

УДК 621.9.06:531.1

Г.В. РУДАКОВА, С.А. РУСАНОВ, С.В. РЕВЕНКО  
Херсонський національний технічний університет**РОЗРОБКА СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ  
ПРОЕКТУВАННЯ КАРКАСНИХ УСТАНОВОК З МЕХАНІЗМАМИ  
ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ**

*Проведено аналіз плоских механізмів із замкненими кінематичними ланцюгами із застосуванням процедури побудови планів векторів швидкостей. Виведено аналітичні залежності для шуканої швидкості вихідної ланки установки з механізмами паралельної структури, показано області рішень, з метою встановлення параметричних зв'язків кінематики із геометрією компоновки з напрямними, що перетинаються у просторі. Ґрунтуючись на отриманих виразах, розроблено спеціалізоване програмне забезпечення TAngle для визначення шуканої швидкості вихідної ланки.*

*Ключові слова: спеціалізоване програмне забезпечення, механізми паралельної структури, кінематика, каркасна багатоприводна установка, графоаналітичний метод, TAngle.*

А.В. РУДАКОВА, С.А. РУСАНОВ, С.В. РЕВЕНКО  
Херсонский национальный технический университет**РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАРКАСНЫХ УСТАНОВОК С МЕХАНИЗМАМИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ  
СТРУКТУРЫ**

*Проведен анализ плоских механизмов с замкнутыми кинематическими цепями с применением процедуры построения планов векторов скоростей. Выведены аналитические зависимости для искомой скорости выходного звена установки с механизмами параллельной структуры, показано области решения с целью установления параметрических связей кинематики с геометрией компоновки с направляющими, которые пересекаются в пространстве. Основываясь на полученных выражениях, разработано специализированное программное обеспечение TAngle для определения искомой скорости выходного звена.*

*Ключевые слова: специализированное программное обеспечение, механизмы параллельной структуры, кинематика, каркасная многоприводная установка, графоаналитический метод, TAngle.*

G.V. RUDAKOVA, S.A. RUSANOV, S.V. REVENKO  
Kherson National Technical University**DEVELOPMENT OF THE SPECIALIZED SOFTWARE FOR DESIGNING FRAME  
INSTALLATIONS WITH MECHANISMS OF THE PARALLEL STRUCTURE**

*Analysis of plane mechanisms with closed kinematic circuits is carried out using the procedure for constructing velocity vector plans. Analytic dependences for the required speed of the output link of the installation with mechanisms with parallel structure are derived, the solution domains are shown with the aim of establishing parametric links of the kinematics with the geometry of the arrangement with the guides that intersect in space. Based on the received expressions, the specialized software TAngle was developed to determine the sought-for speed of the output link.*

*Keywords: specialized software, mechanisms with parallel structure, kinematics, wireframe multidrive system, graph-analytical method, TAngle.*

**Постановка проблеми**

В інженерній практиці сучасної промисловості значну частину займають задачі керування складним технологічним обладнанням при виготовленні виробів з будь-яких матеріалів, що передбачають складні траєкторії і комбінації рухів виконавчого органу, що несе інструмент(заготовку) або об'єкт над яким виконуються робочі маніпуляції.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Каркасні багатоприводні установки є багатофункціональними і універсальними, оскільки мають достатній потенціал для ефективного вирішення багатьох промислових завдань. Це викликає складнощі у виборі конструктивної схеми або компоновки такого обладнання, яке зазвичай має просторове розташування приводів із замкненими кінематичними ланцюгами [1]. Для ефективного використання

такі установки повинні мати сучасні комп'ютеризовані системи управління та чіткі технічні засоби проектування, що побудовані на аналізі кінематичних закономірностей з параметричними зв'язками.

При проектуванні каркасних установок з механізмами паралельної структури (МПС) на початковому етапі після вибору структури компоновки потрібно виконати аналіз кінематичних закономірностей для обраного конструктиву, а саме: можливі діапазони переміщення та плани швидкостей рухомих елементів конструкції.

