

УДК 62-231:621.9.04

Ю.М. Кузнецов, д.т.н., проф.
Національний технічний університет України "КПІ"
В.А. Крижанівський, д.т.н., проф.
Кіровоградський національний технічний університет
Р.А. Склярів к.т.н., доц.
Тернопільський державний технічний університет
ім. І.Пулля

СУЧАСНИЙ СТАН, ПРОГНОЗУВАННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВЕРСТАТІВ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ

У статті розглянуто передумови та шляхи впровадження нових технологій, а саме: технологічного обладнання з паралельною кінематикою, узагальнені та систематизовані основні положення, наведено приклади класифікації за різними ознаками, а також показано приклади аналізу даного типу обладнання на основі патентної інформації, вказані перспективи його розвитку.

Вступ. Конкурентоспроможність продукції на внутрішньому та зовнішньому ринках, ефективність діяльності підприємств у всіх галузях промисловості визначається рівнем використання у виробничих процесах високих технологій. Основними концепціями створення технологічного обладнання нового покоління є багатофункціональність, багатопоточність та універсальність механічної системи. Таким критеріям відповідають механізми паралельної структури [2], [3].

Основна частина. У зв'язку з цим метою даного дослідження є вивчення і аналіз сучасного стану розвитку верстатів з паралельною кінематикою та їх прогноз. Для цього потрібно встановити передумови створення технологічного обладнання з паралельною кінематикою, принципи побудови і галузі використання механізмів паралельної структури, дослідити еволюцію і провести класифікацію технологічного обладнання з паралельною структурою, встановити перспективи розвитку технологічного обладнання нових поколінь.

У сучасному високорозвиненому індустріальному суспільстві відбувається постійна інтеграція нових технологій, що

обумовлюється ринковими відносинами та підвищенням конкурентоспроможності продукції.

Перехід виробництва на нову номенклатуру виробів обумовлюється зміною конструктивно-технологічних параметрів деталі, що впливає на зміну виду заготовки, на її характеристики, величину припуску та сил різання. При цьому можуть змінюватися також якісні параметри виробів (точність розмірів, геометричної форми та їх взаємне розташування). Зміна номенклатури виробів та їх характеристик (програма випуску) впливає на часовий режим їх виконання і характеристику, структуру та стан технологічного обладнання. Для забезпечення виробництва багатономенклатурної продукції необхідної якості з заданою продуктивністю та мінімальною собівартістю при різних умовах конкретного виробництва необхідно створити такий виробничий процес, властивості якого дозволять йому бути адекватним поточним умовам виробництва і забезпечити параметри функціонування процесу на заданому рівні.

Високий рівень гнучкості виробничих процесів багатономенклатурного серійного виробництва забезпечується широким застосуванням багатоцільового програмно-керованого технологічного обладнання, яке змінює структуру та зміст технологічних операцій (свердлильно-фрезерні верстати, токарні верстати з ЧПК, які обладнані свердлильно-фрезерною головою). Поєднання в одній технологічній операції методів обробки з різним за фізичною природою технологічним впливом (лезова, абразивна обробка, складання, виробовування тощо) зменшує кількість технологічних та транспортних операцій, номенклатуру та кількість технологічного оснащення, що підвищує рівень гнучкості виробничого процесу та методів обробки, які допускають їх різну послідовність.

Аналіз діючих виробничих систем, проведений закордонними фірмами, показав, що 60–70 % підвищення якості та конкурентоспроможності продукції та технології її виробництва забезпечується за рахунок підвищення ефективності та удосконалення структури парку технологічного обладнання [1, 2, 6, 10].

Основні напрямки удосконалення технологічного обладнання підпорядковані підвищенню: продуктивності

обробки; якості продукції; надійності та ресурсу роботи технологічного обладнання; інтелектуалізації виробництва; технологічних та функціональних можливостей обладнання; безпеки та комфортності роботи операторів; спрощення і підвищення зручності обслуговування технологічного обладнання, з урахуванням вимог ергономіки; зменшення матеріальних та енергетичних витрат обладнання; зменшення шкідливого екологічного впливу на зовнішнє середовище.

