривають можливість використання узагальнених генетичних моделей структуроутворення в задачах аналізу і синтезу їх структур.

Для затиску суцільного ОЗ (хвостовика інструменту) число силових потоків при одинарному затиску визначається з морфологічної матриці, що описує варіанти входів та виходів:

$$M_{СП} = \begin{vmatrix} F_{x1} \\ F_{x1} \\ F_{y1} \\ M_{x1} \\ M_{x1} \\ M_{y1} \\ M_{y1} \end{vmatrix} \wedge \begin{vmatrix} F_{x2} \\ F_{y2} \end{vmatrix}, \quad (13)$$

яка дає варіантів  $N_{СП} = 7 \cdot 2 = 14$ .

При обертанні ОЗ, затиснутого зовні, через дію відцентрових сил  $F_{\omega}$  неврайонованих частин затиснених елементів (ЗЕ) відбувається зменшення вихідних сил  $F_{y2}$  до сил  $F_{y2\omega}$ , залежної від ряду факторів.

Якщо не враховувати напрям дії сил і моментів на вході, користуючись принципом симетрії, число варіантів для опису на хромосомному рівні скоротиться, тобто становить  $N'_{СП} = 8$  варіантів.

$$M'_{СП} = \begin{vmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ M_{x1} \\ M_{y1} \end{vmatrix} \wedge \begin{vmatrix} F_{x2} \\ F_{y2} \end{vmatrix}, \quad (14)$$

Моделювання і синтез ШВ із 3М для фрезерного верстата передбачає розв'язання задачі спрямованого пошуку суміщеної структури мо-

тор-шпинделя (М-Ш) і 3М за заданою функцією синтезу  $F_\omega$ , яка може бути визначено наступною мінімальною сукупністю основних вихідних вимог: – реалізацію незалежного керованого обертального руху шпинделя, в т.ч. і реверсивного ( $\pm\omega$ );

– забезпеченням співвісності ротора двигуна 3М з віссю симетрії шпинделя ( $S_{ox}$ ); – співвісність моментів та сил, що діють на шпиндель; – можливість керування кінематичним зв'язком в 3М ( $K$ ); – суміщенням шпинделя із 3М ( $Ш_{3П}$ );

З метою забезпечення коректності результатів синтезу, накладемо наступні обмеження на область пошуку: – розглядається лише електромеханічний принцип реалізації обертального руху; – розглядаються первинні джерела поля з осовою симетрією;

Інтегральна функція синтезу  $F_s$  визначається сукупністю вимог, що пред'являються, і представляється у вигляді послідовності часткових функцій. Виходячи з вказаних вимог, інтегральна цільова функція синтезу приймає вигляд

$$F_\omega = [\pm\omega; S_{ox}; K; Ш_{3П}] \subseteq R^n \quad (15)$$

Отже, шуканий варіант структури  $T_\omega$ , який задовольняє заданій  $F_\omega$ , має містити наступну сукупність основних вузлів: шпиндель, суміщений з шпинделем ротор двигуна з затискним пристроєм, опорні підшипникові вузли. Заданій сукупності ознак ставиться у відповідність генетична модель. Пред'явлених сукупності вимог до системи електроприводу, найбільшою мірою схильні батьківські хромосоми ЦЛ 0.2у і ЦЛ 2.0х. Результати синтезу на основі вказаних хромосом представлені у вигляді генетичної моделі (рис. 19).

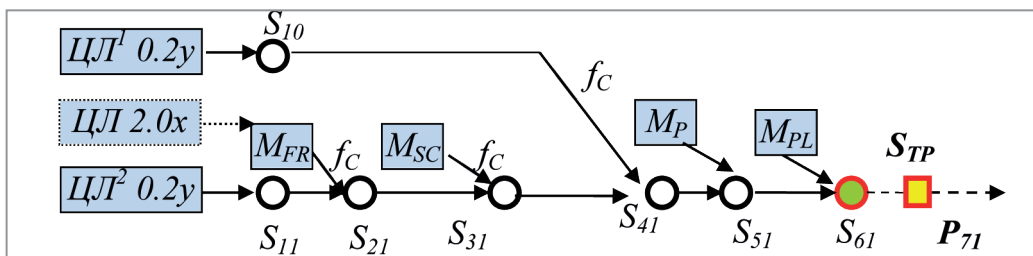


Рис. 19. Генетична модель синтезу структури ШВ, що містить 3М з електромеханічним ПрЗ за заданою функцією цілі FTP:  $f_c$  – оператор генетичного схрещування;  $S_{10}, S_{20}, \dots, S_{61}$  – синтезовані структури хромосом;  $S_{TP}$  – технічне рішення;  $P_{71}$  – популяція технічних рішень

Представлена на рис.19 модель, по суті, є графічним відображенням генетичної програми шуканого ЕМ-об'єкту, структура якого визначається суміщеною хромосомою шостого покоління  $S^{61}$  де: (ЦЛ<sup>1</sup> 0.2у) – генетичний код електродвигуна обертального руху шпинделя; (ЦЛ<sup>2</sup> 0.2у) – генетичний код

електродвигуна обертового руху приводу ЗМ; (ЦЛ2.0х) – генетичний код електромагнітного реле (привода включення фрикційної муфти);  $M_{SC}$  – механічна хромосома гвинтової передачі (screw);  $M_{FR}$  – механічна хромосома фрикційного з'єднання-муфти (friction);  $M_p$  – механічна хромосома плунжерів (plunger);  $M_{pl}$  – механічна хромосома втулки (plug).

Хромосомний набір моделі  $S_{10} - S_{61}$  визначає рівень генетичної складності і одночасно генетичну програму шуканої структури М-Ш. Наявність чотирьох вузлів схрещувань вказує на складну гібридну природу структури  $T_s$ .

## 10. Генетична модель ШВ ЗМ на модульному принципі з ЕМПрЗ

Розвиток конструкцій ШВ ЗМ при незмінності їх загальної структури може відбуватися шляхом розширення та удосконалення складу елементної бази. Одні й ті ж функціональні елементи можуть бути виконані на основі різних перетворювачів енергії: механічних, електричних, гідромеханічних, електромеханічних, їх комбінації тощо. Тобто, нові конструктивні рішення ШВ із ЗМ можна одержувати, комбінуючи його складовими елементами. Ці елементи можна розглядати, як окремі модулі, що встановлюються в ЗМ відповідно до необхідності забезпечення певних характеристик. Модульний принцип побудови ШВ з ЗМ може бути реалізованим шляхом виготовлення у вигляді модулів окремих підсистем, наприклад основних: мотор-шпиндель; ПрЗ; ЗП. Для зміни характеристик роботи ШВ з ЗМ можливе введення окремих додаткових модулів, що призначені для керування кінематичними ланцюгами, наприклад, електромагнітна з'єднувальна муфта.

Очевидно, що розширення або підвищення рівня універсальності модулів ШВ із ЗМ, дозволяє зменшити витрати на їх виготовлення, логістику та обслуговування при збереженні якості виробу, а також розширює можливості інших виробників для виготовлення аналогів.

Один з найбільш прогресивних варіантів ШВ сучасного фрезерного верстата є мотор-шпиндель з електромеханічним ЗМ, що може бути представлений різними варіантами суміщених і гібридних електромеханічних структур. Технічна реалізація такого рішення може бути втілена на основі модульного принципу – з набору спеціально виготовлених взаємозамінних модулів. Модульна структура побудови ШВ (рис. 20) може розглядатися як схема, що складається з модулів: М1 – корпус мотор-шпинделя; М2 – привод затиску; М3 – модуль затискного патрона, а також додаткового модуля з електромагнітною муфтою – М4.

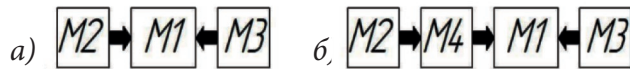


Рис. 20. Схема розміщення модулів в мотор-шпинделі:  
а – без додаткового модуля М4; б – з модулем М4.

Для підвищення ефективності застосування універсальних модулів доцільно передбачити «відкритість архітектури» ЗМ, що також сприяє підвищенню ефективності ремонту і дає більші можливості користувачам розробляти додаткові модулі (пристрої). Підвищення універсальності модулів ТС до «міжвидового» рівня дозволяє використовувати такі модулі різних видів (різного призначення), що сприяє зменшенню загальної номенклатури елементів ТС. Виходячи з поставленої мети, визначається цільова функція пошуку  $F_{TP}$  з урахуванням відповідної сукупності вимог та певних обмежень. Основні вимоги, що висувуються до шуканої структури  $S_{TP}$ , можуть бути сформульованими наступним чином: 1) простота та «відкритість архітектури» даної конструкції ( $C_S$ ); 2) модульний принцип будови ( $Mod$ ); 3) використання універсального електропривода ( $U_{ED}$ ); 4) циліндрична активна поверхня статора і ротора ( $CL_{1,2}$ );

5) забезпечення можливості повертання обойми затискного патрона автоматизовано від універсального електропривода ( $\omega_{AU}$ );

З урахуванням вимог, інтегральна функція пошуку в багатовимірному пошуковому просторі  $R^n$  має вигляду інтегрального вектора:

$$F_{TP} = [C_S; Mod; U_{ED}; CL_{1,2}; \omega_{AU}] \in R^n \quad (16)$$

Особливість методології генетичного синтезу полягає в тому, що пошукові процедури здійснюються на рівні елементарних електромагнітних структур (електромагнітних хромосом), що суттєво спрощує процедуру пошуку і гарантує повноту їх генетично допустимих варіантів<sup>22</sup>. Аналіз цільової функції  $F_{TP}$  показує, що шукана структура належить до класу складних суміщених електромеханічних систем. Однак, на рівні електромагнітних хромосом пошук генетично допустимих варіантів структур можна обмежити лише аналізом хромосомного набору в межах базових Видів ЦЛ 0.2у та ЦЛ 2.0х. Вимога  $Mod$  вимагає необхідність розгляду готових модулів, що разом з вимогами  $U_{ED}$  та  $C_S$  дозволяє у якості одного з найбільш простих варіантів електропривода розглянути можливість використання електростартера автомобільних двигунів, що вже містить систему введення в зачеплення зубчастої передачі. Заданій  $F_{TP}$  ставиться у відповідність наступна генетична модель (рис. 21), що відтворює траєкторію пошуку суміщеної електромеханічної структури, яка задовольняє вимогам  $F_{TP}$ . Критерієм завершення процедури

синтезу виступає ваговий коефіцієнт відповідності  $k^e$ , значення якого визначається відношенням інтегральної генетичної схильності  $P_C$  відповідної хромосоми до реалізації заданої інтегральної функції  $F_{TP}$ .

$$k_e = P_C / F_{TP} \leq 1 \quad (17)$$

Рівень генетичної складності суміщеної електромагнітної хромосоми, яка задовольняє заданій сукупності вимог, визначаємо за результатами генетичного аналізу (табл. 8).