Для скорочення часу, що витрачається при визначенні кінематичних характеристик окремого варіанту компоновки, доцільно розробити спеціалізовані програмні модулі, в яких реалізовані необхідні алгоритми.

#### Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка процедури аналізу каркасних установок з механізмами паралельної структури (МПС), яка має базуватися на методах побудови планів основних кінематичних параметрів та надає можливість визначати потрібні конструктивні і швидкісні параметри приводів на стадії проектування в ракурсі рішення прямої задачі кінематики.

Дослідження проводилось у рамках держбюджетної теми «Розробка технічних засобів наскрізного проектування, виготовлення і керування технологічним, маніпулюючим та верстатним обладнанням каркасних просторових компонок», номер держреєстрації № РК 0117U004296.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

Розглянемо каркасну установку з МПС, коли рух інструменту здійснюється у вертикальній площині. Кінематична схема симетричної установки з двома направляючими штангами наведена на рис. 1.

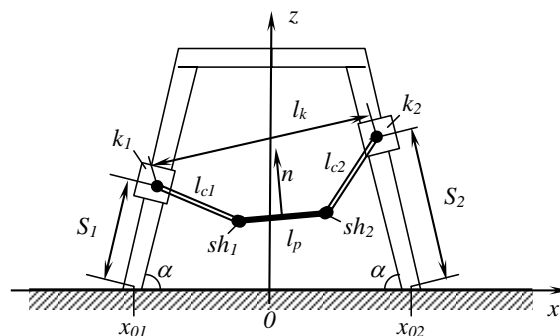


Рис. 1. Кінематична схема симетричної каркасної установки

Геометричні розміри елементів установки задаються на стадії проектування і виготовлення  $l_{c1}$ ,  $l_{c2}$ ,  $l_p$  - довжини стержнів (балочних елементів)  $c_1$ ,  $c_2$  і майданчика  $p$ , на якому встановлюється робочий інструмент;  $\alpha$  - кут нахилу консолей (направляючих штанг) до горизонтальної поверхні. Відомими вважаються відстань між опорами  $d = -x_{01} = x_{02}$ , а також первинні положення  $S_{01}$  і  $S_{02}$  кареток  $k_1$  і  $k_2$ .

Координати центру робочого майданчика  $(x_c, z_c)$  і кут відхилення нормалі від вертикальної осі  $\varphi$  визначається з аналітичного опису зв'язків координат конструкції, який базується на використанні наступних залежностей [2]:

1. Координати  $(x_{k_i}, z_{k_i})$  місця розташування кареток  $k_i$  можна визначити із співвідношень

$$x_{k_i} = S_i \cdot \cos \alpha + x_{0i}, \quad z_{k_i} = S_i \cdot \sin \alpha + z_{0i}, \quad i = 1, 2. \quad (1)$$

2. Координати  $(x_{s_i}, z_{s_i})$  місця розташування шарнірів  $sh_i$  можуть бути знайдені з рівнянь їх можливого переміщення по колу

$$(x_{s_i} - x_{k_i})^2 + (z_{s_i} - z_{k_i})^2 = l_{ci}^2, \quad i = 1, 2. \quad (2)$$

3. Рівняння жорсткого зв'язку шарнірів, обумовленого наявністю робочого майданчика  $p$

