

**АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОПИСУ АГРЕГАТНО-МОДУЛЬНИХ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ
ДЛЯ ЇХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИБОРУ**

Розглядається можливість використання описів промислових роботів (ПР) з постійною кінематичною структурою для опису агрегатно-модульних ПР – роботів із змінною кінематичною структурою для їх вибору при автоматизованому проектуванні РТК механоскладання.

При вирішенні задач автоматизованого проектування роботизованих технологічних комплексів (РТК) механоскладання обов’язковою є задача вибору ПР [2, 5, 13, 18, 19]. Її вирішення можливе на основі формалізованого опису кінематичної структури ПР в цілому та її складових елементів – ланок для роботів з постійною кінематичною структурою [9] або окремих функціональних модулів для агрегатно-модульних (АМ) ПР [1, 3, 11].

Мета написання даної роботи – на основі аналізу існуючих методів формалізованого опису кінематичних структур ПР та їх складових обґрунтувати доцільність використання одного з них для вирішення задачі вибору ПР при автоматизованому проектуванні РТК механоскладання на базі АМ ПР.

Найбільш поширеним описом кінематичних структур ПР є їх представлення за видами елементарних рухів його складових елементів [12]. При цьому рухи ротації позначаються символом Р, а прямолінійні – П. Порядок позначення ланок (модулів) ПР – від стійки ПР до захватного пристрою. Для АМ ПР перший символ опису відповідає виду руху модуля, який є його основою (стійкою) і кріпиться до підлоги (безпосередньо або через проміжні конструктивні модулі) або до частин оточуючого технологічного обладнання, що входить до складу РТК. Другий символ в прийнятому описі відповідає модулю, що кріпиться на модуль-основі, і т. д. Останнє позначення відповідає модулю, на якому розміщується захватний пристрій ПР. При цьому ротація будь-якого з модулів поділяється на два типи: обертання Р_о та гойдання Р_г.

З урахуванням прийнятих позначень кінематична структура АМ ПР за рис. 1, а формалізовано представляється так:

$$ПР_о ПП П. \tag{1}$$

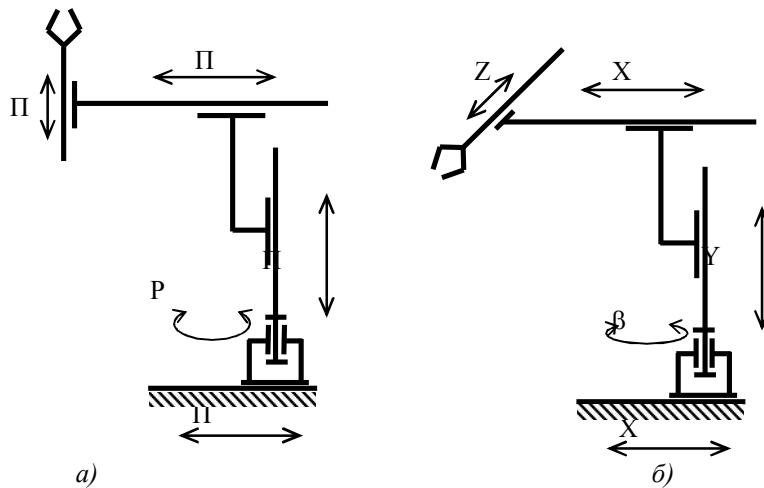


Рис. 1. Приклади кінематичних структур АМ ПР

Одним із основних недоліків такого опису АМ ПР є відсутність інформації про взаємне розташування окремих ланок.

Для ліквідації цього вводять символи “||” та “⊥”, які позначають відповідно паралельність та перпендикулярність спряжуваних пар модулів [16]. Тоді опис кінематичної схеми АМ ПР, зображеного на рис. 1, а, буде мати вигляд:

$$П ⊥ Р || П ⊥ П ⊥ П . \tag{2}$$

Проте, за таким описом неможливо визначити осі, вздовж/навколо яких відбуваються лінійні або кутові переміщення. Ця інформація є досить важливою для вирішення задачі вибору кінематичних структур АМ ПР тому, що кількість кінематичних структур таких ПР визначається не лише кількістю окремих

функціональних модулів, а й послідовністю розташування модулів один відносно одного та відносно координатних осей. Відсутність зазначеної інформації у формалізованому описі кінематичної структури АМ ПР є суттєвим недоліком цього опису.