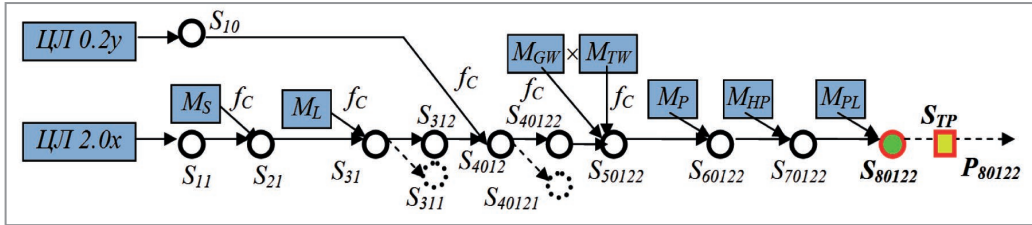


Рис. 21. Генетична модель синтезу структури 3М за заданою функцією цілі  $F_{TP}$ :  
 $f_c$  – оператор генетичного схрещування;  $S_{10}, S_{20}, \dots, S_{80122}$  – синтезовані структури хромосом;  $S_{TR}$  – технічне рішення;  $P_{80122}$  – популяція техрішень

Таблиця 8

### Результати генетичного аналізу моделі структуроутворення 3М

| Ел. магн. хромосома | Структурна формула хромосоми                                                                      | Статус хромосоми                               | $k_b$ |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------|
| 1                   | 2                                                                                                 | 3                                              | 4     |
| ЦЛ0.2у              | ЦЛ0.2у                                                                                            | Батьківська                                    | -     |
| $S_{10}$            | $(ЦЛ0.2у)_1; (ЦЛ0.2у)_2$                                                                          | Електромагнітна пара                           | -     |
| ЦЛ2.0х              | ЦЛ2.0х                                                                                            | Батьківська                                    | -     |
| $S_{11}$            | $(ЦЛ2.0х)_1; (ЦЛ2.0х)_2$                                                                          | Електромагнітна пара                           | -     |
| $S_{21}$            | $(ЦЛ2.0х)_1; (ЦЛ2.0х)_2 \times M_S$                                                               | Інформаційна                                   | -     |
| $S_{31}$            | $(ЦЛ2.0х)_1; (ЦЛ2.0х)_2 \times M_S \times M_L$                                                    | Інформаційна                                   | -     |
| $S_{311}$           | $(ЦЛ2.0х)_1; (ЦЛ2.0х)_2 \times M_S \times M_{L(\beta; OY, OZ)}$                                   | Ізомер, інформаційна ( $\beta \neq 90^\circ$ ) | -     |
| $S_{312}$           | $(ЦЛ2.0х)_1; (ЦЛ2.0х)_2 \times M_S \times M_{L(\beta; OX)}$                                       | Ізомер, породжувальна ( $\beta = 90^\circ$ )   | 0,2   |
| $S_{4012}$          | $[(ЦЛ0.2у)_1; (ЦЛ0.2у)_2] : [(ЦЛ2.0х)_1; (ЦЛ2.0х)_2 \times M_S \times M_{L(\beta; OX)}]$          | Інформаційна                                   | -     |
| $S_{40121}$         | $[(ЦЛ0.2у)_1; (ЦЛ0.2у)_2] : [(ЦЛ2.0х)_1; (ЦЛ2.0х)_2]_{OX, OY} \times M_S \times M_{L(\beta; OX)}$ | Ізомер, інформаційна                           | -     |
| $S_{40122}$         | $[(ЦЛ0.2у)_1; (ЦЛ0.2у)_2] : [(ЦЛ2.0х)_1; (ЦЛ2.0х)_2]_{OZ} \times M_S \times M_{L(\beta; OX)}$     | Ізомер, породжувальна                          | 0,3   |

Продовження табл. 8

| 1           | 2                                                                                                                                                            | 3             | 4   |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----|
| $S_{50122}$ | $[(ЦЛ0.2y)_1:(ЦЛ0.2y)_2]:[(ЦЛ2.0x)_1:(ЦЛ2.0x)_2]_{oz} \times M_S \times M_{L\beta OX}] \times [M_{GW} \times M_{TW}]$                                        | Породжувальна | 0,4 |
| $S_{60122}$ | $[(ЦЛ0.2y)_1:(ЦЛ0.2y)_2]:[(ЦЛ2.0x)_1:(ЦЛ2.0x)_2]_{oz} \times M_S \times M_{L\beta OX}] \times [M_{GW} \times M_{TW}] \times M_P$                             | Породжувальна | 0,5 |
| $S_{70122}$ | $[(ЦЛ0.2y)_1:(ЦЛ0.2y)_2]:[(ЦЛ2.0x)_1:(ЦЛ2.0x)_2]_{oz} \times M_S \times M_{L\beta OX}] \times [M_{GW} \times M_{TW}] \times M_P \times M_{HP}$               | Породжувальна | 0,7 |
| $S_{80122}$ | $[(ЦЛ0.2y)_1:(ЦЛ0.2y)_2]:[(ЦЛ2.0x)_1:(ЦЛ2.0x)_2]_{oz} \times M_S \times M_{L\beta OX}] \times [M_{GW} \times M_{TW}] \times M_P \times M_{HP} \times M_{Pl}$ | Породжувальна | 1,0 |

Отже, заданій цільовій функції пошуку задовольняє генетично модифікована парна хромосома S80122. Рівень її генетичної складності, а також відповідної популяції технічних рішень P80122, визначається наступною структурною формулою:

$$[(ЦЛ0.2y)_1:(ЦЛ0.2y)_2]:[(ЦЛ2.0x)_1:(ЦЛ2.0x)_2]_{oz} \times M_S \times M_{L\beta OX}] \times [M_{GW} \times M_{TW}] \times M_P \times M_{HP} \times M_{Pl}, \quad (18)$$

де:  $(ЦЛ0.2y)_1$  – генетичний код первинного джерела електромагнітного поля двигуна обертового руху;  $(ЦЛ0.2y)_2$  – генетичний код вторинного джерела електромагнітного поля двигуна обертового руху;  $(ЦЛ0.2y)_1:(ЦЛ0.2y)_2$  – парна електромагнітна хромосома двигуна обертового руху;  $(ЦЛ2.0x)_1$  – генетичний код первинного джерела електромагнітного поля електромагнітного реле;  $(ЦЛ2.0x)_2$  – генетичний код вторинного джерела електромагнітного поля електромагнітного реле;  $(ЦЛ2.0x)_1:(ЦЛ2.0x)_2$  – парна електромагнітна хромосома електромагнітного реле;  $M_S$  – механічна хромосома пружини (spring);  $M_L$  – механічна хромосома важеля (lever);  $M_{GW}$  – механічна хромосома шестерні (gear wheel);  $M_{TW}$  – механічна хромосома зубчатого колеса (tooth wheel);  $M_P$  – механічна хромосома плунжерів (plunger);  $M_{HP}$  – механічна хромосома рідкого середовища (гідропластмаса) (hydro-plastic);  $M_{Pl}$  – механічна хромосома втулки (plug).

У запропонованій схемі ЗМ перетворення силового потоку відбувається в трьох різних середовищах: *EMF* (electromagnetic field) – електромагнітні поля, що діють безпосередньо або в складі електромеханічних систем передачі та перетворення; *MSB* (mechanical solid body) – механічні передачі й перетворювачі за допомогою твердих тіл; *LFM* (liquid flowing medium) – рідинно-плинні та в'язкі середовища для передачі та перетворення параметрів силового потоку. На об'єктному рівні структура такого ЗМ записана наступним чином:

$$EMF(EP - EME - M_{a1}) \times MSB(M_{a1} - GR - M_{a2} - (SP - F_{r1}) \times k) \times LFM(F_{r1} - PL - F_{r2}) \quad (19)$$

де  $k=3$  – кількість однакових перетворюючих елементів. Простота та «відкритість архітектури» даної конструкції сприяє спрощенню виготовлення, обслуговування та ремонту ЗМ.

#### 11. Синтез шпindelних вузлів з електрогідравлічними ПрЗ для верстатів традиційного компоновання і з механізмами паралельної кінематики

ПрЗ, у яких зміна характеристик силових потоків відбувається, в тому числі за рахунок дії рідких та плинних середовищ (*LFM*), володіють рядом особливостей (простота конструкції, можливість отримання великих значень коефіцієнта підсилення і т.д.). Окремі переваги дає замкнутість гідравлічної системи з гідро пластом (або подібним середовищем), що робить непотрібним використання додаткової гідростанції, що сприяє здешевленню конструкції.

Опис конструкцій ШВ з електрогідравлічними ПрЗ також може здійснюватися на основі генетичної інформації. У електрогідравлічних ПрЗ в якості джерела енергії використовується електромагнітне поле  $E$ , момент якого  $M_{a0}$  перетворюється в осьове переміщення через гвинтовий перетворювач  $SC$ , (рис. 22), а далі зусилля  $F_{a1}$  передається до цангового (клинового) патрона через тиск рідини *LFM* (liquid flowing medium) для затиску фрези з циліндричним хвостовиком  $CL$ . Запис ЗМ у вигляді генетичної (морфологічної) форми силового потоку на популяційному рівні має наступний вигляд:

$$E - M_{a0} - SC - F_{a1} - LFM - F_{a1} \cdot K_{\Pi} - WD - F_{r2} - CL \quad (20)$$

Формулі (20) відповідає схема ЗМ за патентом України №80481.

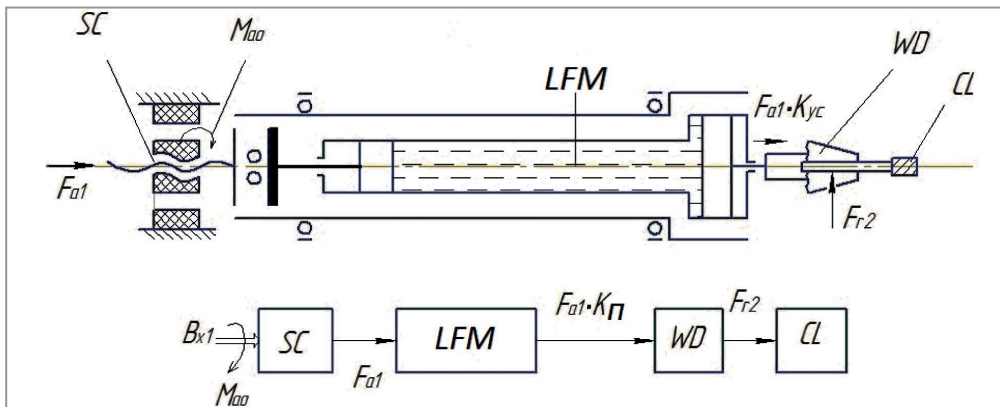


Рис. 22. Принципова (а) і структурна (б) схеми електрогідромеханічного ЗМ з цанговим ЗП і одним силовим потоком

Для роботи у складі сучасних верстатів свердильно-фрезерної групи (рис. 23) доцільно використовувати ШВ, що містить мотор-шпиндель, ЗМ з електромеханічним ПрЗ та додаткову систему для переміщення ШВ вздовж осі обертання відносно корпусу верстата під час обробки. Завдяки рухомому в осьовому напрямку з'єднанню корпусу ШВ та корпусу верстата і наявності механізму їх взаємного автоматичного переміщення збільшується кількість варіантів забезпечення руху формоутворення – подачі без переміщення робочого стола або рухомої платформи верстата, що сприяє розширенню його технологічних можливостей. Механізм, що забезпечує такі переміщення ШВ відносно корпусу верстата в автоматизованому режимі, може бути виконаний у вигляді гвинтової передачі або передачі типу «рейка-шестерня» з приводом обертальної дії та у вигляді електричного або гідравлічного привода поступальної дії.

