

УДК 621.9.06

Ю.М. Кузнецов, Д.О. Дмитрієв, В.Б. Фіранський, О.О. Степаненко

## РЕАЛІЗАЦІЯ КОНЦЕПЦІЇ КАРКАСНИХ КОМПОНОВОК ВЕРСТАТІВ З МЕХАНІЗМАМИ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

This paper presents study samples of operating machines with the mechanisms of parallel structures built on the principles of the concept of machine frame layouts. We bring into light our basic ideas of implementing technical solutions according to the requirements of new metal-working equipment in light of modern trends in machine tools, such as multivariate, frame structure of the carrier system, hybridity, symmetrical layout, modular structure of the layout, and visual computer modeling of create layouts creation. Finally, we illustrate examples of forming a set of frame configurations depending on functional features.

### Вступ

Широкі дослідження механізмів паралельної структури (МПС) почалися в 60-х рр. минулого століття з вивчення суто кінематичних властивостей структур з кількома замкненими ланцюгами, що працюють одночасно. В цих дослідженнях насамперед розв'язувались теоретичні питання синтезу широкого класу просторових механізмів; визначення функції, що зв'язує положення вхідних і вихідних ланок та їх особливих "мертвих" положень; визначення надлишкових кінематичних зв'язків; аналітичні розв'язки для прямої і зворотної задач кінематики; визначення робочого простору. Підвищені маніпуляційні властивості МПС визначили наступний етап їх розвитку – застосування в робототехнічних системах. МПС стали застосовуватися для операцій контролю, зварювання, як координатно-вимірвальні машини, пристрої, що виконують розвантажувально-завантажувальні роботи.

З 80-х рр. розширюються межі застосування МПС. Їх починають вводити у склад металообробного обладнання для виготовлення складнопрофільних деталей [1]. Перші випробування стосуються верстатів-гексаподів, що побудовані на основі класичної платформи Стюарта.

Існуючі методики синтезу кінематичних схем МПС не дають змоги однозначно вибрати його кінематичну схему, тому що одні і ті ж переміщення вихідної ланки можуть бути виконані з використанням різних кінематичних схем [2, 3]. Оскільки в МПС кінематичні ланцюги, що з'єднують основу з вихідною ланкою, працюють паралельно, то залежно від розташування на основі їх початкових ланок припустимі переміщення в кожному кінематичному ланцюгу. Крім того, можуть бути різними і ти-

пи з'єднань. Тому синтез технологічного обладнання, побудованого на базі мехатронних систем з використанням МПС, має бути узгоджений з конкретними виробничими задачами [4].

### Постановка задачі

Метою статті є описання та аналіз концепції каркасних компонок верстатів, зокрема на прикладі розроблених і побудованих авторами макетах і діючих моделях верстатів з МПС. Задача полягає в удосконаленні та розширенні компонок верстатів з МПС, що можливо за рахунок використання каркасних та оболонкових конструкцій, побудованих як відповідно до конкретних технологічних вимог, так і з використанням уніфікованих вузлів та компонентів. Це досягається тим, що до осей несучого каркасу вмонтовані механізми поступового руху повзунів і точки їх перетину в компоновці верстату розміщені таким чином, щоб утворювати просторовий багатогранний каркас, а кількість штанг і напрямних, змонтованих на ребрах каркасу, може бути збільшена до необхідної кількості приводів, що дає можливість досягти збільшення функціональності виконавчого органу (ВО) з відносним зниженням масо-габаритних характеристик загальної компоновки, підвищення її жорсткості і розширення технологічних можливостей верстату.

### Описання й аналіз концепції каркасних компонок верстатів з МПС

Для розвитку паралельних структур у верстатобудуванні, розширення і поглиблення галузей їх використання існують вимоги, що ставляться до цього обладнання в металообробці, а саме [1, 2]:

забезпечення високої точності обробки та позиціонування інструмента і деталі;

забезпечення підвищеної жорсткості рухомих ланок;

багатофункціональність верстатів нового покоління;

забезпечення необхідного ступеня вільності ВО для виконання верстатом багатофункціональних задач;

збільшення розмірів робочого простору ВО верстата;

забезпечення високошвидкісної, високопродуктивної обробки;

вільний доступ для завантаження (розвантаження) деталей, обслуговування, встановлення інструменту й оснащення.