Тому в деяких випадках при позначенні видів переміщень (П, Р) модулів вводять індекси X, Y, Z, якими позначають в прийнятому порядку осі елементарних рухів ланок в базовій системі координат [3]. В цьому випадку АМ ПР за рис. 1, а описується так:

$$P_X P_Y P_Y P_X P_Y . \tag{3}$$

Слід зауважити, що при таких позначеннях використання символів “||” та “⊥” створює інформаційну надлишковість опису, бо взаємне розташування осей є чітко визначеним відносно осей базової системи координат і для відображення паралельності та перпендикулярності суміжних осей пар модулів достатньо лише вказати розташування першої ланки, а положення інших відносно першої фіксується по замовчуванню.

Подальшим розвитком такого опису є введення позначень видів переміщень кожного модуля відносно координатних осей [19]. При цьому лінійні переміщення вздовж координатних осей X, Y, Z позначаються відповідно X, Y, Z, а обертоти навколо цих же осей – α, β, γ. Тому кінематична структура АМ ПР за рис. 1, а записується наступною послідовністю символів:

$$X \rightarrow \beta \rightarrow Y \rightarrow X \rightarrow Y . \tag{4}$$

Очевидно, що (4) можна розглядати як різновид (3). Опис (4), як і опис (3), не містить інформацію щодо величини відносних рухів окремих модулів, що є важливим при визначенні геометричних характеристик робочих зон АМ ПР [15, 17].

Використання наступного методу для формалізованого опису кінематичних структур АМ ПР відображає, крім видів рухів окремих модулів (П, Р), ще й відносне розташування пар модулів, що фіксує відповідний цифровий індекс 1...5 [6]. В табл. 1 наведені можливі структурні схеми дволанкових з'єднань модулів лінійного та обертового переміщень.

Таблиця 1

Відносне розташування осей суміжних пар модулів та відповідні їх структурні схеми

Особливості розташування осей суміжних пар модулів найменування	пар индекс	Структурна схема			
Паралельне	1	П ₁ П	Р ₁ П	П ₁ Р	Р ₁ Р
Перетинаються під прямим кутом	2	П ₂ П	Р ₂ П	П ₂ Р	Р ₂ Р
Схрещуються під прямим кутом	3	П ₃ П	Р ₃ П	П ₃ Р	Р ₃ Р
Перетинаються під довільним кутом	4	П ₄ П	Р ₄ П	П ₄ Р	Р ₄ Р
Схрещуються під довільним кутом	5	П ₅ П	Р ₅ П	П ₅ Р	Р ₅ Р

Кінематична структура АМ ПР за рис. 1, б з використанням такого опису є наступною:

$$P_2 P_1 P_2 P_2 P . \tag{5}$$

Проте, аналогічно описується і кінематична структура ПР за рис. 1, а, тобто має місце неоднозначність формалізованого опису та відповідної йому конструктивної реалізації кінематичної структури ПР, що вказує на недоцільність використання методу [6] для розглядуваних задач.

Згідно з іншим методом формалізованого опису кінематичних структур АМ ПР [4], формується матриця R_i [n×6] можливих рухів кожного i-го модуля відносно осей базової системи координат. Кожен елемент цієї матриці характеризує рухомість окремого модуля в напрямку або навколо однієї з координатних осей і приймає значення: 1 – якщо рух можливий, або 0 – в протилежному випадку. Зміст розмірності матриці визначається кількістю модулів n та розрядами (від 1 до 6), що відповідають символам можливих рухів кожного із модулів (табл. 2).