Виходячи з вимог використання в межах одного вузла перетворювачів енергії одного виду може бути змодельований ШВ з механізмом переміщення відносно корпусу верстата на основі осесиметричних структур з електроприводом. Переміщення шпинделя вздовж осі обертання забезпечує можливість отримання руху формоутворення  $S$  в автоматизованому режимі роботи ШВ.

Запропонована для верстата з паралельною кінематикою (рис. 23) електромеханічна система є гібридною і містить у собі три підсистеми, що забезпечують: обертання шпинделя, затиск об'єкта, автоматизоване переміщення ОЗ вздовж осі обертання. Кожен із цих ланцюгів на хромосомному рівні описується батьківськими хромосомами, що складаються з наступного набору генів: 1) обертання шпинделя  $M_{a1} - M_{a2}$ ; 2) затиск об'єкта  $M_{a1} - F_{r2}$ ; 3) автоматизоване переміщення об'єкта закріплення вздовж осі обертання  $M_{a1} - F_{a2}$ . На популяційному рівні кожен з цих ланцюгів описується наступними формулами:

$$\begin{aligned} 1) & (M_{a0}^1 - ME^1 - M_{a1}^1 - SF - M_{a2}^1); \\ 2) & (M_{a0}^2 - ME^2 - M_{a1}^2 - SC^2 - F_{a1}^2 - PL - F_{a2}^2 - WD - F_{r2}^2); \\ 3) & (M_{a0}^3 - ME^3 - M_{a1}^3 - SC^3 - F_{a1}^3). \end{aligned} \quad (21)$$

Електромеханічну систему у вигляді запропонованого ШВ (рис. 23) на популяційному рівні можна описати наступним чином:

$$\begin{aligned} & (M_{a0}^1 - ME^1 - M_{a1}^1 - SF) \text{ — } \bigotimes \bigotimes \text{ — } WD - (M_{a2}^1 + F_{r2}^2 + F_{a1}^3) \\ & (M_{a0}^2 - ME^2 - M_{a1}^2 - SC^2 - F_{a1}^2 - PL - F_{a2}^2) \text{ — } \bigotimes \bigotimes \text{ — } \\ & (M_{a0}^3 - ME^3 - M_{a1}^3 - SC^3) \text{ — } \bigotimes \bigotimes \text{ — } \end{aligned} \quad (22)$$

де шпindel ь описано як перетворювач типу «вал» (shaft) з позначенням  $SF$ , що передає обертальний момент, а вхідне зусилля у вигляді електромагнітного моменту  $M_{a0}$ , що взаємодіє з магнітним елементом  $ME$  ротора двигуна.

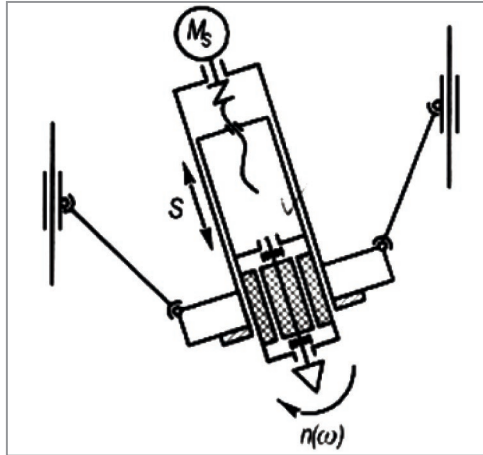


Рис.23. Приклади застосування автоматичного мотор-шпинделя в верстаті з МПС при кутовому положенні рухомої платформи

## 12. Конструкції розроблених та виготовлених затискних механізмів з електромеханічним приводом

Створення дослідного зразка ЕМПрЗ близьким за конструкцією до патенту України 95353 має на меті продемонструвати можливість використання механізмів такої структури (принципу дії), зокрема, для установки на існуючі шпиндельні вузли при їх модернізації.

Очевидним є те, що значний вплив на характеристика таких ЕМПрЗ має тип електродвигуна. Для виготовлення дослідного зразка обрано найбільш поширений, простий та дешевий тип електродвигуна – асинхронний трифазний серії 4А. При тому існують інші типи спеціалізованих електродвигунів, що можуть бути застосовані в ЕМПрЗ, а один з найбільш перспективних – моментний двигун. Конструкція дослідного зразка ЕМПрЗ (рис. 24) розроблена для можливості встановлення на шпindel ь верстата мод. 1Б240-6.

Робота ЕМПрЗ (рис. 24) відбувається наступним чином. Під час затиску при подачі струму до обмоток статора 5 на роторі 4 виникає крутний момент, що спричиняє появу осьового зусилля у різьбовому з'єднанні втулок 2 та 3 і рух втулки 3 відносно шпинделя 1 вліво. Осьове зусилля втулки 3 передається до труби затиску 11 через нагвинчену гайку 9, упорний підшипник 8 та втулку 7.

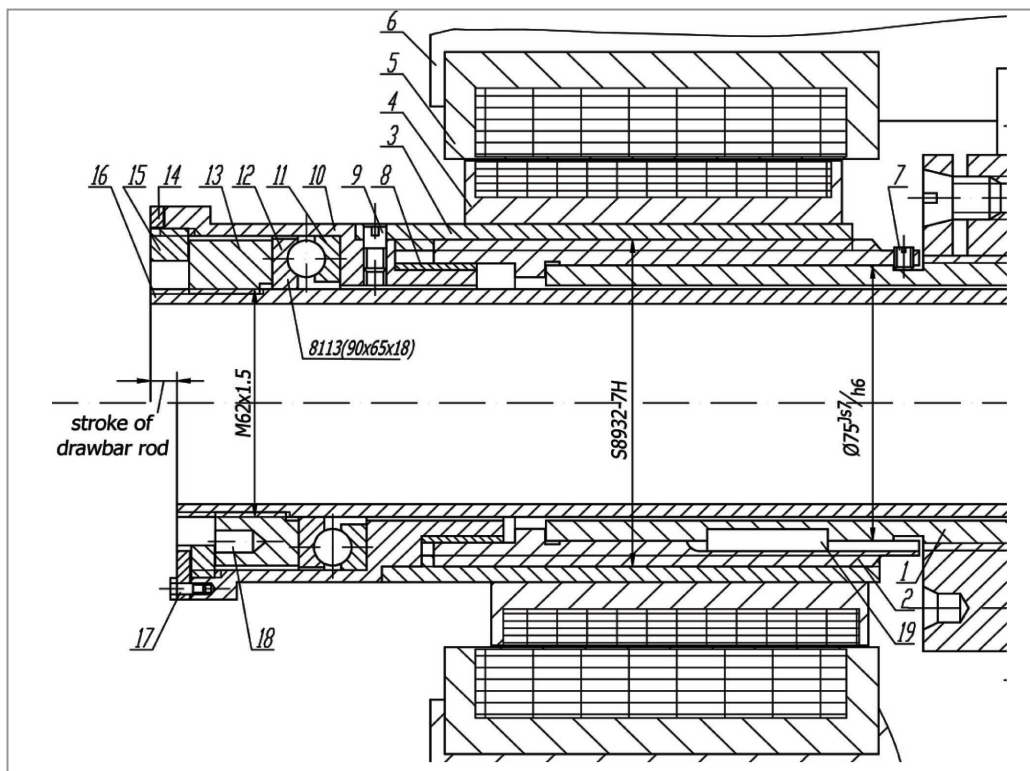


Рис. 24. Повздовжній переріз ЕМПрЗ за патентом України 95323

Під час розтиску до обмоток статора 5 подається струм з відповідними характеристиками, що спричиняє рух втулки 3 вправо (рис. 24). Зусилля, що виникає на втулці 3, передається через гвинти 13 до втулки 7 і гайки 10, що розташована на її різьбовій поверхні. Від гайки 10 осьове зусилля для розтиску передається до труби затиску 11 через гайку 9. При цьому напрям навивки різі гайок 9 та 10 протилежний до напрямку навивки різі на втулці 3, що сприяє усуненню проблеми саморозгвинчування гайок 9 та 10 при передачі зусилля від втулки 3. Для усунення випадкового розгвинчування з'єднання труби затиску 11 з цангою (на рис. не показано) від обертального моменту, що створюється силами тертя під час взаємного обертання кілець підшипника 8, напрям навивки різі у з'єднанні труби затиску 11 з цангою повинен бути протилежним до напрямку навивки різі на втулці 2.

Однією з переваг даного ЕМПрЗ є те, що процес затиску продовжується до моменту досягнення необхідного зусилля затиску, яке залежить лише від параметрів струму, що подається на обмотки статора 5 і є стабільним, тобто не залежить від величини відхилення радіальних розмірів оброблюваного прутка. Обертально-поступальний рух ротора 4 (процес затиску)

припиняється самовільно у разі досягнення необхідного зусилля затиску і, як наслідок, зростання зусилля, що протидіє його осьовому переміщенню. Момент закінчення процесу затиску (зупинки ротора) може бути ідентифіковано за характеристиками струму в обмотках статора 5. Після закінчення процесу затиску підведення струму до обмоток статора 5 припиняється. Підтримка зусилля затиску відбувається за рахунок самозагальмовування в різьбовому з'єднанні ротора 4 і втулки 3. Це сприяє економії енергії та забезпечує надійність утримання заготовки в разі аварійної втрати живлення. Дана конструкція ЕМПрЗ передбачає можливість корегування величини зусилля затиску під час обертання шпинделя.

Електрична система керування ЕМПрЗ розширює можливості його використання для модернізації існуючих ТА в ході комплексної модернізації верстата, і зокрема, його системи керування. Основними елементами, на базі яких будується система керування ЕМПрЗ, є датчики частоти обертання шпинделя і ротора, датчик положення елементів механізму, регулятор частоти обертання ротора. Узгодження роботи ЕМПрЗ з циклом обробки можливе при використанні найбільш простих контролерів, наприклад Arduino uno.

Виготовлений ЕМПрЗ змонтовано на задньому кінці шпинделя ТА (рис. 25, а) після демонтажу механічного ПрЗ. При застосуванні ЕМПрЗ перетворення характеристик руху, що необхідний для затягування цанги, відбувається за участі лише однієї механічної передачі типу «гвинт-гайка». Дана передача виконана у вигляді двох різьбових втулок (рис. 25, б), одна з яких (із зовнішньою різьбовою поверхнею) розташовується на шпинделі, а інша (з внутрішньою різьбовою поверхнею) встановлена в роторі електродвигуна. Профіль витка ходової різьби передачі має трапецієвидну форму. Різьбові поверхні втулок проходили процес притирання. Інші елементи ЕМПрЗ (рис. 25, в) призначені для регулювання механізму та передачі необхідного осьового зусилля на трубу затиску.