$$(x_{s1} - x_{s2})^2 + (z_{s1} - z_{s2})^2 = l_p^2. \quad (3)$$

Поточні координати положення центру майданчика  $(x_c, z_c)$  визначаються як

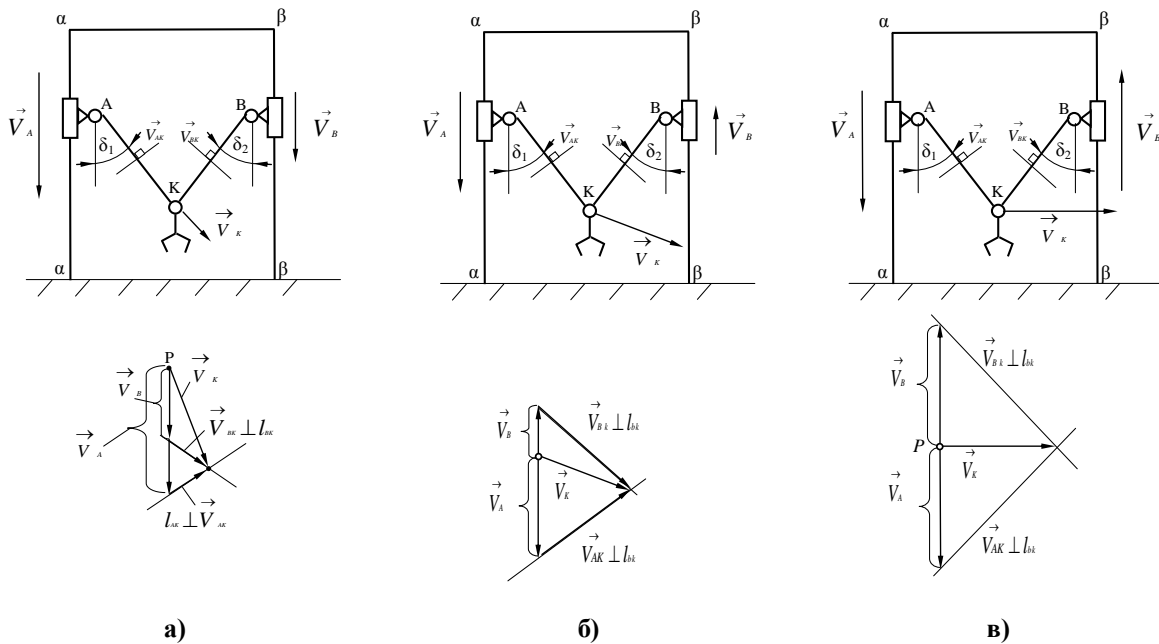
$$x_c = \frac{x_{s1} + x_{s2}}{2}, z_c = \frac{z_{s1} + z_{s2}}{2}. \quad (4)$$

Кут відхилення  $\varphi$  нормалі до центру платформи  $\vec{n}$  від вертикальної осі  $\vec{z}$  розраховується за допомогою співвідношення

$$\varphi = -\beta_1 = -\arctan \frac{z_{s2} - z_{s1}}{x_{s2} - x_{s1}}. \quad (5)$$

Основою розв'язання прямої задачі кінематики, можна дати оцінку граничним можливостям переміщення майданчика з робочим органом [3]. Для аналізу динаміки (можливих швидкостей переміщення елементів каркасної установки), доцільно застосовувати графоаналітичний метод.

Розглянемо спрощену схему каркасної установки зображеної на рис.1 для випадку  $l_{r1} = 0, \alpha = 90^\circ$ . Приклади побудови планів швидкостей ланок МПС і визначення вектору швидкості вихідної ланки  $V_K$  для різних випадків співвідношення та напрямку  $V_A$  і  $V_B$  наведено на рис. 2.



**Рис. 2. Плани швидкостей ланок МПС і вектору швидкості вихідної ланки  $\vec{V}_K$  для різних випадків:**

а)  $\vec{V}_A \downarrow \downarrow \vec{V}_B, \vec{V}_A > \vec{V}_B$ ; б)  $\vec{V}_A \downarrow \uparrow \vec{V}_B, \vec{V}_A > \vec{V}_B$ ; в)  $\vec{V}_A \downarrow \uparrow \vec{V}_B, \vec{V}_A = \vec{V}_B$

Такі МПС з двома координатами стали традиційними у виробництві маніпуляторів та 3d-принтерів з паралельними напрямними  $\alpha$ - $\alpha$ ,  $\beta$ - $\beta$ , замкненим кінематичним ланцюгом і приводними каретками А і В.