Вихідну інформацію, представлену у вигляді матриць можливих рухів окремих модулів, можна підготувати для її подальшого автоматизованого опрацювання у напрямку класифікації рухів модулів як носіїв ознак рухомості кінематичних структур [4]. Для цього матрицю R_{ij}, представлену у двійковому численні, переводять у числа десяткового числення за відомими правилами:

$$R_{ij} = 2^0 b_x + 2^1 b_y + 2^2 b_z + 2^3 b_A + 2^4 b_B + 2^5 b_C ,$$

де b – булева змінна, що приймає значення:

$$b = \begin{cases} 1, & \text{якщо рух у заданому напрямку можливий;} \\ 0 & \text{– у протилежному випадку.} \end{cases}$$

Таблиця 2

Матриця R_i [n×6] можливих рухів функціональних модулів

Розряд	1	2	3	4	5	6

При визначенні РЗ маніпулятора цим методом записують у відповідності з його структурною схемою вирази (6) та обчислюють за ними значення x_{ki}, y_{ki}, z_{ki} для всіх поєднань q_i^- та q_i^+ , що дозволяє записати вирази для областей (D_i) та (\bar{D}_i) .

Наприклад, РЗ маніпулятора ПР-35 (рис. 2) отримується в результаті наступних послідовних відображень: точки K в дугу K_1K_2 , радіуса CK внаслідок обертання в шарнірі C на кут від φ_2^- до φ_2^+ , дуги K_1K_2 в область $K_1K_2K_3K_4$ в результаті обертання в шарнірі B на кут від φ_1^- до φ_1^+ , область $K_1K_2K_3K_4$ в РЗ в результаті обертання в шарнірі A .

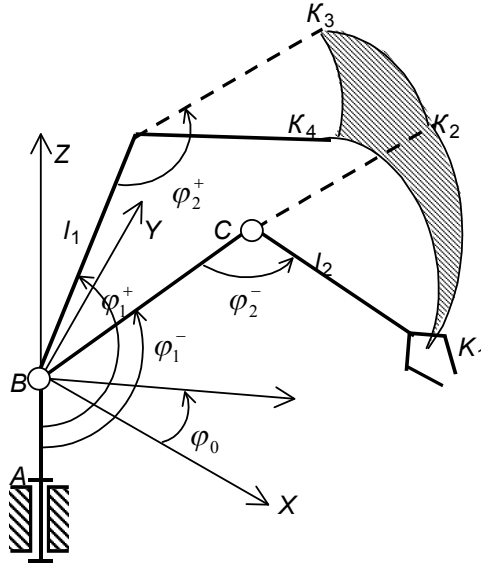


Рис. 2. Опис робочої зони маніпулятора ПР-35 з використанням R-функцій

Розглянемо опис лише перетину РЗ площиною, яка проходить через вісь Z . Область, яка зайнята РЗ, буде:

$$(D) = (\bar{D}_1) \cap (D_2) \cap (\bar{D}_3) \cap (D_4).$$

Кожній i -й області (D_i) відповідають функції:

$$(D_i) \rightarrow f_i \geq 0; (\bar{D}_j) \rightarrow \bar{f}_j \geq 0,$$

де

$$\begin{aligned} f_i &= f_{xi} \wedge f_{zi} \geq 0; \bar{f}_j = \bar{f}_{xj} \wedge \bar{f}_{zj} \geq 0; i = \bar{1}, 4; i = \bar{1}, 4; i \neq j; \\ f_{xi} &= x_i - x \geq 0; f_{zi} = z_i - z \geq 0; \bar{f}_{xj} = x - x_j \geq 0; \bar{f}_{zj} = z - z_j \geq 0; \\ x_1 &= l_1 \cos \varphi_1^- - l_2 \cos(\varphi_1^- + \varphi_2) \cos \varphi_0; z_1 = l_1 \sin \varphi_1^- - l_2 \sin(\varphi_1^- + \varphi_2); \\ x_2 &= l_1 \cos \varphi_1^+ - l_2 \cos(\varphi_1^+ + \varphi_2) \cos \varphi_0; z_2 = l_1 \sin \varphi_1^+ - l_2 \sin(\varphi_1^+ + \varphi_2); \\ x_3 &= l_1 \cos \varphi_1 - l_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2^+) \cos \varphi_0; z_3 = l_1 \sin \varphi_1 - l_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2^+); \\ x_4 &= l_1 \cos \varphi_1 - l_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2^-) \cos \varphi_0; z_4 = l_1 \sin \varphi_1 - l_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2^-), \end{aligned}$$

тобто

$$\begin{aligned} f &= \bar{f}_1 \wedge f_2 \wedge \bar{f}_3 \wedge f_4 = \bar{f}_1 + f_2 - |\bar{f}_1 - f_2| + \bar{f}_3 + \\ &+ f_4 - |\bar{f}_1 + f_2 - |\bar{f}_1 - f_2| - f_3 - f_4| + |f_3 - f_4| \geq 0. \end{aligned}$$

Серед недоліків розглянутого методу формалізованого опису РЗ ПР є його достатні громіздкість та складність, що вимагає спеціальної підготовки проєктувальника.