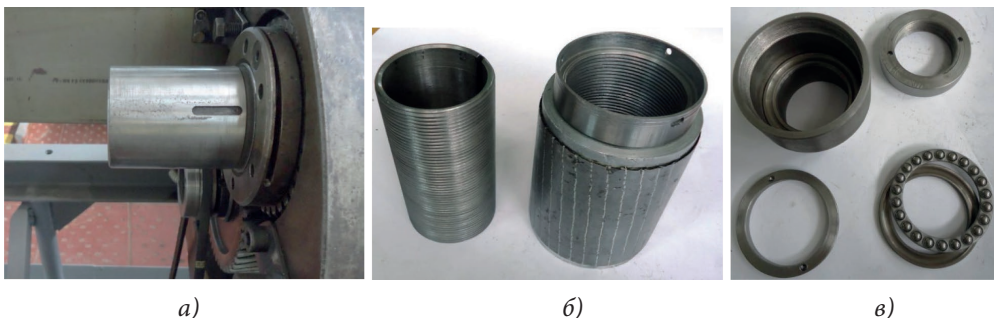


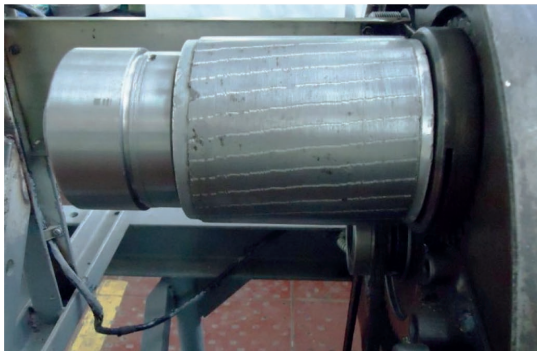
Рис. 25. Задній кінець шпинделя автомата (а); елементи гвинтової передачі ЕМПрЗ (б); елементи вузла регулювання ЕМПрЗ (в)

Оскільки ПрЗ конструктивно розташований на шпинделі, він впливає на його динамічні характеристики. Попередню оцінку впливу зміни конструкції ПрЗ на динамічні характеристики шпиндельного вузла можна провести на основі порівняння геометрично-масових параметрів рухомих частин ПрЗ та ЕМПрЗ (рис. 26), що представлені в табл. 9. Оскільки габарити та вага рухомих частин ЕМПрЗ не більші ніж ПрЗ можна припустити, що встановлення ЕМПрЗ не призведе до погіршення динамічних характеристик шпиндельного вузла. При цьому, конструкція ЕМПрЗ містить значно меншу кількість рухомих елементів, що можуть змінювати своє положення в пристрої (внаслідок спрацювання та появи зазорів). Це полегшує та сприяє більш якісному балансуванню шпиндельного вузла.

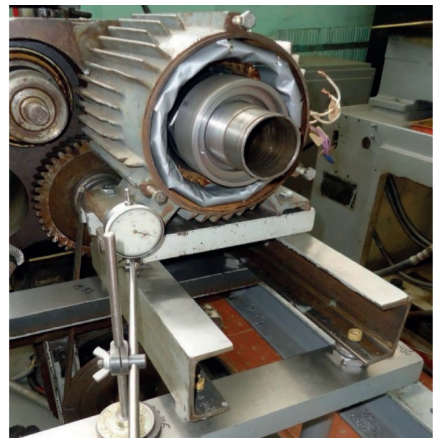
Таблиця 9

**Порівняння геометрично-масових параметрів  
рухомих (обертових) частин механічного ПрЗ мод. 1Б240  
та ЕМПрЗ за патентом України 95323**

|                        | ПрЗ мод. 1Б240 | ЕМПрЗ   |
|------------------------|----------------|---------|
| Приблизні габарити, мм | 290×155        | 210×120 |
| Вага, кг               | 18,3           | 7,9     |



а)



б)

Рис. 26. ЕМПрЗ: а) обертова частина (без статора); б) загальний вигляд

Монтаж та налаштування ЕМПрЗ даної конструкції дещо ускладнений через необхідність дотриманням повітряного зазору між ротором та статором електродвигуна, величина якого становить близько 0,3 мм. Імовірно збільшення повітряного зазору між ротором та статором шляхом зміни їх

розмірів призводить до погіршення характеристик двигуна. Тому, доцільним є розробка механізмів для ефективного регулювання взаємного положення ротора та статора електродвигуна ЕМПрЗ.

В ЗМ шпиндельного вузла (рис. 27) встановлено додаткові елементи, що забезпечують роз'єднання кінематичного зв'язку привода затиску з іншою частиною затискного механізму. Це дозволяє досягнути технічний результат – покращення динамічних характеристик ШВ та підвищення продуктивності і якості обробки.

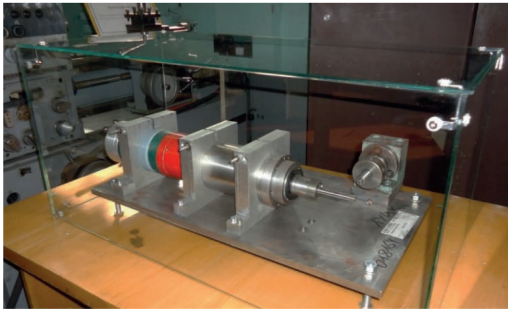
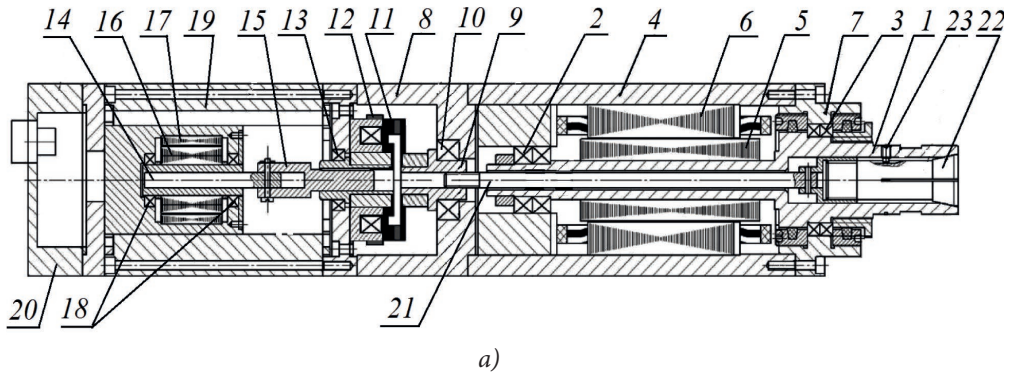


Рис. 27. Шпиндельний вузол верстата з електромеханічним затиском та можливістю роз'єднання кінематичного зв'язку в ЕМПрЗ з а патентом України № 116050: а) поздовжній переріз;

б) зовнішній вигляд; в) дослідний стенд для пуско-налагоджувальних робіт ШВ

ШВ містить привод головного руху, що складається зі шпинделя 1 на опорах 2 і 3 у вигляді радіально-упорних шарикопідшипників, що встановлені в корпус 4. На шпинделі 1 розташований ротор 5 головного руху, а в корпусі 4 статор 6, між якими, при подачі електричного струму на обмотки статора 6, виникає електромагнітна взаємодія у вигляді крутного моменту. Передній кінець корпусу 4 закритий фланцем 7. Поза задньою опорою 2 шпинделя 1 розташовано модуль-фланець 8 з електромеханічною муфтою, в якому розміщена гайка-вал 9 півмуфти 11 на опорі 10 у вигляді

радіально-упорного підшипника. Інша півмуфта 12 розташована на опорі 13, що також встановлена в модуль-фланеці 8 і має можливість силової взаємодії з валом 14 привода затиску з'єднувальну ланку 15. При цьому, вал 14 з розташованим на ньому ротором 16 розміщений на опорах 18 в додатковому корпусі 19, що виконаний у формі модуля з торцевим фланцевим кріпленням до модуль-фланця 8.

### 13. Розрахунок та дослідження параметрів структурних елементів ЕМПp3

Для проведення розрахунку приймаємо максимальне вихідне осьове зусилля, що повинен розвивати Пр3,  $S=20$  кН, різьба гвинтової передачі "ротор-шпиндель" – самогальмівна упорна з середнім діаметром  $d_2=85$  мм і кроком  $p=2$  мм. З метою зменшення зносу гвинтової передачі доцільно обрати матеріал внутрішньої різьбової поверхні (у роторі) – чавун, а зовнішньої (на шпинделі) – сталь.

*Перевірка (визначення) параметрів різьбового з'єднання.* Перевіримо діаметр різьби за умовою зносостійкості –  $d_2 \geq \sqrt{S} (\pi \cdot \psi_H \cdot \psi_h \cdot [\sigma_{CM}])$ , де  $[\sigma_{CM}] = 4 \dots 6$  МПа – допустимі значення напруження зминання для обраних матеріалів;  $\psi_h = 0,75$  – коефіцієнт висоти упорної різьби;  $\psi_H = 1,2$  – коефіцієнт довжини (висоти гайки) внутрішньої різьбової поверхні ротора.

$$\sqrt{20000} / (\pi \cdot 1,2 \cdot 0,75 \cdot 5) \approx 38 \text{ мм} < 85 \text{ мм}$$

Отже, зносостійкість забезпечена більше ніж з двократним запасом, що дозволяє використати менш міцні й легкі матеріали для виготовлення внутрішньої частини ротора з різьбовою поверхнею. Мінімальна довжина різьбового з'єднання (довжина ділянки з різьбовою поверхнею в роторі), що необхідна для забезпечення розрахованої величини зносостійкості,  $H = \psi_H \cdot d_2 = 1,2 \cdot 38 \approx 46$  мм.

Величину кроку різьби обираємо також виходячи з умови дотримання самогальмування –  $\psi < \phi_p$ , де  $\psi$  – кут підйому витка різьби;  $\phi_p$  – кут тертя в різьбі. Для змащених, відшліфованих і припрацьованих (ходовий гвинт) поверхонь різьби, коефіцієнт тертя приймаємо  $f_p = 0,07$ . Приведений коефіцієнт тертя у гвинтовій передачі, що враховує вплив кута профілю різьби визначається з формули  $f_{np} = f_p / \cos \gamma_p$ , де для упорної різьби  $\gamma_p = 3^\circ$  – кут нахилу лінії профілю різьби відносно перпендикуляра осі циліндричної поверхні (шпинделя). Зважаючи на малість значення в опорній різьбі кута  $\gamma_p$  ( $\cos \gamma_p = 0,999$ ), приймаємо, що  $f_{np} = f_p$ , якому відповідає кут тертя  $\phi_p = \arctg f \approx 4^\circ$ . Кут підйому витка різьби  $\psi = \arctg [p / (\pi \cdot d_2)] = \arctg [2 / (\pi \cdot 85)] \approx 0,43^\circ$ . Та-

ким чином, при обраному кроці різьби забезпечується великий запас ( $0,43^\circ < \alpha < 4^\circ$ ) самогальмування у різьбовому з'єднанні, що необхідно для запобігання відгвинчуванню (розтиску деталі) у разі дії змінних навантажень, вібрацій та появи радіальних пружних деформацій.