Поряд з удосконаленням конструкції технологічного обладнання та підвищенням їх характеристик у світовому верстатобудуванні відбуваються й інші зміни, пов'язані з новою орієнтацією виробників технологічного обладнання: на першій план висувається концепція клієнтоорієнтовності та впровадження реалізації забезпечення індивідуальних вимог клієнтів у залежності від їх фінансового стану. Це досягається впровадженням мехатроніки, ідеології агрегатно-модульного проектування, обчислювальної техніки, системою автоматизованого проектування та створенням технологічного обладнання нетрадиційних компоновок [3, 5, 9, 12].

На сучасному етапі основним напрямком автоматизації багатомономенклатурного серійного виробництва є створення програмно-керованого швидкопереналаджуваного технологічного обладнання, створеного на основі механізмів паралельної структури, яке слід розглядати не як удосконалення існуючого технологічного обладнання, а як створення принципово нового обладнання для виконання майже усіх технологічних операцій (обробки, складання, випробування та вимірювання виробів).

Технологічні можливості верстатних систем визначаються кінематичною структурою, компоновкою, конструктивним виконанням, рівнем автоматизації та технічною характеристикою. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою має більш широкий спектр технологічних можливостей, ніж традиційні верстати, внаслідок забезпечення виконавчому органу до шести ступенів вільності, що дозволяє здійснювати йому переміщення у просторі відносно усіх осей координатної системи та реалізувати майже усі схеми формоутворення поверхонь деталей, а також інші процеси виготовлення продукції за одну установку деталі з усіх сторін, крім базових.

Концепція проектування технологічного обладнання з паралельною кінематикою [10] передбачає конструктивне виконання кінематичних ланцюгів у вигляді просторових стрижневих ферм, які мають незначну масу рухомих елементів, що обумовлює отримання надвисоких швидкостей та прискорень виконавчого органу. Дане обладнання може виконувати практично усі види робіт, пов'язаних з обробкою, складанням, випробуванням та контролем виробів.

Досвід експлуатації механізмів технологічного обладнання показує, що майже усі вони мають недоліки конструктивного, технологічного та функціонального характеру, а саме: консольність конструкції основних механізмів; багатонаменклатурність елементів кожного механізму; значні маси рухомих елементів; розімкненість кінематичних ланцюгів; недостатня жорсткість механізмів; їх однофункціональність; однопоточність передачі рухів та навантажень; значна матеріалоемність; значні енергетичні витрати; недостатня точність позиціювання.

Внаслідок традиційних підходів до проектування технологічного обладнання більша частина цих недоліків закладається у його конструкцію на перших етапах його проектування, а саме:

- практично всі існуючі механізми технологічного обладнання мають розімкнені кінематичні ланцюги, що не забезпечує необхідний рівень їх жорсткості, для її забезпечення здійснюють збільшення розмірів поперечних перерізів тягових елементів механізмів, що збільшує матеріалоемність та підвищені енергетичні витрати на їх переміщення;

- незамкненість кінематичних ланцюгів створює консольні конструкції механізмів та нерациональне розміщення їх центрів ваги, що обумовлює перекося рухомих елементів на напрямних та створює додаткові навантаження;

- однофункціональність механізмів обумовлює збільшення номенклатури їх складових елементів, що також впливає на матеріалоемність технологічного обладнання та збільшує витрати на його виробництво;

- однопоточність передачі рухів та навантажень потребує збільшення жорсткості елементів механізму за рахунок підвищення матеріалоемності.

Підвищення ефективності технологічного обладнання здійснюється як шляхом удосконалення конструкції існуючих механізмів, так і пошуком нових нетрадиційних рішень їх побудови.

Одним з перспективних напрямків удосконалення механізмів технологічного обладнання є їх побудова на основі передачі потоку рухів і сил декількома кінематичними ланцюгами шляхом раціонального перерозподілу рухів та навантажень між ними; реалізації паралельної передачі енергії декількома кінематичними ланцюгами та механізмами; створення замкнених кінематичних ланцюгів, які відтворюють замкнений контур підвищеної жорсткості; побудови безконсольних конструкцій механізмів.

Механізми паралельної структури представляють собою принципово новий клас просторових механізмів, фізична сутність яких полягає у тому, що рухомий виконавчий орган технологічного обладнання шарнірно пов'язаний з його нерухомим елементом (стаціонарним блоком) кінематичними ланцюгами, кожний з яких має індивідуальний привід або накладає визначену кількість зв'язків на переміщення виконавчого органу.