Значно простіший для розуміння та реалізації є метод опису просторово-кінематичних структур (ПКС) ПР [8].

Згідно з цим методом, опис кожної i -ої ланки ПР представляється у вигляді:

$$l_{ic} O_i \tau_i (l_{iv}),$$

де l_{ic} – розмір i -ої ланки, що визначається особливостями її конструкції, так звана міжланкова відстань (постійна частина розміру ланки);

O_i – позначення осі, вздовж якої конструктивно розташована i -та ланка, $O_i \in \{X, Y, Z\}$;

τ_i – вид руху i -ої ланки в термінах віртуальних елементів – операторів координатних напрямків (ОКН). Під ними розуміють елементарні рухи схвату ПР, що ідентифіковані одиничними векторами координатних напрямків переміщення схвату вздовж та/або навколо осей прийнятої за базову правої системи координат. Якщо i -а ланка прямолінійно переміщується вздовж або паралельно осі її конструктивного розташування (тобто при $O_i \parallel \tau_i$), то τ_i по замовчуванню не вказується; якщо вказані переміщення відсутні, то $\tau_i = 0$:

$$\tau_i = \begin{cases} X, Y, Z, A, B, C, O & \forall \tau_i \parallel O_i \\ A, B, C, O & \forall \tau_i \parallel O_i \end{cases};$$

l_{iv} – величина переміщення i -ої ланки (змінна частина розміру для лінійних переміщень):

$$l_{iv} \in \{[X], [Y], [Z], [A], [B], [C]\};$$

X, Y, Z – позначення лінійних ОКН, що виконуються вздовж однойменних координатних осей;

A, B, C – позначення обертальних ОКН навколо осей X, Y, Z відповідно;

$[X], [Y], [Z]$ – абсолютні величини переміщень при відпрацюванні відповідних однойменних ОКН;

$[A], [B], [C]$ – абсолютні величини обертальних переміщень i -ої ланки відповідно навколо осей X, Y, Z .

Таким чином, в загальному випадку ПКС r -ої моделі ПР представляє собою упорядковану множину (кортеж) послідовно з'єднаних операторами зв'язку S в напрямку від стійки до схвату формалізованих описів ланок кінематичного ланцюга маніпулятора ПР:

$$\begin{aligned} \text{ПКС}(r) = \{l_{ic}, O_i, \tau_i, l_{iv}, S_j, K_{O_i} \mid & i = \overline{1, I-1}; \\ l_{ic} \in \{[X], [Y], [Z]\}; & \\ O_i \in \{X, Y, Z\}; & \\ l_{iv} \in \{[X], [Y], [Z], [A], [B], [C]\}; & \\ S_j \in \{\vee, \nabla, \wedge\}, j = \overline{1, I-1}; & \\ \tau_i = \begin{cases} X, Y, Z, A, B, C, O & \forall \tau_i \parallel O_i \\ A, B, C, O & \forall \tau_i \parallel O_i \end{cases} & \end{aligned} \quad (7)$$

де I – загальна кількість ланок кінематичного ланцюга r -го ПР;

$S = \{\vee, \nabla, \wedge\}$ – знаки диз'юнкції, роздільної диз'юнкції та кон'юнкції, що позначають порядок реалізації ОКН (відносну рухливість ланок) і змістовно відповідають однойменним операціям математичної логіки;

K_{O_i} – умовне позначення кінцевого елемента кінематичного ланцюга ПР – схвату із зазначенням осі, вздовж або паралельно якій можливий підхід схвату до об'єкта маніпулювання (заготовки, деталі), робочої позиції тощо.

Такий опис є достатньо інформативним, але не враховує особливості конструкції окремих функціональних модулів АМ ПР [1, 3, 11].