*Розрахунок силових характеристик ПрЗ.* Осьова сила  $S$ , яка передається на ротор від труби затиску, врівноважується реакцією шпинделя. Для проведення розрахунку гвинтової передачі умовно замінюємо сили, що діють на поверхню витків різі зосередженою силою, нормальною до лінії профілю різьби, і, зважаючи на малість кута  $\gamma_p$ , вважаємо співвісною з  $S$ . Тангенціальна сила, яку необхідно прикласти до ротора на радіусі  $d_2/2$  для отримання відповідної величини вихідного зусилля  $S$ , визначається з  $F_t = S \cdot \tan(\psi + \phi_p)$ , а обертовий момент –  $T_p = 0,5 d_2 F_t$ . Таким чином,  $T_p = 0,5 \cdot d_2 \cdot S \cdot \tan(\psi + \phi_p) = 0,5 \cdot 0,085 \cdot 20000 \cdot \tan 4,43^\circ = 66 \text{ нм}$ . В такий спосіб з попереднього виразу отримуємо вираз для знаходження вихідної сили електро-механічного привода затиску  $S$ .

$$S = T_p / 0,5 \cdot d_2 \cdot \tan(\psi + \phi_p) \quad (23)$$

Для визначення зусиль, що діють в ЗМ в складі якого використовується електро-механічний привід складена розрахункова схема (рис. 28).

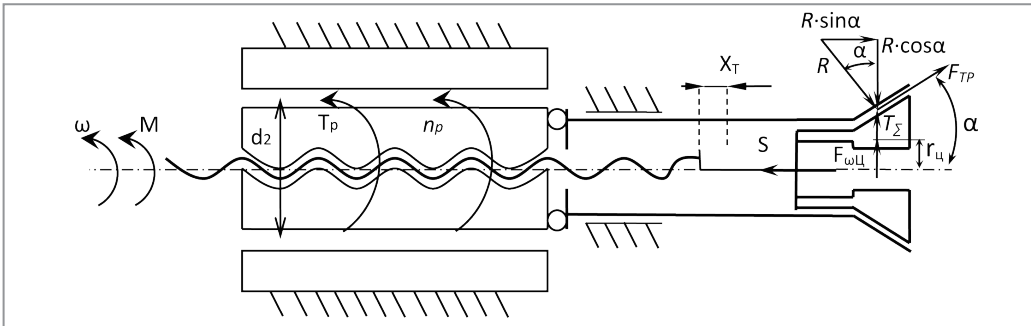


Рис. 28 Розрахункова схема ЗМ з ЕМПрЗ (рис. 24)

Відповідно до розрахункової схеми (рис. 28) дослідимо передачу сил у цанговому затискному патроні. Для спрощення розрахунків прийнемо наступні припущення: затяжна цанга без упора (заготовка в процесі затиску робить теж осьове переміщення що і сама цанга, тобто відсутня сила тертя у контакті заготовки і губок цанги); при малих величинах розведення цанги силами пружності пелюсток можна знехтувати. Взявши до уваги вищевикладені припущення, складаємо рівняння рівноваги сил, які діють на цангу у площинах:

$$\text{горизонтальний} \quad - F_1 \cdot \cos \alpha + R \cdot \sin \alpha - S = 0; \quad (24)$$

$$\text{вертикальний} \quad - F_1 \cdot \sin \alpha - R \cdot \cos \alpha + T_{\Sigma\alpha} + F_{\omega\alpha} = 0, \quad (25)$$

де  $T_{\Sigma\Omega}$  – сумарна радіальна сила затиску заготовки механізмом затиску з цанговим патроном;  $R$  – нормальна реакція що, діє з боку шпинделя на конус цанги;  $F_I$  – сила тертя на затискному конусі цанги;  $\alpha$  – половина кута конуса цанги;  $F_{\omega\Omega}$  – відцентрова сила інерції, що діє на пелюстки цангового патрона під час його обертання навколо своєї осі. Врахувавши, що  $F_{\omega\Omega} = m_u \cdot \omega^2 \cdot r_u$ ;  $F_I = R \cdot f$  а  $f = \operatorname{tg} \phi$  виражаємо з (3)  $R$  і підставляємо в (2).

$$S = (T_{\Sigma\Omega} + m_u \cdot \omega^2 \cdot r_u) \cdot \frac{\sin \alpha + \operatorname{tg} \phi \cdot \cos \alpha}{\cos \alpha - \operatorname{tg} \phi \cdot \sin \alpha},$$

де  $m_u$  – маса пелюсток цанги;  $r_u$  – відстань від осі обертання шпинделя до центра ваги пелюстки цанги;  $f$  – коефіцієнт тертя.

Після перетворень попереднього виразу отримуємо залежність, що описує передачу сил у цанговому патроні з врахуванням дії відцентрової сили:

$$S = (T_{\Sigma\Omega} + m_u \cdot \omega^2 \cdot r_u) \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \phi), \quad (26)$$

Після підстановки виразу (4) в (1) отримуємо вираз для визначення зусилля затиску в ЗМ з електромеханічним приводом при врахуванні дії відцентрових сил пелюсток цанги.  $T_{\Sigma\Omega} = (T_p / 0,5 \cdot d_2 \cdot \operatorname{tg}(\psi + \phi_p) \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \phi)) - m_u \cdot \omega^2 \cdot r_u$ .

Залежність зусилля затиску заготовки в ЗМ з ЕМПРЗ (рис. 24) від частоти обертання шпинделя та моменту на роторі ПрЗ представлено на графіках рис. 28. При побудові графіків залежності (рис. 29) розглянутих характеристик механізму затиску були прийняті наступні значення геометричних та масових параметрів цього механізму:  $m_u = 1,28 \text{ кг}$ ;  $r_u = 0,028 \text{ м}$ ;  $d_2 = 85 \text{ мм}$ ;  $\phi \approx 5^\circ$ ;  $\phi_p \approx 4^\circ$ ;  $\psi \approx 0,43$ .

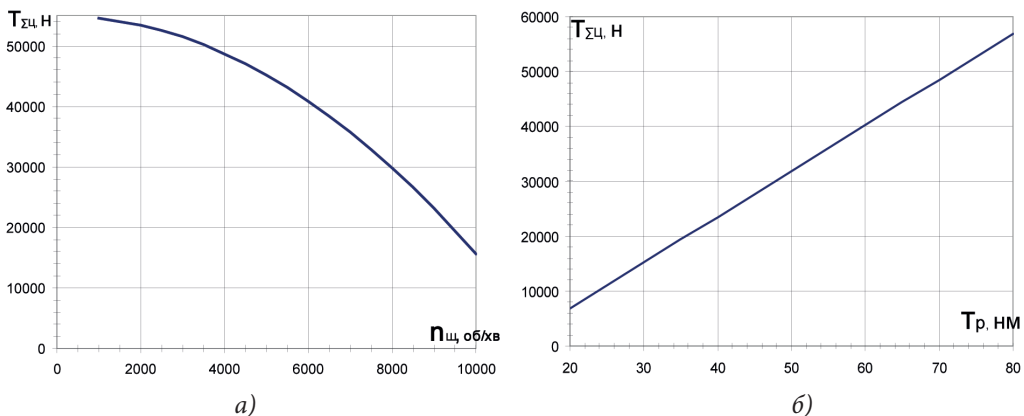


Рис. 29. Залежність сумарного зусилля затиску заготовки в ЗМ з ЕМПРЗ (рис. 24) від:  
а) частоти обертання шпинделя  $n$  при обертальному моменті ротора  $T_r = 66 \text{ Нм}$ ;  
б) обертального моменту  $T_r$ , що утворюється на роторі при частоті обертання шпинделя  $n = 5000 \text{ об/хв}$ .

### *Розрахунок окремих характеристик електропривода ПрЗ*

В якості прототипу електродвигуна для використання в запропонованому ПрЗ обираємо найбільш поширений трифазний асинхронний двигун змінного струму з короткозамкнутим ротором серії 4А. Початковими даними для розрахунку є величина крутного моменту на роторі електродвигуна ( $T_p=66\text{нм}$ ), що необхідна для досягнення потрібного вихідного зусилля ПрЗ ( $S=20000\text{н}$ ), і максимальна частота обертання ротора біля 6000 об./хв.

Особливостями роботи електродвигуна у складі ПрЗ є:

- 1) пуск двигуна проходить при стартовій частоті обертання ротора, що рівна частоті обертання шпинделя, – приймаємо, що затиск в багатошпindelному токарному автоматі відбувається на частоті 5000 об./хв;
- 2) повторно-короткочасний режим роботи – двигун вмикається лише на період затиску чи розтиску (близько 1с);
- 3) примусове обертання ротора електродвигуна після його вимикання.

Наведений нижче розрахунок характеристик електродвигуна обмежується визначенням його головних розмірів та параметрів, необхідних для їх визначення. В разі необхідності, визначити інші параметри електродвигуна можна відповідно до загальної методики розрахунку асинхронних трифазних електродвигунів змінного струму з короткозамкнутим ротором.

Однією з головних умов, яку беруть до уваги під час розрахунку (вибору) потужності приводного електродвигуна, є те, що нагрів електродвигуна не повинен перевищувати допустимий для певного класу ізоляції, що застосована у його обмотках. Інтенсивне нагрівання електродвигуна відбувається під час протікання в його обмотках струму, величина якого більша за номінальне значення. Це виникає, коли частота обертання ротора значно менша від частоти обертання магнітного поля статора (синхронної частоти) через те, що гальмівний (навантажувальний) момент, прикладений до вала електродвигуна, є більшим за номінальне значення моменту обертання, який розвиває двигун. Найбільша різниця між фактичною і синхронною частотами обертання електродвигуна (найбільше ковзання) і, як наслідок, найбільш інтенсивний нагрів його активних частин спостерігаються у момент запуску, коли частота ротора рівна або майже рівна нулю. Величина пускового струму значно перевищує номінальні значення і майже досягає величини струму короткого замикання. Увімкнення двигуна, що працює в складі запропонованого ПрЗ, відбувається при частоті обертання ротора (5000 об./хв.), яка лише на 17 % менша за синхронну частоту електродвигуна (6000 об./хв.). В таких умовах пуск електродвигуна не супроводжується звичним інтенсивним нагрівом.

Відношення максимального обертового моменту, що може розвинути електродвигун, до його номінального значення називають перевантажувальною здатністю двигуна. Для сучасних двигунів перевантажувальна здатність має значення в межах 2...3 рази. Згідно з рекомендаціями короткочасна робота електродвигуна в межах перевантажувальної здатності є цілком допустимою та обмежується величиною нагріву його активних частин (властивостями ізоляційних матеріалів), тобто тривалістю перевантаження й умовами охолодження.

Двигун у складі ПрЗ працює в повторно-короткочасному режимі, а орієнтовне відношення тривалості роботи (затиск або розтиск – біля 1с) до паузи (тривалість обробки деталі – біля 60 с) є величиною дуже малою (0,017), тому в таких умовах двигун можна нормально експлуатувати в межах перевантажувальної здатності. Крім того, умови охолодження даного двигуна компенсують нагрів, що виникає при перевантаженні, оскільки після роботи двигун вимикається, причому обертання його ротора продовжується примусово (разом зі шпинделем), що забезпечує охолодження за рахунок розгону повітря зубчатою поверхнею ротора.