Наведемо систему основних принципів для реалізації технічних рішень згідно з вимогами до нового металообробного обладнання з огляду на сучасні тенденції верстатобудування [3, 5].

### Принцип багатоваріантності

Багатоваріантність — це формалізований процес проектування верстатів з МПС. В основі покладається багатоваріантність розміщення напрямних на несучій основі верстата як геометричних операторів у полі компоновки. Розглянемо процес проектування верстатів з МПС як деякої технічної багаторівневої системи, що задається виконанням функцій

$$\Pi = F_T \wedge F_G \wedge F_l \wedge F_m,$$

де  $F_T$  — множина технологічних задач,  $F_G$  — побудова наджорстких стрижневих структур із напрямних у просторі компоновки,  $F_l$  — умови з'єднання шарнірних стрижневих систем,  $F_m$  — множина функціональних верстатних модулів, що доповнюють компоновку.

Функція  $F_T$  встановлює відповідність між множиною оброблюваних деталей і їх поверхонь з формоутворювальними рухами ВО верстата з МПС, що обумовлює тип операції

$$\forall (P \in D) \exists (w \in W) \Leftrightarrow p_i \forall_D P \exists_W w,$$

де  $P = \{p_i, \dots, p_j\}$  — множина поверхонь, що підлягають обробці;  $D$  — множина деталей;  $W = \{w_i, \dots, w_j\}$  — множина ступенів вільності ВО і їх комбінацій. Тому

$$F_T : D \times P \rightarrow W (X \vee Y \vee Z \vee A \vee B \vee C).$$

Функція  $F_G : G \times N$  встановлює зв'язок між жорсткістю і компактністю компоновки, задається кількістю напрямних та умовами їх розміщення як в просторі, так і між собою. При цьому  $G = \{g_i, \dots, g_j\}$  — множина конструкцій напрямних,  $N_g \in G$  — підмножина як область змінної  $G$  геометричних параметрів положення і орієнтації систем координат напрямних.

Функція  $F_l : \bigwedge_{i=1}^5 K_i$  задається кінематичними властивостями множини шарнірних з'єднань і обмежень відповідного класу, де  $K_i$  — множина кінематичних пар,  $i$  — клас кінематичної пари.

Багатоваріантність компоновок одного технологічного призначення зумовлена різноманітністю геометричних форм просторової композиції функціональних і конструктивних верстатних модулів, а також характером формоутворення на металообробних верстатах, що відбувається за рахунок відносних рухів заготовки та інструменту. Один і той же відносний рух формоутворення може бути реалізований при різному розміщенні рухомих блоків компоновки один відносно одного та відносно стаціонарного блока.

### Принцип каркасної будови несучої системи

Каркасна будова несучої системи — це використання металоємних жорстких блоків для розміщення модулів і напрямних у компоновці обладнання з МПС. Аналіз відомих компоновок верстатів з МПС, які використовують штанги постійної довжини, свідчить про те, що практично всі вони обмежені призматичною формою несучої системи з елементами закріплення напрямних для кареток (масивні колони, оболонки у вигляді колодязів, надбудови — естакади, масивні траверси тощо). З урахуванням складності будови верстатів з передавальними стрижневими системами концепція передбачає, що структура компоновки таких верстатів може бути розкрита всебічно тільки при багаторівневому і поетапному описанні конструктивних компоновок із застосуванням розрахункової техніки, тоді як символічний запис формул координатної і базової компоновок верстатів з МПС тільки частково відбиває їх будову при аналізі. Для створення опису про стаціонарний