Побудова планів імовірних швидкостей має відповідати векторним рівнянням:

$$\begin{aligned} \vec{V}_K &= \vec{V}_B + \vec{V}_{BK}; \vec{V}_K = \vec{V}_A + \vec{V}_{AK}; \vec{V}_A + \vec{V}_{AK} = \vec{V}_B + \vec{V}_{BK}; \\ \vec{V}_A &\parallel \alpha - \alpha; \vec{V}_{AK} \perp l_{AK}; \vec{V}_B \parallel \beta - \beta; \vec{V}_{BK} \perp l_{BK}. \end{aligned} \quad (6)$$

Пряму задачу кінематики з відповідними векторами  $V_A$  і  $V_B$  можна вирішити в наступній послідовності :

$$1) \vec{V}_A \rightarrow \vec{V}_{AK}; 2) \vec{V}_B \rightarrow \vec{V}_{BK}; 3) \vec{V}_{AK} \cup \vec{V}_{BK}; 4) P \rightarrow \vec{V}_{AK} \cup \vec{V}_{BK} = \vec{V}_K. \quad (7)$$

При розв'язуванні зворотної задачі кінематики шуканими параметрами є  $V_A$  і  $V_B$ , а заданими  $V_K$ , а побудова здійснюється за алгоритмом (7) у зворотній послідовності.

Можливі декілька варіантів комбінацій векторів  $V_A$  і  $V_B$  та їх співвідношень по модулю (рис. 1). В промислових умовах інженер повинен мати увесь діапазон рішень без втрат часу на відтворення планів

швидкостей графічно. Зв'язок параметру кута нахилу штанг  $\delta_1$  і  $\delta_2$  із швидкістю встановлюється як показано на рис. 2:

1. Випадок  $\vec{V}_A \downarrow \downarrow \vec{V}_B$  (рис.2, а):

$$V_{AK} = \frac{\sin(90 - \delta_2) \cdot (V_A - V_B)}{\sin(90 - \delta_1) \cdot \cos(90 - \delta_2) + \cos(90 - \delta_1) \cdot \sin(90 - \delta_2)},$$

$$V_{BK} = \frac{\sin(90 - \delta_1) \cdot (V_A - V_B)}{\sin(90 - \delta_1) \cdot \cos(90 - \delta_2) + \cos(90 - \delta_1) \cdot \sin(90 - \delta_2)};$$

2. Випадок  $\vec{V}_A \downarrow \uparrow \vec{V}_B$  (див. рис.2, б):

$$V_{AK} = \frac{\sin(90 - \delta_2) \cdot (V_A + V_B)}{\sin(90 - \delta_1) \cdot \cos(90 - \delta_2) + \cos(90 - \delta_1) \cdot \sin(90 - \delta_2)},$$

$$V_{BK} = \frac{\sin(90 - \delta_1) \cdot (V_A + V_B)}{\sin(90 - \delta_1) \cdot \cos(90 - \delta_2) + \cos(90 - \delta_1) \cdot \sin(90 - \delta_2)}.$$

Розрахункову схему для визначення швидкості переміщення робочого органу  $V_K$  показано на рис.3.

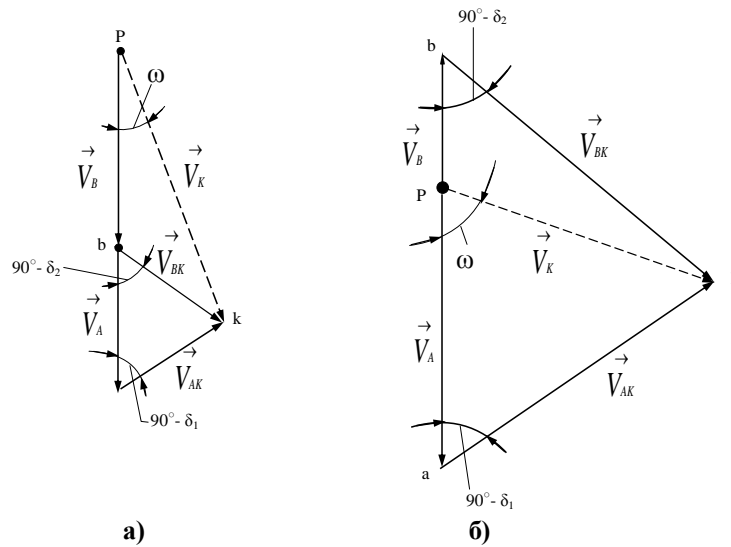


Рис. 3. Розрахункова схема для визначення швидкості  $V_K$  вихідної ланки (робочого органу)