Зважаючи на все вищевикладене, приймаємо можливість роботи електродвигуна в складі ПрЗ у повторно-короткочасному режимі при мінімальному перевантаженні в 2 рази. Отже, подальший розрахунок параметрів електродвигуна проводимо виходячи з умови забезпечення номінального моменту при роботі в довготривалому режимі  $M_1 = 35$  нм.

Номінальна механічна потужність електродвигуна визначається з формули  $P_1 = 0,1046 \cdot M_1 \cdot n_1$ , де для даного випадку  $M_1 = 35$  нм – номінальний крутний момент електродвигуна;  $n_1 = n_p - n_{\text{ш}} = 6000 - 5000 = 1000$  об./хв – відносна частота обертання ротора електродвигуна для забезпечення якої споживається енергія, де  $n_p$  – частота обертання ротора,  $n_{\text{ш}}$  – частота обертання шпинделя.

$$P_1 = 0,1046 \cdot M_1 \cdot n_1 = 0,1046 \cdot 35 \cdot 1000 \approx 3,7 \text{ кВт.}$$

Число пар полюсів електродвигуна визначається зі співвідношення

$$p_1 = \frac{60 f_1}{n_p} = \frac{60 \cdot 200}{6000} = 2,$$

де  $f_1 = 200$  Гц – частота струму живлення електродвигуна.

Відповідно до потужності електродвигуна і кількості пар полюсів з ГОСТ 13267-73 визначаються висота осі обертання стандартного електродвигуна  $h=90$  мм і відповідний їй зовнішній діаметр статора  $D_A=149$  мм. Отримані дані є нормалізованими для серії асинхронних машин 4А.

Для подальшого розрахунку приймаємо більший зовнішній діаметр статора  $D_A = 160$  мм, зважаючи на те, що:

- розміри шпindelного барабана БТА дозволяють вмістити статор із зовнішнім діаметром до 160 мм;

- для даного двигуна узгодження розмірів (для уніфікації елементів в межах серії та стандартизації приєднувальних розмірів) з нормалізованим рядом значень для серії 4А є необов'язковим, оскільки зовнішній діаметр залежить від конструктивного і технологічного виконання електродвигуна та не є визначальним в електромагнітному розрахунку;

- при збільшенні зовнішнього діаметра статора зменшуються електромагнітні навантаження, які визначають нагрів активних частин двигуна [4].

Внутрішній діаметр статора  $D = K_D \cdot D_A = 0,68 \cdot 160 \approx 110$  мм, де  $K_D = 0,68$  – коефіцієнт, що обирається відповідно до кількості пар полюсів. Полюсне ділення  $\tau = \pi D / 2 p_1 = 3,14 \cdot 110 / 2 \cdot 2 = 86$  мм.

Довжина повітряного зазору між статором і ротором (довжина ротора) пов'язана розмірним відношенням з внутрішнім діаметром статора, яке визначає економічні характеристики електродвигуна та умови охолодження. Тому відношення  $\lambda = l_g / \tau$  повинно знаходитися в рекомендованих межах і для даного випадку приймаємо  $\lambda = 0,8$ . Таким чином, довжина ротора (повітряного зазору між статором і ротором)  $l_g = \lambda \cdot \tau = 0,8 \cdot 86 \approx 70$  мм, що достатньо для розміщення внутрішньої різьбової поверхні довжиною 46 мм.

Запропонована методика розрахунку характеристик електродвигуна, що працює в ПрЗ, має у своїй основі загальну методику розрахунку асинхронних трифазних електродвигунів. Зважаючи на особливості роботи й конструкції даного електродвигуна (перераховані на початку розрахунку), що обумовлені його призначенням (робота в складі ПрЗ), представлена методика потребує адаптації (фахового доопрацювання) з метою більш повного врахування цих особливостей для більш якісного і зручного визначення оптимальних параметрів такого електродвигуна.

Даний електропривод призначений для роботи в динамічних режимах, тому його ротор доцільно виготовляти за технологіями, що дозволяють зменшити момент інерції, подібно як у слідкуючих електроприводах та механізмах циклічної дії. Затиск і розтиск у запропонованому ПрЗ відбувається під час роботи електродвигуна в рушійному і гальмівному режимах, що спричиняють рух ротора відносно шпинделя. Під час роботи двигуна в рушійному режимі частота обертання ротора перевищує частоту обертання шпинделя, у гальмівному – навпаки. Прийнята, для прикладу, орієнтовна різниця між частотами обертання

шпинделя і ротора під час роботи електродвигуна в обох режимах 1000 об./хв забезпечує переміщення ротора по різьбовій поверхні шпинделя на відстань 10 мм протягом менше ніж 0,3 с.

Для загальмовування ротора можна використовувати будь-який вид гальмування, що застосовується в асинхронних електродвигунах: рекуперативне генераторне, динамічне, противключенням, конденсаторне. Рекомендованим у цьому випадку є рекуперативне генераторне гальмування. Даний вид гальмування виникає, коли частота обертання ротора перевищує синхронну частоту електродвигуна. Здійснити таке гальмування в такому випадку можна змінюючи синхронну частоту двигуна (зміна кількості пар полюсів, частоти струму живлення). Перевагою цього методу є визначеність (сталість) частоти обертання ротора, якої він прагне досягнути в результаті гальмування – синхронна частота двигуна. Крім того, механічна потужність, що подається на ротор двигуна, перетворюється в електромагнітну і віддається в мережу живлення. Механічна характеристика двигуна у цьому режимі гальмування ідентична (з врахуванням кутової симетрії) характеристиці двигуна в рушійному режимі. Проте максимальний момент в режимі рекуперативного гальмування є дещо вищим, ніж максимальний момент в рушійному режимі, що пояснюється втратами на опір в статорі, які в рушійному режимі призводять до зменшення моменту на валу, а в генераторному – до додаткового використання (споживання) зовнішнього рушійного моменту, тобто загальмовування.

Представлена у роботі методика розрахунку характеристик електро-механічних приводів затиску сприяє створенню ЗМ нового покоління з оптимальними характеристиками для заданих умов роботи технологічного обладнання.

#### 14. Передумови автоматизації пошукового проєктування ЕМПрЗ

Виявлення принципів організації системних зв'язків між структурами, що утворюють множину існуючих конструкцій ПрЗ, дає можливість виявити закони появи та розвитку всієї їх різноманітності. Це дає підстави для автоматизації створення ПрЗ на основі багаторівневого морфологічного синтезу і положень теорії еволюційного синтезу систем шляхом виявлення передумов автоматизації структурного та схемного синтезу конструкцій перспективних ПрЗ з використанням банку даних, що містить інформацію у вигляді буквено-цифрових кодів для опису структур.

Принцип еволюційного синтезу структур та схем ПрЗ, з подальшою оптимізацією кращих варіантів, пропонується здійснювати на основі їх представлення у вигляді буквено-цифрових кодів (БЦК), що становлять банк даних інформації про складові елементи ПрЗ описані на основі генетико-морфологічного підходу. Для оцінки доцільності використання певних елементів у нових структурах ПрЗ варто розробити матрицю (матриця інцидентності), що відображає степінь доцільності їх взаємодії в складі узагальненого ПрЗ або ЗМ. Для можливості прикладного використання наявних методик проведено комплекс робіт з систематизації та розробки пакета прикладних програм розрахунку та оптимізації параметрів ЕМПрЗ для заданих умов роботи.

Вид вхідного та вихідного зусиль ПрЗ формує опис структури його силового потоку на об'єктному і наступному рівнях складності структури з нарощуванням генетичної інформації для ПрЗ певного виду, як системи. Класифікація елементарних структур силових потоків ПрЗ, що представлено у вигляді Породжувальної системи для даного виду механізмів, має властивості, що створюють передумови для автоматизації пошукового проектування ПрЗ.

Основні класифікаційні властивості Породжувальної системи пояснюються відповідністю вимогам теорії класифікації й підтверджують її наукову обґрунтованість:

- відкритість – класифікація є «відкритою» відносно ПрЗ не відомих на даний час;
- повнота – скінченність та неперервності інформації про множину структур;
- узгодженість – можливість визначення структур при частковому визначенні інших;
- однозначність – положення кожної структури визначене однозначно (конкретне місце), що гарантує відсутність структур з нечіткими ознаками;
- економічність – конструкція класифікації визначається на основі мінімально можливої сукупності базових ознак (вид зусилля) та правил.

Зазначені властивості Породжувальної системи створюють передумови для розробки засобів автоматизації пошукового проектування і генетичного передбачення структур ПрЗ, в тому числі шляхом створення генетичного банку даних. Також, Породжувальна система володіє іншими властивостями, що сприяють розробці нових конструкцій ПрЗ: можна розглядати як засіб організації теоретичних досліджень у сфері синтезу ПрЗ, що зумовлено можливістю перенесення знань, приналежних до певної групи

об'єктів, у межах теорії, на інші об'єкти технічних систем цієї групи; може виступати як один з способів представлення теорії створення ПрЗ шляхом виявлення їх не реалізованих структур, забезпечуючи її наочність, логічність та достовірність.

Вид вхідного та вихідного зусиль ПрЗ формує опис структури його силового потоку на хромосомному рівні і є Породжувальною системою для ПрЗ певного виду. Так, наприклад, для токарних автоматів та верстатів з ЧПК при їх модернізації з представленої Породжувальної системи можна виділити чотири можливі класи структур ПрЗ (без врахування напрямку дії зусиль): а) з вхідною та вихідною осьюовою силою ( $Fa_0 - Fa_1$ ); б) з вхідною осьюовою силою та крутним вихідним моментом ( $Fa_0 - Ma_1$ ); в) з вхідним крутним моментом та осьюовою вихідною силою ( $Ma_0 - Fa_1$ ); г) з вхідним та вихідним крутним моментом ( $Ma_0 - Ma_1$ ).

У даній роботі пропонується здійснювати структурний та схемний синтез ПрЗ з подальшою оптимізацією кращих варіантів на основі представлення у вигляді буквено-цифрових кодів (БЦК), що відповідно до сформованого генетичного банку даних описують елементи ПрЗ та зв'язки між ними, як окремого класу систем, що мають власну структуру та еволюціонують відповідно до генетичної програми. Приклади опису ПрЗ на різних рівнях складності структури з використанням БЦК (структурно генетичних формул).

Розвиток теорії проектування ТС передбачає реалізацію функцій структурного передбачення і розробку алгоритмів спрямованого синтезу їх структур<sup>25</sup>. Спрямований синтез нових структурних різновидів ПрЗ певного класу здійснюється на основі аналізу вже відомих різновидів шляхом побудови моделей їх мікро- та макроеволюції. Задачі мікроеволюції мають прикладний характер, а задачі макроеволюції мають рівень фундаментальних досліджень.

Задачами мікроеволюції є пошук, створення та удосконалення конкретних ПрЗ (створення нових структурних різновидів як ЕМПрЗ), а макроеволюції – пошук закономірностей розвитку над видових класів даних технічних систем, розробка узагальнених генетичних моделей, створення інформаційних баз даних, побудова загальної систематики ЕМ. Задачі мікроеволюції мають прикладний характер, а задачі макроеволюції мають рівень фундаментальних досліджень. Макро- і мікроеволюція – це два взаємопов'язаних процеси, які здійснюються під безпосереднім впливом люд-

25 Shynkarenko V. Genetic Foresight in Science and Technology: from Genetic Code to innovative Project. 10th Anniversary International scientific Conference «Unitech' 10». 19-20 November 2010. Gabrovo, Bulgaria. Vol. II. pages 297–302.