блок запропоновано кодування опорних з'єднань МПС і каркаса нерухомого блока, на якому він базується, у вигляді бінарних відношень двох матриць, а саме тривимірної матриці каркаса нерухомого блока  $\|НБ\|$  із напрямними і тривимірної матриці робочого поля заготовки  $\|Зрп\|$  [3]. Між матрицями  $\|Зрп\|$  і  $\|НБ\|$  існує функціональний зв'язок  $F(L_{i=N-n}) \subset \llbracket \|Зрп\| \cap \|НБ\| \rrbracket$  у вигляді стрижневої системи (штанги змінної або постійної довжини). Одні кінці штанг розміщені в області стаціонарного блока  $\|НБ\|$  на напрямних і належать характерним точкам цього простору  $F(L_N) \subset \|НБ\|$ , а інші кінці цих штанг містяться в області заготовки  $F(L_n) \subset \|Зрп\|$  на рухомій платформі, або ВО, що і визначає їх положення в області  $\|Зрп\|$ . Порядок  $n$  матриць  $\|Зрп\|$  і  $\|НБ\|$  визначає вимір просторів заготовки і стаціонарного блока та може набувати будь-яких значень з кроком між проміжними точками  $i, j, k$ , що також може набувати довільних значень як для обох просторів окремо  $\|Зрп\|^{n(i) \times n(j) \times n(k)} \neq \|НБ\|^{n(i) \times n(j) \times n(k)}$ , так і у власному просторі  $n(i) \neq n(j) \neq n(k)$ . Над матрицями  $\|Зрп\|$  і  $\|НБ\|$  в компоновці верстата з МПС виконуються логічні і математичні операції. Перші характеризують якісний зв'язок між ними, а другі – кількісний (конструктивний). Система штанг  $F(L_{i=N-n})$  в такому визначенні виступає математичним оператором між  $\|Зрп\|$  і  $\|НБ\|$ . Абсолютне значення довжини штанг при цьому не враховується. При зміні значень  $i, j, k$  у просторі  $\|Зрп\|$  або  $\|НБ\|$  та параметрів  $F(L_{i=N-n})$  у співвідношеннях  $\|Зрп\| \cap \|НБ\|$  виникає можливість утворення нових компоновок верстатів з МПС, що мають бути узгоджені із символічним записом відповідної структурної формули компонування. Таким чином, символічний запис структурної формули, що відображає образ компоновки, складається із варіації співвідношень у залежності  $F(L_{i=N-n}) \subset \llbracket \|Зрп\| \cap \|НБ\| \rrbracket$ .

### Принцип гібридності

Гібридність – це поєднання спільних переваг традиційних структур і МПС. Аналіз

конструкцій і компоновальних схем верстатів, які виготовляються з паралельною кінематикою, показав, що перевагу фірми-виробники віддали першій групі верстатів – зі змінно-керованою довжиною штанг, відмовившись від переваг традиційних компоновок. У той же час кращі рішення, мабуть, – між традиційними компоновками і верстатами першої групи, де ВО у вигляді інструментальних систем розміщені на платформах, шарнірно зв'язаних з основою через штанги постійної довжини, як це реалізується у верстатах другої групи. Саме такий третій підхід при агрегатно-модульному принципі побудови компоновок і окремих компонентів верстатів з МПС закладений у запропоновану концепцію з метою отримання верстатів гібридних структур, що за кількістю керованих координат не поступаються верстатам-гексаподам.

Побудова гібридних структур у верстатобудуванні явище не нове, але не достатньо розвинуте з точки зору компонетики – властивостей взаємозв'язків модулів у модульному комплекті обладнання. Зазвичай традиційними координатними модулями (обертіві шпиндельні головки, програмно-керовані верстатні столи) доповнювали МПС у кінці координатної гілки, що розміщена ближче до оброблюваної деталі, від чого втрачався загальний ефект використання МПС і нарощувались габарити та металоемність обладнання.

### Принцип симетричності компоновки

Симетричність компоновки – це прагнення до симетричного і збалансованого за масою розміщення модулів блоків у компоновці обладнання з МПС. Каркасні компоновки верстатів з МПС відповідають множинам комбінацій розміщення стійок каркаса компоновки. Каркасна компоновка будь-якого верстата для розміщення напрямних складається з нижньої і верхньої основ, зведених до мінімальних розмірів, а саме точки, лінії або будь-якого плоского багатокутника, круга або каркаса багатокутника при виконанні нижньої основи у формі такого ж або іншого багатокутника чи круга. Несуча нерухома частина верстата має форму каркаса з вертикальними і нахиленими стійками, а вісі стійок каркаса паралельні, перехрещені або мають спільні точки перетину на нижній і верхній основах та можуть бути розміщені над або під рухомою платформою з ВО, при цьому механізми поступового руху монтуються

як на стійки просторового каркаса, так і в площині між осями стійок.