а) - для  $\vec{V}_A \downarrow \downarrow \vec{V}_B$ , б) - для  $\vec{V}_A \downarrow \uparrow \vec{V}_B$

Швидкість точки  $K$  вихідної ланки з урахуванням (8) і (9) встановлюється як:

$$V_K = \sqrt{\left( V_B \frac{\cos(\delta_1)(V_A - V_B) \cdot \sin(\delta_2)}{\cos(\delta_1) \sin(\delta_2) + \sin(\delta_1) \cos(\delta_2)} \right)^2 + \frac{\cos(\delta_1)^2 (V_A - V_B)^2 \cdot \sin(\delta_2)^2}{(\cos(\delta_1) \sin(\delta_2) + \sin(\delta_1) \cos(\delta_2))}} \quad (10)$$

Кут вектору  $\vec{V}_K$  з вертикальною віссю згідно з рис.3 визначається як:

$$\omega = \arcsin \left( \frac{\cos(\delta_2)(V_A - V_B) \cos(\delta_1)}{(\cos(\delta_1) \sin(\delta_2) + \sin(\delta_1) \cos(\delta_2)) \cdot V_A} \right) \quad (11)$$

При конструюванні обладнання з МПС застосовуються установки з непаралельними прямими, які з'єднані під різними кутами  $\theta$ . Також, згідно з векторними рівняннями, застосовують метод побудови планів швидкостей ланок (6). Результати обчислень областей рішень швидкості  $V_K$  за рівнянням (10) та кута нахилу векторів за рівнянням (11) при значенні векторів швидкостей в діапазоні  $V_A - V_B \in \{0, 20, 40, 60\}$  мм, наведено на рис. 4.

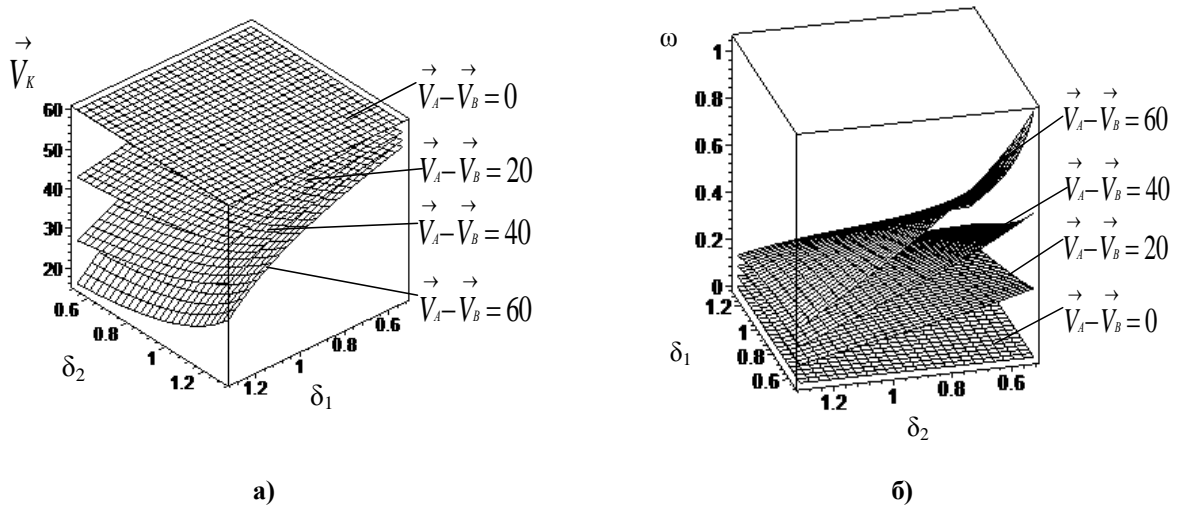


Рис. 4. Область обчислених рішень для значень: а) швидкості  $V_K$ ; б) кута  $\omega$  нахилу вектора швидкості  $V_K$

На рис. 5 наведено плани для визначення швидкостей графоаналітичним методом.