Багатопоточність та паралельність передачі навантажень у механізмах паралельної структури дозволяє їм здійснити оптимальний перерозподіл сил та рухів на декілька кінематичних ланок, які побудовані у вигляді стрижнів з відповідними шарнірами на кінцях та мають незначну масу, що обумовлює відсутність напружень згину. Вони працюють лише на розтягування або стискання. Замкненість кінематичних ланок обумовлює створення геометрично симетричної конструкції механізму. Усі кінематичні ланки механізму працюють одночасно (паралельно), що дозволяє виконавчому органу рухатись у просторі, забезпечуючи необхідний закон переміщення. Крім того, можливість розташування індивідуальних приводів кінематичних ланок на нерухомому стаціонарному блоку (несучій системі) також зменшує масу рухомих елементів, що дозволяє надавати надвисокі швидкості та прискорення виконавчому органу.

Порівняльний аналіз традиційного обладнання різного рівня автоматизації та технологічного обладнання з паралельною кінематикою показує, що останні мають значно ширші функціональні та технологічні можливості і можуть знайти місце у загальній ієрархічній структурі технологічного обладнання між багатоцільовими обробними центрами з ЧПК та гнучкими виробничими системами (рис. 1).

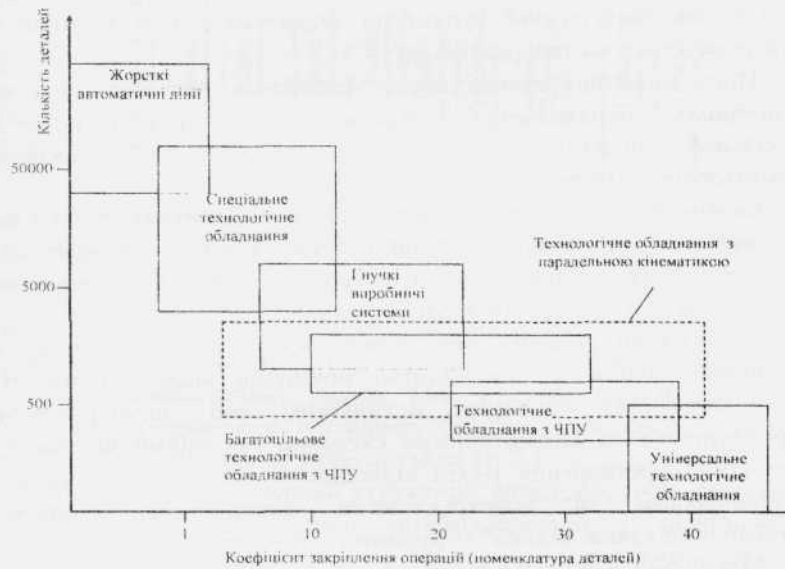


Рис. 1. Спеціалізація технологічного обладнання

Проведено ґрунтовне ретроспективне дослідження щодо обладнання з паралельною кінематикою [5]. Перша офіційна інформація про створення просторового паралельного механізму з'явилася в 1928 р., коли американський інженер Д.Е. Гвінпетт запропонував просторовий сферичний механізм, побудований на принципах паралельного (одночасного) функціонування декількох кінематичних ланцюгів, які зв'язують рухомий та нерухомий елементи механізму з метою отримання заданого переміщення його виконавчого органу в просторі. В 1934 р. інженер У.Л. Поллард запропонував оригінальну конструкцію

просторового механізму для розширення фарби, якій побудований за принципом паралельної роботи декількох кінематичних ланок. Інженер фірми "Dunlop Rubber Co." (Англія) Ерік Гауф у 1947 р. побудував просторовий механізм з шістьма кінематичними ланцюгами для дослідження пневматичних коліс під дією навантажень, який був виготовлений в 1954 р. та експлуатувався у виробництві до 2001 р. Інтенсивний розвиток наукових досліджень та розробок механізмів паралельної структури розпочався з 80-х років і продовжується по теперішній час.

Нова концепція проектування механізмів, яка заснована на принципах паралельності передачі енергетичних потоків декількома шляхами, формує перехід до більш сучасного технологічного обладнання.

Стрижневі кінематичні ланки механізмів працюють тільки на розтягування та стискування, а напруження згину у них відсутні. У механізмах паралельної структури здійснюється кероване силоне замикання між кінематичними ланками.