Властивості симетрії дають можливість виконувати якісні перетворення компоновок і кількісні перебудови окремих модулів у середині компоновки математичними методами обертання і відбиття відносно осей і площин симетрії.

### Принцип модульної будови компоновки

Модульна будова компоновки – це використання єдиних модульних блоків, функціональних і конструктивних, для направлено створення обладнання з МПС із заданими технічними характеристиками. Модульне проектування дає можливість створювати нове високопродуктивне обладнання для оптимальної обробки заготовок, а не підводити процес під можливості вже наявного обладнання. Модуль характеризується найменшим можливим числом зв'язків для приєднання до нього нових модулів. Обмежена номенклатура модулів забезпечує безліч різних компоновок верстатів через різноманіття сполучень і положень модулів. Основна перевага модульного принципу – наявність потенційної можливості забезпечити попереднє (до початку проектування) впорядкування складу елементів технічної системи. Аналіз структурних схем технологічного обладнання з паралельною кінематикою показує, що таке обладнання, як правило, складається з визначеної кількості відповідних модулів. Вибір конкретної модифікації технологічного обладнання залежить від комплексу технологічних задач, маси та габаритних розмірів деталі, її конструктивної форми, кількості оброблюваних сторін.

### Принцип комп'ютерного моделювання

Візуальне комп'ютерне моделювання при створенні компоновок – це забезпечення швидкої оцінки кінематичних властивостей і перевірка якісних показників обладнання з МПС, що можуть включати будь-яку кінематичну схему розміщення приводних ланок у компоновці. Візуалізація формоутворювальних рухів кінематичних ланок МПС є невід'ємною складовою в проектуванні нових компоновок верстатів з паралельною кінематикою. Використання потужних програмних систем для розрахунку кінематичних і динамічних характеристик майбутніх високотехнологічних верстатів, яких на сьогодні існує кілька, дасть змогу ско-

ротити час на їх розроблення і знайти оптимальні компоновки. Однак розвиток програмних середовищ напряму залежить від удосконалення алгоритмів розрахунку властивостей МПС. Для створення ієрархічно зв'язаних комп'ютерних моделей верстатів з МПС необхідно визначити форми математичного описання рухів ланок механізмів як перетворень геометричної системи і реалізувати алгоритми керування ВО програмно.

Викладені принципи компоновок окреслюють групи комбінацій кріплення стійок каркаса і напрямних на них, що визначається як

$$C(n, m) = \frac{(n + m - 1)!}{m!(n - 1)!},$$

де  $n$  – кількість стійок (напрямних),  $m$  – розрядність перестановлень. Геометричні властивості несучої основи верстата визначають кількість розрядів перестановлень  $m$  (кінематичну схему МПС вважають сталою).

*Напрямні розміщені в одній площині*  
 $G \times N_g^S \rightarrow S$ .

$$\exists_G g_k \exists_I i_p : g_k \vee G \in S, g_i \| G \text{ – перетинаються}$$

будь-які  $G_k$ -напрямні – інші паралельні  $m = k$ , де  $i_p \in I$  – множина опорних точок з'єднання напрямних;

$$\exists_G g_k \exists_I i_p : g_k \vee G \in S, \overline{g_i \| G} \text{ – всі напрямні не}$$

паралельні і перетинаються в різних точках;

$$\exists_G g_k \exists_I i_p : g_k \vee i_p \in I, \overline{g_i \| G} \text{ – всі напрямні ма-}$$

ють спільну точку перетину;

$$\exists_G g_k \exists_I i_p : g_k \vee \overline{G} \in S, g_i \| G \text{ – всі напрямні па-}$$

ралельні.

*Напрямні розміщені в різних площинах*  
 $S \times N_g^V \rightarrow V$ .

$$\exists_S s_k \exists_L l_p : s_k \vee S \in V, s_i \| S, \text{ – перетинаються}$$

будь-які  $S_k$ -площини – інші паралельні  $m = k$ , де  $l_p \in L$  – множина ліній перетину опорних площин;

$$\exists_S s_k \exists_L l_p : s_k \vee S \in V, \overline{s_i \| S} \text{ – всі площини не}$$

паралельні і перетинаються по різних лініях;

$$\exists_S s_k \exists_L l_p : s_k \vee l_p \in L, s_i \| S \text{ – площини пере-}$$

тинаються по спільній лінії;

$$\exists_S s_k \exists_L l_p : \overline{s_k \vee S} \in V, s_i \| S \text{ – всі площини па-}$$

ралельні.