ського фактора. Тому моделі еволюції виступають методологічною основою для пізнання закономірностей структурної організації і розвитку

Постановка та розв'язання задач спрямованого пошуку і генерації структур з використанням моделей мікроеволюції систем типу ПрЗ становлять основу генетичного синтезу ЕМПрЗ<sup>26</sup>. Методологія розв'язання таких класів задач заснована на використанні генетичних алгоритмів (ГА), що ґрунтується на можливості спрямованої (в заданому просторі ознак) генерації інваріантної частини структур з використанням генетичної інформації породжувальних структур (елементів породжувальної системи) та обмеженої кількості правил їх композиції (генетичних та геометричних операторів синтезу).

Задачі структурного синтезу ТС належать до категорії складних задач пошукового характеру, постановка яких відбувається за умови відсутності чіткої вхідної інформації. Традиційно розв'язання задач такого типу пов'язане з евристичними методами пошуку або професійною інтуїцією дослідника. Послідовність пошукових процедур в технології генетичного проектування складних ТС і, в тому числі ПрЗ охоплює сукупність взаємопов'язаних етапів і пошукових процедур з визначення і аналізу генетичних програм, структурного передбачення та вибору домінуючого виду, написання структурних формул та ін.<sup>27</sup>

Ідентифікація генетичного коду ПрЗ потребує реалізації процедур, що пов'язані з: виявленням вихідної інформації, наприклад, інформації про просторову форму силових потоків; визначенням суттєвих ознак механізму, що можуть бути описані з використанням генетичного підходу; визначення складових генетичного коду на підставі аналізу суттєвих ознак досліджуваного об'єкта та ін.

Визначення таксономічних ознак відомих структурних представників досліджуваного функціонального класу ПрЗ (визначення їх Видової приналежності) здійснюється на підставі наявності однозначного зв'язку між структурою генетичних кодів та ознаками систематичних одиниць Вид та Рід<sup>28</sup>. Ідентифікувавши генетичний код реального ПрЗ (ЕМПрЗ) та проаналізувавши його структуру, можна отримати інформацію про його генетично зумовлені властивості та однозначно визначити системну приналежність такого об'єкта до Виду та Роду.

26 Шинкаренко В.Ф. (2002). Основи теорії еволюцій електромеханічних систем. К. : Наукова думка. 288 с.

27 I.F.S. Alrefo, Joaquim A.G. Hamuyela, Kuznetsov Iu.N. (2015) Genetic And Morphological Approach for Description And Synthesis of Gripping Devices of Robots and Manipulators // Journal of the Technical University of Gabrovo, Vol. 49'. pp. 8–10.

28 Шинкаренко В.Ф. (2002). Основи теорії еволюцій електромеханічних систем. К. : Наукова думка. 288 с.

Ідентифікація генетичних операторів синтезу здійснюється шляхом дослідження просторової композиції складових виявлених представників механізмів даного класу та встановлення відповідності оператора з певним структурним перетворенням<sup>29</sup>.

На підставі порівняльного аналізу визначених генетичних кодів відомих представників ПрЗ (ЕМПрЗ) визначається домінуючий Вид досліджуваного класу, яким вважається Вид, до складу якого входить найбільша кількість структурних представників.

За результатами інформаційного пошуку та генетичного аналізу створюється інформаційна база даних (БД), структура якої в хронологічній послідовності має містити наступну інформацію (рис. 30):

- 1) загальні відомості про джерело інформації (№ патенту, країна-заявник, назва, автор; для книг, або статей – автор, назва, де і коли опублікована);
- 2) дату пріоритету патенту;
- 3) цільову функцію нововведення;
- 4) перелік суттєвих ознак, що забезпечують реалізацію нововведення;
- 5) структурні ознаки, що визначають генетичну інформацію;
- 6) генетичний код породжувальної структури;
- 7) генетичний оператор синтезу.

Отже, для проведення процедур пошукового проектування використовуються результати аналізу генетичної інформації стосовно відомих різновидів ПрЗ досліджуваного класу, що виявлені за результатами патентно-інформаційних досліджень. В результаті інформаційних досліджень відбувається упорядкування виявлених в межах даного класу представників ПрЗ на підставі їх генетичних ознак.

Для побудови моделей мікроеволюції ПрЗ<sup>30</sup> необхідним є проведення патентно-інформаційних досліджень, що дає можливість виявити інформацію про прототипи (представники певного класу ПрЗ, як носії генетичної інформації), які відносяться до одного виду ПрЗ, і їх кількість.

Результати патентно-інформаційних досліджень дають можливість створення бази даних (БД). Така БД по ПрЗ є основою для створення САПР ПрЗ за структурно-генетичними формулами та генетичного банку даних (ГБД). Відповідно вище викладених міркувань, створена БД (рис. 30), що наразі включає в себе понад дві сотні конструкцій ПрЗ із можливістю авто-

29 Shynkarenko V. Genetic Foresight in Science and Technology: from Genetic Code to innovative Project. 10th Anniversary International scientific Conference «Unitech' 10». 19-20 November 2010. Gabrovo, Bulgaria. Vol. II. pp. 297–302.

30 Шинкаренко В.Ф. (2002). Основи теорії еволюцій електромеханічних систем. К. : Наукова думка. 288 с.

матичної вибірки (сортунання) інформації. Даний варіант БД є початковим і може поповнюватися новими конструкціями.

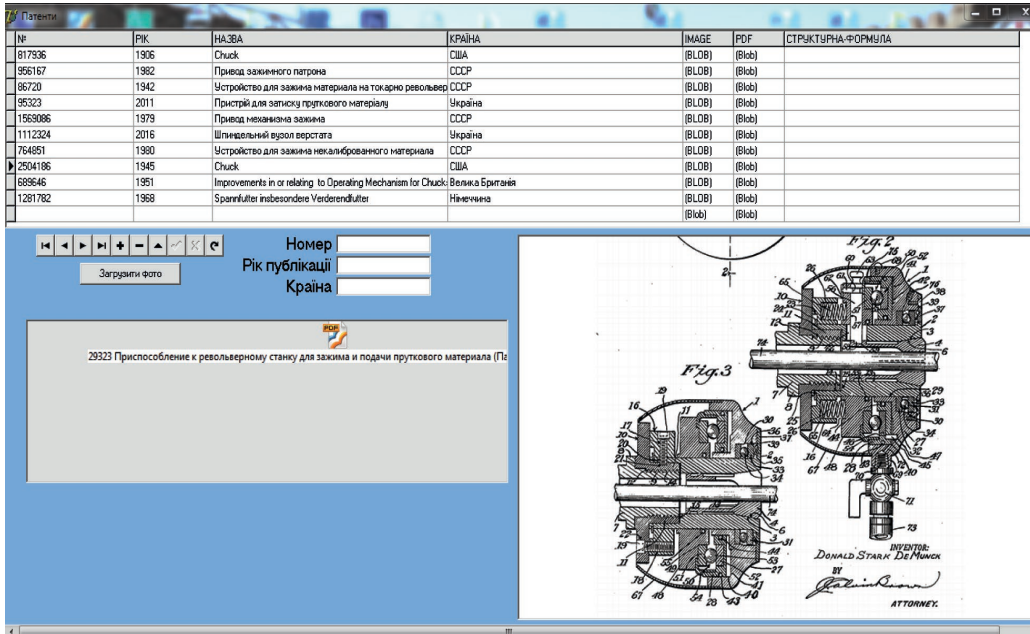


Рис. 30. Інтерфейс бази даних ПрЗ

Інформаційний пошук здійснюється за заданим видом ПрЗ – об’єктом дослідження. Основними джерелами інформації є: авторські свідоцтва та патенти; інформаційні огляди; наукові статті; матеріали конференцій; дисертації. Мета патентно-інформаційного пошуку для ПрЗ – визначення об’єктів досліджуваного класу ПрЗ, їх структурної різноманітності, часу еволюції, напрямів.

За отриманими інформаційними даними, з використанням методології генетичного аналізу<sup>19</sup> визначаються генетичні коди та таксономічні ознаки відомих структурних представників ПрЗ досліджуваного класу. Якщо генетичний аналіз в межах деякого класу ПрЗ здійснено вперше, то за результатами синтезу може бути створений ГБД, який містить систематизовану інформацію про генетично допустиму різноманітність досліджуваного класу структур ПрЗ з вказанням інформації про його видову різноманітність, структурно-функціональної адаптації й удосконалення.

Кожен запис БД (рис. 31) здійснюється у рядку та описує одну конструкцію ПрЗ. На даному етапі розробки БД кожен її запис містить поля, що відображають інформацію у наступному текстовому вигляді: номер патенту, рік публікації, назва патенту, країна публікації та структурна фор-

мула (морфологічна, генетична або комбінована). Також передбачені поля (IMAGE, PDF), вміст яких не зчитується користувачем безпосередньо, а забезпечує відображення графічної інформації в окремих вікнах програми. У полі «структурна формула» вносяться відомості, що отримані в результаті аналізу інформації про структуру конкретного ПрЗ. Це дає змогу об'єднати ПрЗ певних конструкції за їх генетичними ознаками. Зазначена кількість полів відображає найбільш простий та затребуваний варіант структури цієї БД. Кількість полів кожного запису може корегуватися відповідно до специфіки використання БД. Наприклад, доцільним може бути додання поля, що забезпечує прямий доступ до документа, що містить повний опис об'єкта, якого стосується запис. При виділенні запису (рядка) БД, що відповідає певному ПрЗ, у відповідному вікні програми з'являється один з варіантів графічного відображення його конструкції, що був обраний при наповненні БД. Це підвищує ефективність роботи з БД.

| №       | РІК  | НАЗВА                                                        | КРАЇНА          | IMAGE  | PDF   | СТРУКТУРНА-ФОРМУЛА |
|---------|------|--------------------------------------------------------------|-----------------|--------|-------|--------------------|
| 917936  | 1906 | Чук.                                                         | США             | (BLOB) | (Bib) |                    |
| 956167  | 1982 | Привод замикаючого патрона                                   | СРСР            | (BLOB) | (Bib) |                    |
| 96720   | 1942 | Устройство для зажима материала на токарно-револьвер         | СРСР            | (BLOB) | (Bib) |                    |
| 95323   | 2011 | Пристрій для затиску пружного матеріалу                      | Україна         | (BLOB) | (Bib) |                    |
| 1563086 | 1979 | Привод механічного замика                                    | СРСР            | (BLOB) | (Bib) |                    |
| 1112324 | 2016 | Шпиндельний вузол верстата                                   | Україна         | (BLOB) | (Bib) |                    |
| 764951  | 1980 | Устройство для зажима некалиброванного материала             | СРСР            | (BLOB) | (Bib) |                    |
| 2504186 | 1945 | Чук.                                                         | США             | (BLOB) | (Bib) |                    |
| 689646  | 1951 | Improvements in or relating to Operating Mechanism for Chuck | Велика Британія | (BLOB) | (Bib) |                    |
| 1281782 | 1968 | Spannhalter insbesondere Verdrehhalter                       | Німеччина       | (BLOB) | (Bib) |                    |

Рис. 31. Структура записів БД

## 15. Передумов САПР ЕМПрЗ за структурно-генетичними формулами

За допомогою моделей мікроеволюції відтворюються процеси структуроутворення, удосконалення і функціональної адаптації існуючих ЕМПрЗ (інформаційних представників) в межах конкретного виду<sup>18</sup>. Такі моделі, що ґрунтуються на основі генетичної інформації дають можливість передбачення нових структурних популяцій ЕМПрЗ. Вихідною інформацією для побудови моделей мікро- та макроеволюції, які, своєю чергою, використовуються для спрямованого синтезу нових структурних різновидів класу, є результати генетичного аналізу відомих різновидів електромеханічних систем типу ЕМПрЗ. В основі такого генетичного аналізу є патентно-інформаційні дослідження та аналіз генетичної інформації стосовно відомих різновидів ЕМПрЗ, що виявлені за результатами інформаційного пошуку. В результаті пошуку визначаються існуючі об'єкти, що належать

до досліджуваного класу, їх структурна різноманітність та спрямованість їх структурно-функціональної адаптації та удосконалення у часі. Відповідно до прийнятих способів опису генетичної інформації структур ЕМПрЗ та методології її аналізу визначаються генетичні коди і таксономічні ознаки відомих представників ЕМПрЗ, що дає можливість їх ідентифікації. За результатами ідентифікації генетичного коду створюється інформаційна база даних існуючих систем типу ЕМПрЗ.