Інтенсивний розвиток механізмів паралельної структури та їх впровадження у виробництво обумовив значну кількість запропонованих подібних механізмів, які відрізняються структурними та кінематичними схемами, ступенями вільності, методами перетворення рухів відповідних виконавчих органів, компоновками та конструктивним виконанням основних елементів, а також кількістю рухомих кінематичних ланок.

Механізми паралельної структури мають від трьох до шести ступенів вільності. Значна кількість технологічного обладнання паралельної структури має п'ять ступенів вільності (47 %). На другому місці – трикоординатне обладнання (29 %), далі – шестикоординатні (19 %). Решта обладнання має чотири ступені вільності, що обумовлюється технологічними задачами, які на ньому розв'язуються.

Враховуючи, що кількість ступенів вільності виконавчого органу технологічного обладнання з паралельною кінематикою залежить від кількості кінематичних ланок механізму, на основі якого воно побудоване, можна запропонувати наступну його класифікацію [3], [5] (рис. 2).



Рис. 2. Класифікація технологічного обладнання з паралельною кінематикою за кількістю кінематичних ланок та ступенів вільності

Аналіз показує, що найбільш ефективно досліджуються механізми паралельної структури типу "трипод", які мають досить просту конструкцію в порівнянні з іншими і складаються з трьох кінематичних ланок (44 %), на другому місці за кількістю розробок є гексаподи (29 %), далі йдуть – дельта (12 %), "ножиці" (9 %) і гексаглайди (6 %).

Механізми паралельної структури внаслідок своїх специфічних властивостей широко впроваджуються у різноманітне технологічне обладнання, космічну та ракетну техніку, робототехнічні системи, механізми орієнтації та позиціонування, знаходять застосування у медичній техніці, авіаційних та спортивних тренажерах та навіть в індустрії розваг.

Механізми паралельної структури в різних галузях господарства використовуються нерівномірно. Аналіз показує, що найбільше застосування мають механізми паралельної структури в технологічному обладнанні – до 36 %, механізми позиціонування та орієнтації, ракетна та авіаційна техніка – по 18%, приладобудування та робототехніка – по 8 %, тренажери – 6 %, випробувальні та вимірювальні машини – 4 %, ренгта (2 %) – спортивне обладнання та індустрія розваг.

Механізми паралельної структури, які використовуються в технологічному обладнанні, розділяються на дві групи: з

постійною довжиною кінематичних ланок (44 %) і змінною (56 %). Технологічне обладнання паралельної структури з кінематичними ланками змінної довжини внаслідок відсутності напрямних має більш просту конструкцію.

Для реалізації рухів кінематичних ланок механізмів паралельної структури використовуються різні приводи: пневмо та гідروприводи (34 %); лінійні електроприводи (28 %), приводи обертового руху (38 %).

За роки існування наукових центрів їх дослідниками опубліковано і запатентовано значну кількість наукових робіт та патентів (рис. 3), а також створено значну кількість конструкцій механізмів паралельної структури, які складають принципово новий клас механізмів, а їх впровадження підвищує ефективність технологічних машин [8].

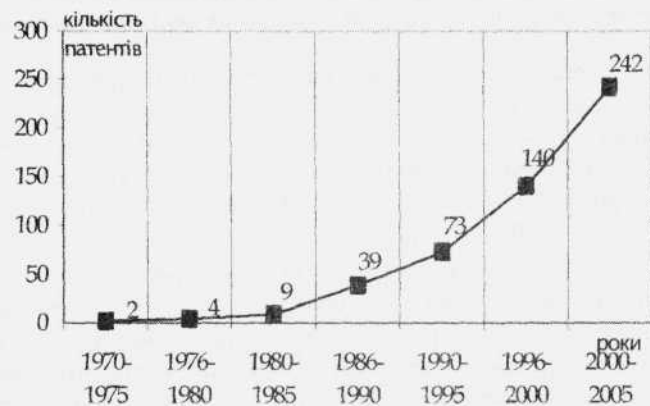


Рис. 3. Аналіз динаміки патентування (кумулятивна крива патентів технологічного обладнання з паралельною кінематикою)