Загальна множина комбінацій розміщення напрямних на основі каркасу в компоновці верстата становить

$$S \times V \rightarrow \Omega.$$

Розрахунок варіантів розміщення напрямних у каркасних компоновках визначає основні групи верстатів з МПС і ланками постійної довжини (кінематичний тип приводних ланок однаковий):  $\langle N = 1296, m = 7, G_N = 3 \rangle$ ;  $\langle N = 27225, m = 8, G_N = 4 \rangle$ ;  $\langle N = 511225, m = 9, G_N = 5 \rangle$ ;  $\langle N = 1002001, m = 10, G_N = 6 \rangle$ .

На рис. 1 подано приклади нових компонок згідно з прийнятими умовами формування каркасів нижньої і верхньої основ несучої системи (патент України № 66672).

Нова концепція отримує подальший розвиток для створення не тільки верстатів з паралельною кінематикою, але й різного технологічного обладнання як складних технічних

систем, що розвиваються, з урахуванням досвіду, який накопичений людством за багато років його творчої діяльності і передається від покоління до покоління у вигляді генетичної інформації на різних носіях [6].

Принципи нової концепції [2] гібридних каркасних компонок дають можливість створити нові компоновки верстатів з паралельною кінематикою з потрібним ступенем вільності ВО для виконання багатофункціональних задач через розподіл технологічних рухів між традиційною і паралельною структурами модулів.

Найбільш вигідним уявляється розроблення компонок верстатів зі штангами постійної довжини. Крім того, ця концепція може бути найбільш ефективно реалізована з використанням модульного принципу комп'ютерного моделювання і створення верстатів, з використанням сучасних уніфікованих вузлів і модулів (таблиця), де використовуються різні комплек-