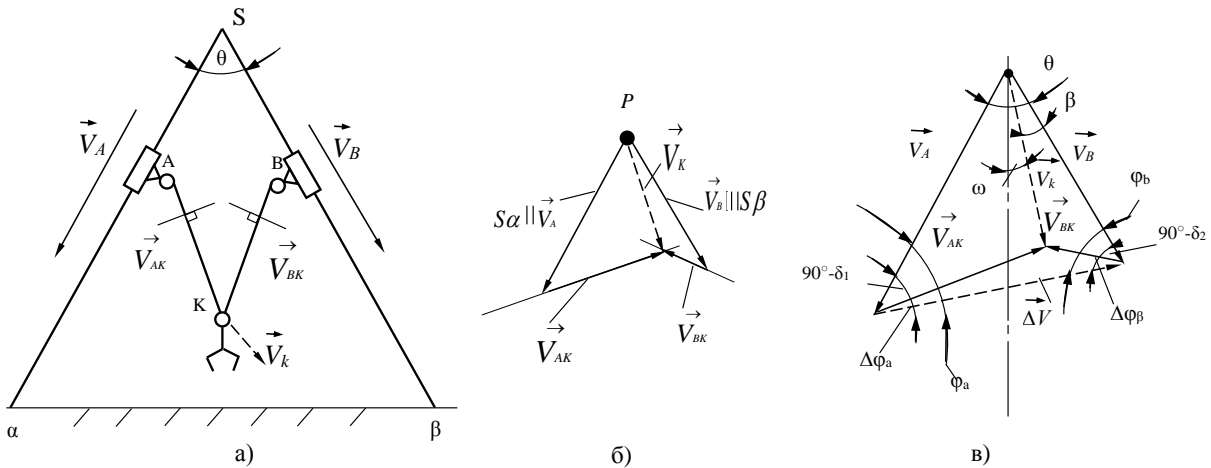


Рис. 5. Приклад застосування графоаналітичного методу планів для визначення швидкостей: а) кінематична схема механізму; б) план швидкостей; в) розрахункова схема для визначення швидкості  $V_K$

Швидкість  $\vec{V}_K$  вихідної ланки плоского двохкоординатного МПС і кут  $\omega$  вектора швидкості з вертикальною віссю з напрямними з нахилом під кутом  $\theta$  при вершині визначається як

$$V_K = \sqrt{V_A^2 + V_{AK}^2 - 2V_A \cdot V_{AK} \cdot \cos(90 - \delta_1)}, \quad (12)$$

$$\omega = \frac{\theta}{2} - \beta, \quad (13)$$

де  $\beta = \arcsin\left(\frac{V_B}{V_K} \sin(90 - \delta_2)\right) + \delta_2 - 90$ .

Розрахунок за рівняннями (12) і (13) для кута  $\theta=30^\circ$  при вершині МПС та значенні  $\vec{V}_B=20$  мм/с в діапазонах  $\delta_1$  і  $\delta_2$  і  $\vec{V}_A=0, 20, 40, 60$  мм/с наведено на рис. 6.