Актуальними є патентні дослідження [4], [8], [12], а саме патентна статистика, яка характеризує розподіл нових ідей по галузях знань. На основі статистичного і якісного аналізу патентів можна виявити найбільш важливі області розвитку техніки, в яких сконцентрована в даний момент винахідницька діяльність в окремих країнах. Аналіз динаміки патентування, яка характеризується хронологічним розподілом патентів за датами пріоритету, країн і тематичних напрямків, відповідних

рубрик МКІ, дозволяє в результаті статистичного експерименту розкрити тенденції в розвитку тематичного напрямку або конкретного запатентованого технічного рішення шляхом багатоаспектного аналізу зв'язків з іншими об'єктами та екстраполювати ці тенденції на 10–12 років вперед. Прогнозування на основі використання патентної інформації дозволяє виявити, які ідеї на теперішній час є прогресивними і перспективними, а які є застарілими.

Авторами розроблена база даних (БД), в якій містяться відомості про більш як 200 патентів і авторських свідоцтв на компоновочні рішення та конструкції технологічного обладнання з паралельною кінематикою, його вузли, схеми, принципи дії [5].

При формуванні бази даних патентів верстатів з паралельною кінематикою було введено інформацію про більше 1100 патентів-аналогів (номер патенту аналогу, патентне відомство, дата прийняття, автор). Ці відомості дозволяють додатково вибрати патенти для аналізу, які з певних причин не потрапили в основну базу даних. Аналіз цих патентів показав, що деякі з них мають дуже великий термін "період життя" (від 60 до 120 років), такі патенти для аналізу не використовуються. За початок аналізу прийнято 1950 рік. Після цього здійснено визначення частоти патентування окремих патентів. Деякі патенти-аналоги зустрічались в згадках від 1 до 21 разів (рис. 4), що свідчить про актуальність деяких патентів.

Даний аналіз дозволив виявити перспективні патенти, на які було здійснено велику кількість посилань, та включити їх в статистичний патентний аналіз. При цьому перевага надавалась патентам із "молодого" патентного фонду". Весь цей комплекс дій дозволив вибрати представницьку групу патентів для їх подальшого аналізу інформаційними методами прогнозування.

Так, на основі отриманого з БД звіту проведено аналіз росту кількості патентів по роках та здійснено прогнозування їх росту поліномною моделлю на 5 років. Криву динаміки патентування можна описати поліномною моделлю $y = -0,0014x^3 + 8,7381x^2 - 17589x + 1E + 07$. Згідно з прогнозом на період з 2003 на кінець 2008 р. слід очікувати появи не менше 110 нових патентів. Тобто патентна активність зростає. Кількість патентів за цей період в порівнянні з 1995–2000 рр. може подвоїтись. При

появі нової піонерської ідеї можна очікувати ще більшого росту числа патентів у даній галузі.



Рис. 4. Крива частоти повтору патентів-аналогів

Проведені патентні дослідження показали, що за останні роки винахідницька активність в областях “роботи та маніпулятори”, “симулятори руху об’єктів” знизилась, спостерігається чітка тенденція росту в області патентування конструкцій верстатів з паралельною кінематикою, системи позиціонування та методи точного контролю (рис. 5). Потрібно сподіватись появи великої кількості нових патентів у цій області в найближчі 10–12 років. На попередньому рівні залишилась кількість патентів в області приводів руху та конетрукції пристроїв для передачі руху. Тобто даній напрямок досліджень є досить перспективним.

На сучасному етапі основним напрямком автоматизації багатономенклатурного серійного виробництва є створення програмно-керованого швидкопереналагоджуваного технологічного обладнання, яке створене на основі механізмів паралельної структури. Таке обладнання слід розглядати не як удосконалення існуючого технологічного обладнання, а як створення принципово нового, яке призначене для виконання майже усіх технологічних операцій (обробки, складання, випробування та вимірювання виробів). На технологічному обладнанні з пара-

лельною кінематикою передбачається автоматичне управління переходу з прискореного переміщення на уповільнене при наближенні відповідного інструмента до заданої координатної опорної точки та можливість чергування установчих та дономіжних переміщень і робочих подач виконавчого органу, що реалізується стандартними циклами виконання операції.



Рис. 5. Динаміка зміни винахідницької активності стосовно верстатів з паралельною кінематикою

Крім того, нова концепція розвитку технологічного обладнання передбачає реалізацію більш сучасних технологічних процесів обробки круногабаритних деталей. Воно має можливість позиційно переміщувати інструмент вздовж заготовки, обробляючи її у важкодоступних місцях.