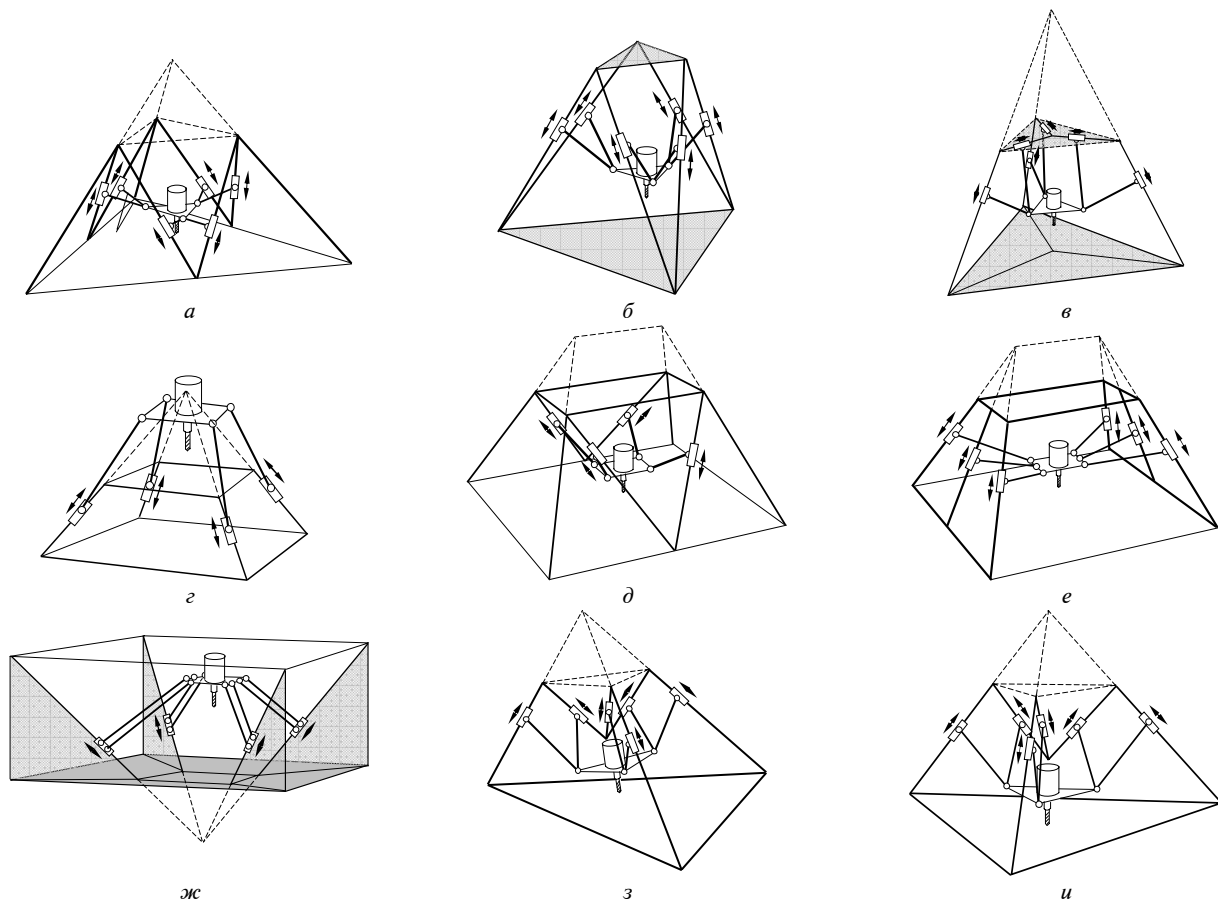
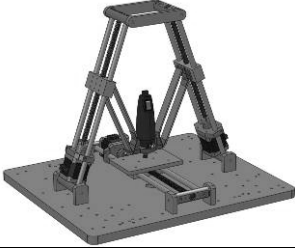
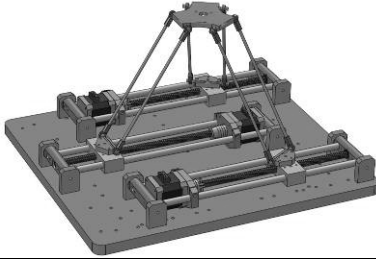
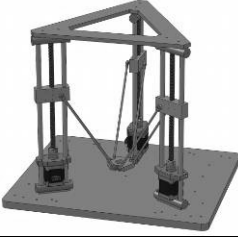


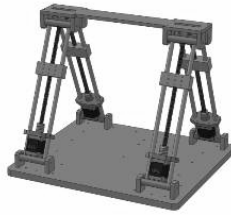


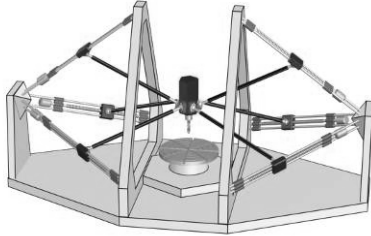


Рис. 1. Приклади формування набору каркасних компонок залежно від функціональних можливостей: *a* – гексаглайд з додатковою несучою системою; *б* – гексаглайд з несучою системою у вигляді напрямних; *в* – гексаглайд з гібридним розміщенням напрямних; *г* – тетраглайд інверсний; *д* – тетраглайд з додатковою несучою системою; *е* – гексаглайд з клиноподібною несучою системою; *ж* – інверсний тетраглайд з додатковою несучою системою і паралелограмними штангами; *з* – несиметричний гексаглайд з інверсним каркасом; *и* – симетричний гексаглайд з інверсним каркасом

Таблиця. Відібрані основні компоновальні рішення верстатів традиційної і паралельної кінематичної будови

Біглайд із рухомим столом	Триглайд горизонтальний	Триглайд вертикальний
		
Триглайд-піраміда	Тетраглайд-піраміда	Тетраглайд-клин
		
Верстат-гексаглайд в пірамідальній каркасній компоновці		
		

туючі, основані так само на модульному принципі.

Завдяки різним функціональним модулям, які розміщуються на рухомій платформі (шпindelні блоки з приводами головного руху, мотор-шпindelі, з приводами подачі інструменту і без нього), на нерухомій станині (координатні традиційні блоки) при використанні різних приводів подачі, і напрямних для верстатів з МПС, оснащених штангами постійної або змінної довжини, можна створити верстати різного призначення з різною кількістю керованих координат.