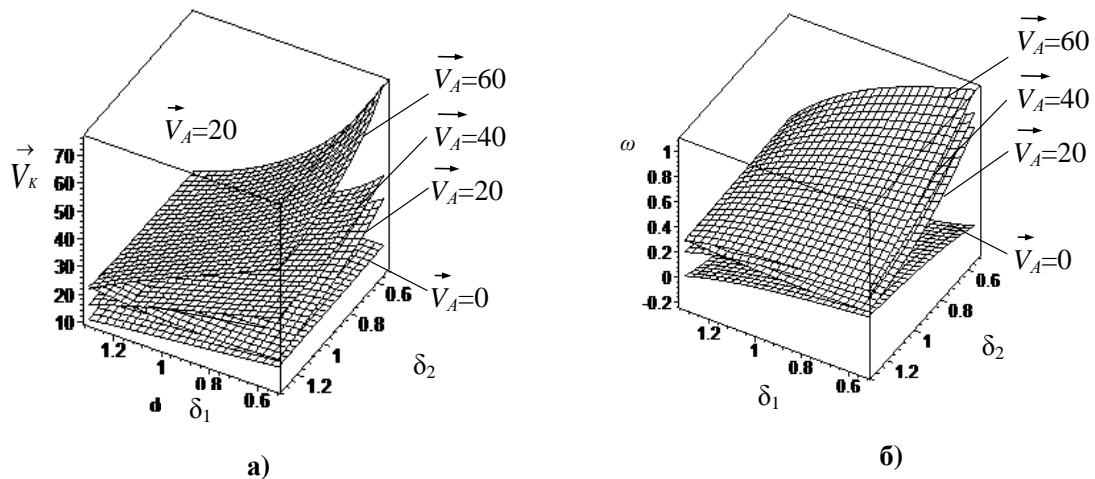


Рис. 6. Приклад застосування графоаналітичного методу планів:  
а) при визначенні швидкостей, б) при визначенні кутів