Тому подальшим розвитком (модифікацією) цього методу є опис кінематичних структур АМ ПР, що враховує тип конструкції модулів та варіативність їх просторових розташувань [7]. При цьому опис i -го функціонального модуля представляється виразом:

$$l_{ic} O_i \tau_i (l_{iv}) T, \quad (8)$$

де T – ознака типу модуля згідно з проведеною класифікацією:

$$T = \begin{cases} 1, \text{ якщо модуль "звичайний" (1-й тип);} \\ 2 - \text{ "рухомий габарит" (2-й тип);} \\ 3 - \text{ "нерухомий габарит" (3-й тип);} \\ 4 - \text{ "повороту" (4-й тип);} \\ 5 - \text{ "константа" (5-й тип).} \end{cases}$$

Причому вводиться додаткова інформація відносно можливого розташування окремих модулів в прийнятій системі координат, тобто вздовж осей X, Y, Z , а також варіанти конструктивних з'єднань окремих модулів.

Сказане представляється квадратною матрицею $M [n \times n]$, де n – кількість окремих функціональних модулів агрегатно-модульного комплексу, що розглядається. Кожен i -й рядок ($i = \overline{1, n}$) цієї матриці розглядається як базовий модуль, з яким можливе sprzęження j -го модуля цього ж набору ($j = \overline{1, n}$) – стовпця матриці M .

Елементи цієї матриці вказують на можливі конструктивні спряження i -го модуля (бази) з j -им модулем (приєднувальним елементом). Неможливість спряження відображається пустими елементами матриці $M [n \times n]$.

Непусті елементи цієї матриці, в свою чергу, теж представляють собою матрицю розміром 3×3 , де 1-й рядок – відповідає можливому з'єднанню i -го модуля по осі X , 2-й – по осі Y , 3-й – по осі Z . Відповідно 1-й стовпець відповідає можливому розташуванню j -го модуля вздовж осі X , 2-й – вздовж осі Y , 3-й – вздовж осі Z .

Узагальнюючи, можна констатувати наявність різноманітних методів формалізованого опису кінематичних структур ПР АМК, кожен з яких має переваги та недоліки.

Перший, розглянутий метод (вираз (1)) є найбільш простим і містить лише інформацію про види руху модулів, що входять до складу кінематичної структури ПР.

Наступні розглянуті символічні описи є аналогами та різновидами один одного (вирази (2)–(5)). З точки зору інформації, що закладена в них, вони є більш досконалими, бо містять інформацію як про вид руху модулів, так і про взаємне розташування суміжних ланок.

Перевагою формалізованого опису ПР матрицями відносних рухів R_{ij} є те, що матриця R_{ij} може бути сформована автоматично на основі вихідної інформації про окремі модулі, заданої матрицями можливих рухів $R_i [n \times 6]$. Проте такий опис, як і попередні, не містить даних про розміри модулів та величини їх переміщень. До того ж за таким описом неможливо визначити порядок розташування модулів в кінематичній структурі ПР.

За допомогою R -функцій описуються робочі зони ПР, що є важливим при розв'язуванні задач планування елементів РТК. Однак цей метод досить складний та громіздкий.

Значно досконалішим є опис ПР за допомогою ПКС (вираз (7)), що дозволяє визначити:

- типи рухів модулів;
- порядок розташування модулів у кінематичній структурі;
- розміри постійних частин всіх ланок кінематичної структури;
- розміри переміщень рухомих модулів;
- осі, вздовж яких конструктивно розташовані окремі ланки;
- відносну рухливість ланок;
- вісь, вздовж або паралельно якої можливий підхід схвату до об'єкта маніпулювання, робочої позиції тощо.

Проте різні модулі мають конструктивні особливості, що визначаються їх типами. Відсутність можливості розрізнити такі типи приводить до неоднозначного трактування значень, закладених в описі окремих ланок, що в сукупності утворюють ПКС.

Останній метод формалізованого опису враховує вказаний поділ модулів на типи, є найбільш повним за змістом інформації про кінематичні структури АМК ПР, і тому його доцільно використовувати в інтегрованій САПР РТК механоскладання, що розробляється в ЖІТІ [10].