#### Реалізація описаної концепції на прикладі виготовлених авторами верстатів з МПС

В НТУУ “КПІ” розроблено і виготовлено ряд діючих верстатів для виконання комплексної обробки складнопрофільних деталей. Повзуні розміщені на напрямних верстата, що утворюють каркас піраміди і рухаються в  $I$ -коор-

динатах, а заготовки здійснюють переміщення в базовій площині  $XU$  залежно від руху  $BO$  в робочому просторі (рис. 2) [2, 4, 7, 8].

Система керування верстатом побудована за концепцією PC-NC (Personal Computer-Numerical Control), що має однокомп'ютерну архітектуру, в рамках якої усі задачі керування (геометрична, логічна, термінальна) розв'язані суто програмно без використання додаткових апаратних пристроїв. Для взаємодії керуючого комп'ютера з електричною частиною верстата використовується спеціальний контролер, який здійснює перетворення сигналів комп'ютера на аналогові сигнали керування кроковими двигунами [4]. На комп'ютер надходять сигнали датчиків нульового положення  $BO$  верстата. Контролер має три незалежні вісі по трьох координатах і працює за протоколом STEP/DIR (крок/напрямок). З LPT-порту комп'ютера в реальному часі надходить інформація про кількість кроків і напрямок обертання, які мають відпрацювати крокові двигуни.