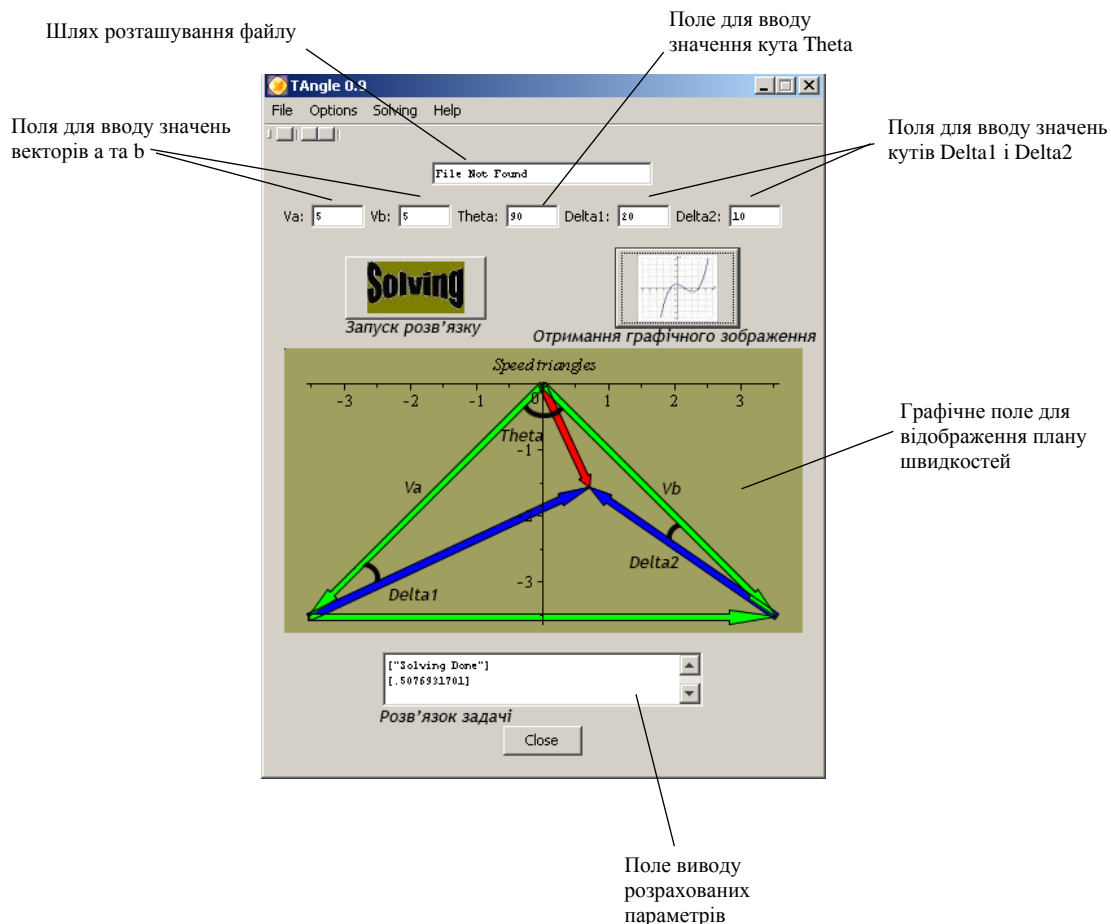


Рис. 7. Зовнішній вигляд робочого вікна програми TAngle

На основі отриманих виразів та залежностей було розроблено спеціалізоване програмне забезпечення Tangle (рис. 7), яке дозволяє здійснювати аналіз кінематичних параметрів каркасної установки з МПС, що проектується.

Дана програма розв'язує пряму задачу кінематики, де задаються параметри векторів  $V_A$  і  $V_B$ , а також значення кутів  $\delta_1$  і  $\delta_2$ . TAngle графічно відтворює план зв'язку швидкостей та кутів нахилу штанг установки з МПС, та показує, положення робочого органу при заданих параметрах.

#### Висновки

У даній роботі розглянуто метод побудови планів векторів швидкостей і його застосування для аналізу плоских механізмів із замкненими кінематичними ланцюгами. Проаналізовано різні випадки за напрямом і співвідношенням заданих значень швидкостей приводів для розв'язання прямої задачі кінематики.

За отриманими даними та залежностями було розроблено спеціалізований програмний модуль, що реалізує процедуру аналізу кінематичних характеристик установок з МПС., який може використовуватися як складова частина системи автоматизованого проектування. Для вибору окремих електродвигунів у багатоприводну систему технологічного обладнання каркасної установки після визначення діапазонів переміщення та швидкостей руху елементів конструкції наступним етапом є аналіз силових навантажень в устаткуванні. Процедура динамічного аналізу може бути реалізована як окремий спеціалізований програмний модуль у системі автоматизованого проектування.

#### Список використаної літератури

1. Кузнецов Ю.М. Компонировка верстатов с механизмами параллельной структуры: Монография / Ю.М. Кузнецов, Д.О. Дмитриев, Г.Ю. Діневич; під ред. Ю.М. Кузнецова. – Херсон: ПП Вишемирський В.С., 2009. -456 с.
2. Гриньов Б.В. Аналітична геометрія : підручник для вищ. техніч. навч. закладів / Б.В. Гриньов, І.К. Кириченко. - Харків : Гімназія, 2008. - 340 с.
3. Ревенко С.В. Компьютеризированная система управления многоприводной каркасной установкой / С.В. Ревенко, А.В. Рудакова, А.А. Омельчук // Матеріали V Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених з автоматичного управління присвяченої дню космонавтики, 12 квітня 2017 р., м. Херсон, С. 216-218.
4. Пат. 66672 Україна, МПК: В23В 39/00, В23Q 1 Діневич /. Свердильно-фрезерний верстат / Дмитриев Д.О., Фіранський В.Б., Кузнецов Ю.М. - u201108142; заявл. 29.06.2011; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1, 2012 р. – 15 с.
5. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин: Учеб. для вузов.- 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.,1988. – 640с.
6. Кожевников С.Н., Есипенко Я.И., Раскин Я.М. Механизмы. Справочник. Изд. 4-е, перераб. и доп. Под ред С.Н. Кожевникова М., «Машиностроение», 1976. – 784с. с ил.
7. Kuznetsov Y.N., Dmitriev D.A. Realization of frame-configurations conception of machine-tools with mechanisms parallel structure // Journal of the Technical University of Gabrovo volume 54, 2017.- P. 27-31