Результати ідентифікації генетичної інформації системи типу ЕМПрЗ дають можливість визначити загальний час еволюції об'єктів певного класу ЕМПрЗ, породжувальний об'єкт (структуру) даного класу, основні напрями і тенденції структурно-функціональної адаптації об'єктів даного класу, що визначає узагальнену цільову функцію. Це також дає можливість аналізу ефективності інновацій на різних етапах розвитку і дозволяє виявити алгоритми генетичного синтезу ЕМПрЗ з покращеними характеристиками, що визначають успішність їх експлуатації. База даних патентного пошуку дозволяє виявити таксономічну (рід, вид) належність досліджуваних груп ПрЗ з точки зору базової класифікації, цільові функції та конструктивні особливості за якими відрізняються групи ПрЗ одного виду, прототипи, що відносяться до одного роду та виду і переважають в отриманій за результатами патентного пошуку базі даних.

За результатами попередньої оцінки конструкцій ЗМ, що містяться у сформованій базі даних (рис. 31), можна виділити тенденції розвитку ПрЗ:

- забезпечення стабільності зусиль затиску заготовки;
- спрощення конструкції.

Тому, вдосконалення ПрЗ у ході їх розвитку відбувалося шляхом розв'язання задач, що пов'язані з вибором відповідних схем замикання силових потоків в ПрЗ та ЗП, ефективних способів підведення енергії для роботи ЗМ, забезпечення можливості ефективного регулювання величини зусилля затиску.

Використання моделей макроеволюції найбільш доцільно при виконанні системних досліджень, особливо для тих для класів ЕМПрЗ, видовий склад яких ще не відомий. Моделі макроеволюції в таких випадках (за наявністю обмеженої вихідної інформації (відомого принципу дії, опису однієї з ЕМ-структур довільного виду) дозволяють автоматизувати пошукові процедури. Це дозволяє здійснювати не тільки упорядкування розрізнених відомостей щодо відомих видів систем, але й прогнозувати появу нових видів, з можливістю отримання повної, систематизованої інформації відносно видового різноманіття ЕМПрЗ в межах конкретного таксономічного

класу<sup>31</sup>. Тобто за допомогою моделей макроеволюції можна здійснювати спрямований пошук породжувальних структур ЕМПрЗ, неявних видів, які ще не відомі на даному етапі технічної еволюції.

Якщо генетичний аналіз в межах деякого класу ЕМПрЗ здійснено вперше, то за результатами синтезу створюється генетичний банк даних (ГБД), який містить систематизовану інформацію про генетично допустиму різноманітність досліджуваного класу структур. Задачі створення генетичного банку даних для досліджуваного класу ЕМПрЗ вирішуються для створення інформаційного потенціалу, що складає системну основу для багатоцільового використання при розв'язанні прикладних задач інноваційного характеру.

Генетичний банк даних містить інформацію як про структури відомих видів, так і потенційно можливих, ще відсутніх на даному етапі еволюції. Інформація ГБД складає основу для інформаційного забезпечення пошукових проектних процедур, створення конструкторських баз даних, розробки оригінальних технічних рішень.

Задачі генетичного та еволюційного синтезу пов'язані з проведенням ряду послідовних процесів, що пов'язані аналізом, перетворенням та поданням відповідних масивів інформації (графічно, генетичної, геометричної та ін.). Візуалізація даної інформації дозволяє отримати кінцевий результат синтезу – структуру механізму, що відображена у просторі. Тому, візуалізація структур набуває особливого значення у методології синтезу, оскільки від засобів візуалізації залежать результати розв'язання задачі синтезу та правильність прийняття остаточних рішень, що здійснюються інженером (оператором процесу). Вплив графічного образу на інтуїцію людини стимулює появу нових ідей та гіпотез. Представлення структур ЕМПрЗ за допомогою графічних образів володіє рядом переваг, що пов'язані з наочністю, лаконічністю, інформаційною місткістю та придатністю до швидкого сприйняття великої кількості інформації. Це пояснює доцільність створення бази даних, що містить генетичну інформацію про структури механізмів (на різних рівнях складності опису структур), опис геометричних перетворень та їх графічне відображення.

Розроблено комп'ютерну програму (рис. 32), що дозволяє автоматизувати побудову графічного відображення структури ПрЗ за структурною формулою. Дана версія програмного продукту є його найбільш простим базовим варіантом і спрямована на роботу з структурами механічних ПрЗ. На рис. 32 продемонстровано відображення структури ПрЗ з геометрич-

31 Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. (2015). Генетичні формули опису і структурні схеми самоналагоджувальних приводів затиску. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем, 36. Краматорськ. С. 150–153.

ним замиканням у послідовності зліва направо (підведення вхідного зусилля відбувається з лівого краю структури) та у розгорнутому в один рядок виді. Запис структурної формули відбувається у роздільному вигляді, тобто, коли здійснюється опис кожного перетворювача характеристик руху окремо із зазначенням виду вхідного та вихідного зусилля.

Процес побудови структури відбувається шляхом запису елементів структурної формули в різних місцях поля запису, що відповідним чином відзначається на схемі структури при однаковій структурній формулі. Також передбачена можливість внесення елементів структурної формули зі зміною напрямку запису, що відображається шляхом постановки дужки перед її елементом. Це дозволяє в ряді випадків наблизити вигляд структури до того виду у якому її зазвичай зображає людина.

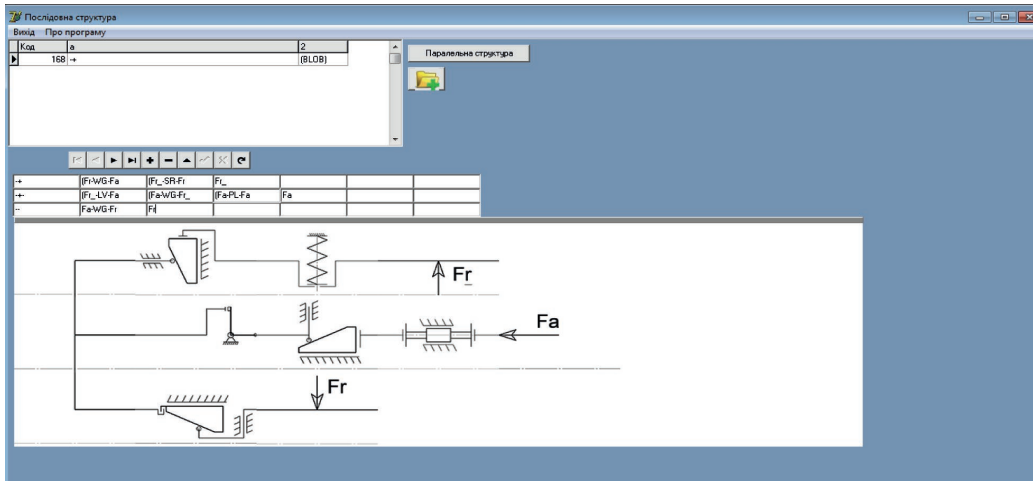


Рис. 32. Інтерфейс програми для відображення структури ПрЗ за структурними формулами

На рис. 32 запис ЗМ з самоналагоджувальним клиновим ПрЗ. Така форма внесення структурної формули в дану програму передбачає появу додаткової інформації про розташування елементів формули (на різних рівнях), що впливає на вигляд структури.

### Висновки та рекомендації

1. Породжувальна система ЗМ (табл. 3) уявляє універсальну основу для дослідження принципів структуроутворення як механічних, так і електромагнітних підсистем ЗМ.
2. Представлені передумови генетично-морфологічного синтезу ЗМ є основою для створення алгоритму спрямованого пошуку їх нових видів

шляхом виявлення не реалізованих «просторових композицій» силових потоків. Структуру ЗМ довільного рівня утворюється шляхом підвищення деталізації опису при збереженні інформації попередніх рівнів.

3. Рекомендовано описані погляди і підходи використовувати не тільки для ЕМПрЗ, але інших ТС, що дозволить суттєво зменшити час і витрати на пошук і створення нових ТС.

4. Представлена у роботі методика розрахунку характеристик електро-механічних приводів затиску сприяє створенню ЗМ нового покоління з оптимальними характеристиками для заданих умов роботи технологічного обладнання.

5. Генетико-морфологічний підхід сприяє пошуку нових класів ЕМ-систем, які дозволяють у верстатах позбавитися від механічних передач і перейти до передачі руху завдяки електромагнітному полю. Зокрема це стосується багатшпиндельних верстатів, багатопозиційних шпиндельних головок, револьверних головок з інструментами, що обертаються.

6. Вперше здійснено постановку задачі структурного передбачення потенційно нових варіантів ЕМ-структур, які задовольняються сукупності вимог зі створення суміщеної гібридної електромеханічної системи типу «Мотор-шпиндель».

7. Вперше визначено область існування класу складних електромеханічних систем типу «мотор-шпиндель», яка представлена 16-ма породжувальними джерелами поля, зосередженими в межах чотирьох симетричних груп (0.0, 0.2, 2.0, 2.2) та чотирьох геометричних класів (ЦЛ, КН, ТП, ТЦ) Генетичної класифікації.

8. Синтезовані ЕМ-системи доведені до патентоспроможного рішення, які захищені патентами на корисну модель України.

9. Морфологічні моделі дозволяють систематизувати досить великий обсяг знань про морфологію в компактному вигляді, дають можливість формалізувати процес упорядкування множини варіантів, розміщених в моделі. Якість морфологічної моделі багато в чому визначає остаточний результат пошуку розв'язання проблеми. Розробка морфологічних моделей є початковим етапом морфологічних досліджень – морфологічним аналізом, метою якого є класифікації досліджуваного об'єкта або множини об'єктів.