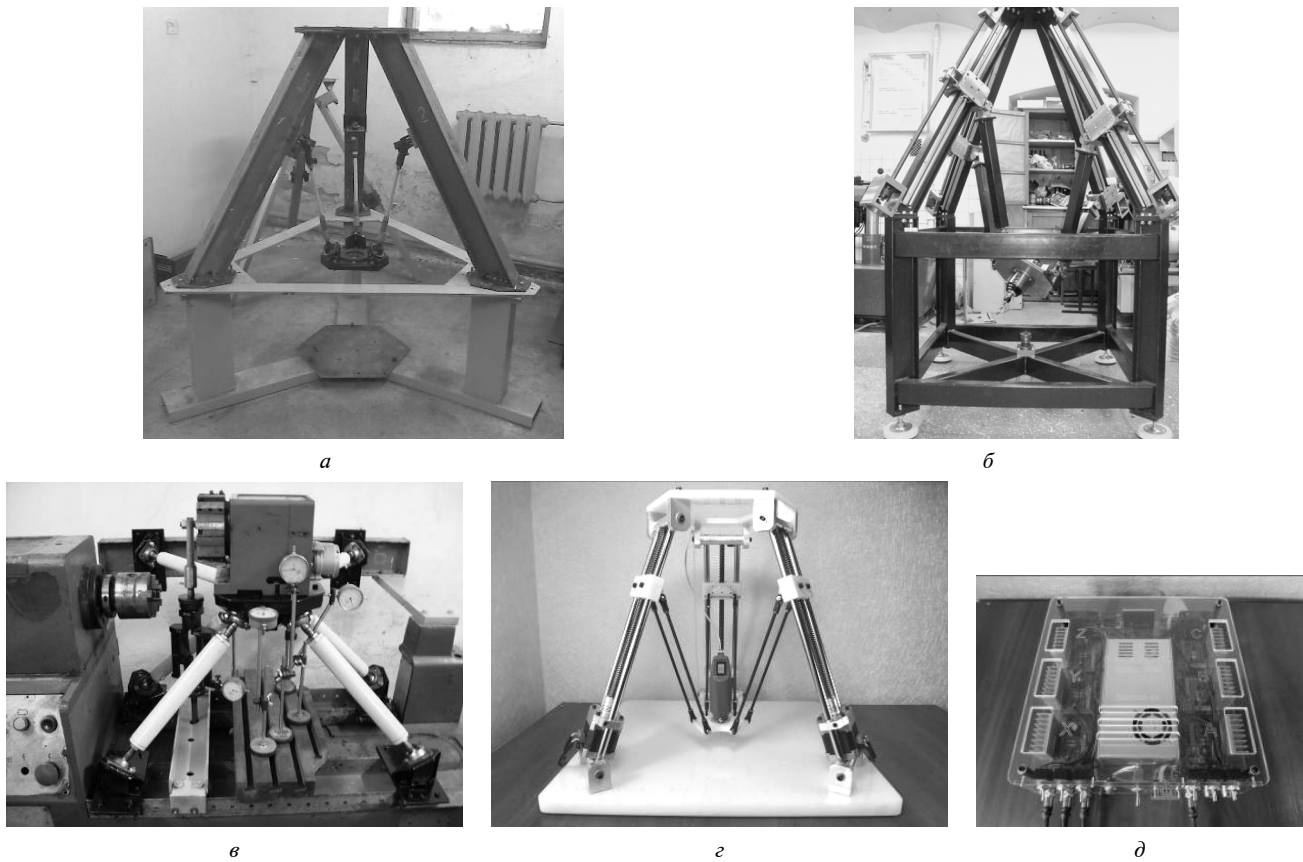


Рис. 2. Виготовлені дослідні зразки верстатів з МПС каркасних компонок: *а* – каркасна компоновка трикоординатного свердильно-фрезерного верстата з МПС; *б* – каркасна компоновка п'ятикоординатного свердильно-фрезерного верстата з МПС; *в* – багатоцільовий токарний верстат-гексаглайд; *г* – діючий настільний верстат-триглайд пірамідальної каркасної компоновки; *д* – універсальний контролер системи керування верстатом-триглайдом

## Висновки

Систематизовано принципи створення нового технологічного обладнання з МПС, які ґрунтуються на положеннях багатоваріантності, низької металоємності, симетричності, гібридності, модульності, комп'ютерно-математичного візуального моделювання. Виявлені основні групи каркасних компонок верстатів з МПС, які відповідають множинам комбінацій стійок каркаса компоновки і реалізовані у вигляді діючих дослідних зразків. Концепція каркасних компонок дає можливість створювати нові верстати з паралельною кінематикою з потрібним ступенем вільності ВО для виконання багатофункціональних задач за допомогою роз-

поділу технологічних рухів між традиційною і паралельною структурами модулів. Описана концепція отримує подальший розвиток не тільки для створення верстатів з паралельною кінематикою, але і для різного технологічного обладнання як складних технічних систем, що розвиваються, з урахуванням досвіду, який накопичений людством за багато років його творчої діяльності і передається від покоління до покоління у вигляді генетичної інформації на різних носіях.

В подальшому планується на основі отриманих результатів створити алгоритми автоматизованого проектування з використанням подання у вигляді генетичної інформації про механічні системи верстатного обладнання.

2. *Кузнецов Ю.Н., Дмитриев Д.А.* Концепция гибридных компоновок станков с параллельной кинематикой на модульном принципе // *Материалы Междунар. науч. конф. "Техника, технологии и системы Tekhsis 2009"*. – Plovdiv: Technical University Sofia, 2009. – P. 19–36.
3. *Дмитриев Д.О.* Компонетика верстатів з механізмами паралельної структури // *Технологічні комплекси*. – 2011. – № 3. – С. 18–30.
4. *Кузнецов Ю.М., Степаненко О.О.* Настільні фрезерні верстати, керовані комп'ютером // *Там же*. – 2010. – № 3. – С. 12–15.
5. *Дмитриев Д.О., Кузнецов Ю.М., Діневич Г.Ю.* Принципи компоновок верстатів з механізмами паралельної структури // *Вісник Херсонського нац. техн. ун-ту*. – 2011. – Вип. № 4 (43). – С. 28–32.
6. *Шинкаренко В.Ф., Кузнецов Ю.Н.* Генетические программы сложных, развивающихся систем. Ч. 1, 2 // *Труды Междунар. науч. конф. "Унитех'11"*. – Габрово, 2011. – 2. – С. 33–54.
7. *Фіранський В.Б.* Створення робочих органів з рухомою платформою для верстатів з механізмами паралельної структури: Дис. ... канд. техн. наук. – К., 2011. – 169 с.
8. *Розвиток теорії проектування верстатів нових компоновок на базі системного аналізу та синтезу механізмів з паралельною структурою: Звіт про науково-дослідну роботу № 2267-Ф / Кер. проф. Ю.М. Кузнецов*. – К.: НТУУ "КПІ", 2011. – 284 с.

Рекомендована Радою  
Механіко-машинобудівного інституту  
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції  
29 грудня 2011 року