Висновки. Враховуючи надто високі технічні стандарти проектування сучасного технологічного обладнання, а також шляхи та методи підвищення їх компоновок, слід зазначити, що розвиток сучасного верстатобудування повинен відбуватися не стільки шляхом модернізації та удосконалення існуючих

конструкції, скільки шляхом пошуку та виведення нових, нетрадиційних рішень побудови технологічного обладнання. Створення технологічного обладнання з паралельною кінематикою дозволяє реалізувати та забезпечити майже усі фактори, які впливають на компоновку обладнання, а саме: геометричну симетрію побудови компоновки; зменшити маси рухомих компонентів; здійснити обробку деталі з п'яти сторін за одну установку; реалізувати його виконавчому органу до шести ступенів вільності; реалізувати майже усі відомі методи обробки, а також складання, випробування та вимірювання; здійснювати його побудову на принципі модульного агрегування.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Агрегатно-модульне технологічне обладнання / В.А. Крижанівський, Ю.М. Кузнецов, А.М. Кириченко та ін. / За ред. Ю.М. Кузнецова: Навч. посібник для ВНЗ. У 3-х част. – Кіровоград, 2003. – Частина I. Принципи побудови агрегатно-модульного технологічного обладнання. – 422 с.
2. Агрегатно-модульне технологічне обладнання / В.А. Крижанівський, Ю.М. Кузнецов, А.М. Кириченко та ін. / За ред. Ю.М. Кузнецова: Навч. посібник для ВНЗ. У 3-х част. – Кіровоград, 2003. – Частина III. Агрегатно-модульне технологічне обладнання нового покоління, його оснащення та інструментальне забезпечення. – 507 с., іл.
3. *Валявський І.А., Крижанівський В.А.* Тенденції розвитку верстатів паралельної структури // Вісник Сумського державного університету. – 2003. – № 2(48). – С. 18–22.
4. *Зборовский И.Ю.* Исследование развития техники по патентным материалам // Анализ тенденций и прогнозирование научно-технического прогресса. – К.: Наукова думка. – 1967. – С. 72–81.
5. *Крижанівський В.А., Кузнецов Ю.М., Валявський І.А., Склярів Р.А.* Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Навчальний посібник для ВНЗ / За ред. Ю.М. Кузнецова. – Кіровоград, 2004. – 449 с.
6. *Кузнецов Ю.И.* Станки с ЧПУ: Учебное пособие. – К.: Вища школа, 1991. – 278 с.

7. Кузнецов Ю.Н., Скляр Р.А. Аспекты прогнозирования развития конструкций многошпиндельных токарных автоматов // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». – 1997. – № 32. – С. 17–22.
8. Кузнецов Ю.М., Скляр Р.А. Прогнозування розвитку технічних систем / За загальною редакцією проф. Ю.М. Кузнецова. – К.: ТОВ “ЗМОК”-ПП “Гнозис”, 2004. – 323 с.
9. Мехатроника: Пер. с япон. / Т.Исин, И.Самояна, Х.Иноуэ и др. – М.: Мир, 1988. – 318 с.
10. Обработкающее оборудование нового поколения. Концепция проектирования / В.А. Афонин, А.Ф. Крайнев, В.Е. Ковалев и др.; Под общ. ред. В.Л. Афонина. – М.: машиностроение, 2001. – 256 с.
11. Спыту Г.А., Шевченко А.В. Мехатроника в станко-строении // Прогресивна техніка і технологія в машинобудуванні. – Т. 43. – Київ, 2003. – С. 139–142.
12. Тардов Б.Н. Табуляграммирование патентных описаний как способ исследования тенденций научно-технического прогресса // Анализ тенденций и прогнозирование научно-технического прогресса. – К.: Наукова думка, 1967. – С. 82–100.

КУЗНЕЦОВ Юрій Миколайович. – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

- новітні технології;
- проектування верстатних систем.

КРИЖАНІВСЬКИЙ Володимир Андрійович – доктор технічних наук, професор Кіровоградського національного технічного університету.

Наукові інтереси:

- проектування металорізальних верстатів.

СКЛЯРОВ Р.А. – кандидат технічних наук, доцент Тернопільського державного технічного університету ім. І.Пулюя.

Наукові інтереси:

- проектування верстатних систем.

Подано 24.05.2005