ЛІТЕРАТУРА:

1. Агрегатно-модульная система средств автоматизации механообработки изделий приборостроения. АСАМС. Каталог. – М.: Техноприбор, 1984. – 36 с.
2. Бурдаков С.Ф. и др. Проектирование манипуляторов ПР и роботизированных комплексов / С.Ф. Бурдаков, В.А. Дьяченко, А.Н. Тимофеев. – М.: Высш. шк., 1986. – 264 с.
3. Воробьев Е.И. и др. Промышленные роботы агрегатно-модульного типа / Е.И. Воробьев, Ю.Г. Козырев, В.И. Царенко; Под ред Е.П. Попова. – М.: Техника, 1989. – 150 с.
4. Гавриш А.П., Ямпольский Л.С. Гибкие робототехнические системы. – К.: Выща шк., 1989. – 407 с.
5. Давыгора В.Н., Кирилович В.А. Автоматизированный выбор роботов по кинематическим требованиям сборочной технологии. – К.: Об-во "Знание Украины", 1991. – 24 с.
6. Заблонский К.И. и др. Оптимальный синтез схем манипуляторов промышленных роботов / К.И. Заблонский, Н.Т. Монашко, Б.М. Щекин. – Т.: Техника, 1989. – 150 с.
7. Кирилович В., Сачук І. Формалізований опис функціональних модулів механоскладальних агрегатно-модульних промислових роботів // Technologia i utomatyzacja montazu. –Rzeszow, Poland. – 2000. – № 4 (польск., в друці).
8. Кирилович В.А., Ковальчук П.М. Формалізація просторово-кінематичних структур промислових роботів // Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. – 1994. – № 1. – С. 40–46.
9. Козырев Ю.Г. Промышленные роботы: Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 403 с.
10. Колодницкий М.М., Кирилович В.А., Банацький Ф.В. Інтегрований програмний комплекс САПР РТК машинобудування // Праці Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 100-річчю механіко-машинобудівного і 50-річчю зварювального факультетів КПІ. Прогресивна тех-

- ніка і технологія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва. – Київ, 25–28 травня, 1998 р. – Т. II. – С. 403–407.
11. Комплекс “Каскад”. Комплекс технических средств для построения перепрограммируемых манипуляционных систем с пневмоприводом. Каталог. – Смоленское научно-производственное объединение “Техноприбор”, 1989. – 23 с.
 12. *Костюк В.И., Гавриш А.П., Ямпольский Л.С., Карлов А.Г.* Промышленные роботы. – К.: Вища шк., 1985. – 359 с.
 13. Робототехнические системы в сборочном производстве / Под ред. Е.В. Пашкова. – К.: Вища шк., 1987. – 272 с.
 14. Справочник по промышленной робототехнике: в 2-х кн.: Пер. с англ. Д.Ф. Миронова и др. / Под ред. Ш.Нофа. – Машиностроение, 1989.
 15. *Спыну Г.А.* Промышленные роботы. Конструирование и применение. – К.: Выща шк., 1991. – 311 с.
 16. *Челпанов И.Б.* Устройство промышленных роботов. – Л.: Машиностроение, 1990. – 223 с.
 17. *Шахинтур М.* Курс робототехники: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 527 с.
 18. *Ямпольский Л.С., Полищук М.М., Ткач М.М.* Автоматизированные системы технологической подготовки робототехнического производства. – К.: Вища школа, 1987. – 271 с.
 19. *Ямпольский Л.С., Яхимович В.А., Вайсман Е.Г.* и др. Промышленная робототехника / Под ред. Л.С. Ямпольского. – К.: Техніка, 1984. – 264 с.
 20. *Kyrylovych V., Banatsky F.* Formalization of task of design the mechanical-processing robot-engineering complexes // MECHANICS 2000. Proceedings of the International Scientific Conference. Vol. 1. – Rzeszow, Poland, June, 2000. – P. 217–233.

КИРИЛОВИЧ Валерій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації і комп’ютеризованих технологій Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- автоматизація виробничих процесів механоскладання;
- автоматизація технологічної підготовки механоскладального виробництва.

САЧУК Ілона Володимирівна – магістрант кафедри автоматизації і комп’ютеризованих технологій Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- автоматизація технологічної підготовки механоскладального виробництва.

Подано 27.11.1999.