

УДК 621.9

Д.О. ДМИТРИЄВ, С.А. РУСАНОВ, Д.Д. ФЕДОРЧУК  
Херсонський національний технічний університет**ФУНКЦІОНАЛЬНІ МОЖЛИВОСТІ КЕРУВАННЯ ПРОСТОРОВИМИ СИСТЕМАМИ ПРИВОДІВ ДЛЯ РІЗНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАДАЧ**

У даній роботі наведено алгоритми і моделі, які в поєднанні з апаратно-технічним забезпеченням керування просторовою шарнірно-стрижневою механічною системою, наприкладі, автоматизованого пристрою технологічного призначення, дозволяють виконувати наскрізне проектування, виготовлення і оцінки працездатності будь-якої компоновки просторової системи приводів для відповідних задач об'єктами у просторі та швидко перебудувати або переналадити елементи системи. При розробці каркасного обладнання з механізмами паралельної структури (МПС) на початковому етапі після вибору структури компоновки потрібно виконати аналіз кінематичних закономірностей для обраної компоновки, а саме: можливі діапазони переміщення робочих органів та плани швидкостей рухомих елементів обладнання. На основі отриманих виразів та залежностей було розроблено спеціалізоване програмне забезпечення Tangle, в якому реалізовані необхідні алгоритми, програмне забезпечення зменшує витрати часу, при визначенні кінематичних характеристик окремого варіанту компоновки, дозволяє здійснювати аналіз кінематичних параметрів каркасної установки з МПС, що проектується. Удосконалено математичне ядро для зв'язку зворотної і прямої задач кінематики та управління складним рухом шарнірно-стрижневих механізмів. Визначено процедури проектування і засобів забезпечення працездатності та керування мехатронними системами відтворення складних рухів для тренажерної техніки з приводами просторової конструкції.

Результати кінематичного розрахунку використані для розрахунку напружено-деформованого стану системи.

Ключові слова: обладнання з МПС, математичне ядро, програмне забезпечення Tangle, оцінка працездатності компоновки, моделювання.

Д.А. ДМИТРИЕВ, С.А. РУСАНОВ, Д.Д. ФЕДОРЧУК  
Херсонский национальный технический университет**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ СИСТЕМАМИ ПРИВОДОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ**

В данной работе приведены алгоритмы и модели, которые в сочетании с аппаратно-техническим обеспечением управления пространственной шарнирно-стержневой механической системой, на примере, автоматизированного устройства технологического назначения, позволяют выполнять сквозное проектирование, изготовление и оценки работоспособности любой компоновки пространственной системы приводов для соответствующих задач объектами в пространстве и быстро перестроить или перенастроить элементы системы. При разработке каркасного оборудования с механизмами параллельной структуры (МПС) на начальном этапе после выбора структуры компоновки нужно выполнить анализ кинематических закономерностей для выбранной компоновки, а именно: возможные диапазоны перемещения рабочих органов и планы скоростей движущихся элементов оборудования. На основе полученных выражений и зависимостей было разработано специализированное программное обеспечение Tangle, в котором реализованы необходимые алгоритмы, программное обеспечение уменьшает затраты времени, при определении кинематических характеристик отдельного варианта компоновки, позволяет осуществлять анализ кинематических параметров каркасной установки с МПС проектируемого. Усовершенствована математическое ядро для связи обратной и прямой задач кинематики и управления сложным движением шарнирно-стержневых механизмов. Определены процедуры проектирования и средств обеспечения работоспособности и управления мехатронных систем воспроизведения сложных движений для тренажерной техники с приводами пространственной конструкции.

Результаты кинематического расчета использованы для расчета напряженно-деформированного состояния системы.

Ключевые слова: оборудование с МПС, математическое ядро, программное обеспечение Tangle, оценка работоспособности компоновки, моделирование.

D.A. DMITRIEV, S.A. RUSANOV, D.D. FEDORCHUK  
Kherson National Technical University

## FUNCTIONAL CAPABILITIES OF SPATIAL DRIVE SYSTEM MANAGEMENT FOR VARIOUS TECHNOLOGICAL PROBLEMS

*In this paper, algorithms and models are presented, which, in combination with the hardware-technical management of the spatial-pivot mechanical system, for example, an automated device of technological design, allow to carry out through-design, manufacturing and evaluation of the efficiency of any layout of the spatial system of drives for the corresponding task objects in space and quickly rebuild or reconfigure system elements. When designing frame equipment with parallel structure mechanisms (MPS) at an initial stage, after choosing the layout structure, an analysis of the kinematic patterns for the selected layout is required, namely: the possible ranges of movement of the working bodies and the speed plans of the moving elements of the equipment. On the basis of the obtained expressions and dependencies, specialized software Tangle was developed, in which the necessary algorithms are implemented, the software reduces the time expenditures, when determining the kinematic characteristics of a separate variant of the layout, it allows to analyze the kinematic parameters of the projected frame plant from the project. The mathematical kernel is improved for the connection of the inverse and direct problems of kinematics and the control of the complex movement of hinge-rod mechanisms. Design procedures and means of ensuring efficiency and control of mechatronic systems for reproduction of complex movements for simulation equipment with spatial structure drives are determined.*

*The results of the kinematic calculation are used to calculate the stress-strain state of the system.*

*Keywords: equipment with IPC, mathematical core, Tangle software, evaluation of the performance of the layout, modelin.*

### Постановка проблеми

В даний час в машинобудівному виробництві набуває широкого розповсюдження застосування високопродуктивного технологічного обладнання з механізмами паралельної структури, це супроводжується підвищенням складності геометричної форми деталей і вимог до точності оброблюваних поверхонь, а також застосуванням нових матеріалів з підвищеними технологічними характеристиками.

Механізми паралельної структури (МПС) мають високі функціональні властивості і можуть бути застосовані в різних технологічних операціях майже усіх галузей промисловості [1]. На даний час основна увага приділяється багатокординатним просторовим системам приводів структури "гексапод". Однак залишаються практично не використаними властивості плоских механізмів з МПС, які можуть бути використані в операціях, зварювання, оздоблювання, будівництві та інших видів обробки як мобільні малометалоємні конструкції у важкодоступних та в умовах які створюють небезпеку для здоров'я людини[5].

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Основою є розв'язання прямої задачі кінематики, можна дати оцінку граничним можливостям переміщення платформи з робочим органом [1-2].

У зв'язку з цим, був запропонований перспективний алгоритм який дозволяє виконувати наскрізне проектування, виготовлення і оцінку працездатності будь-якої компоновки просторової системи приводів для відповідних задач та швидко перебудувати або переналадити елементи системи[3], за результатами оцінки компоновок можливо здійснювати аналіз кінематичних параметрів каркасної установки з МПС, що проектується, а результати кінематичного розрахунку можливо використовувати для розрахунку напружено-деформованого стану системи.

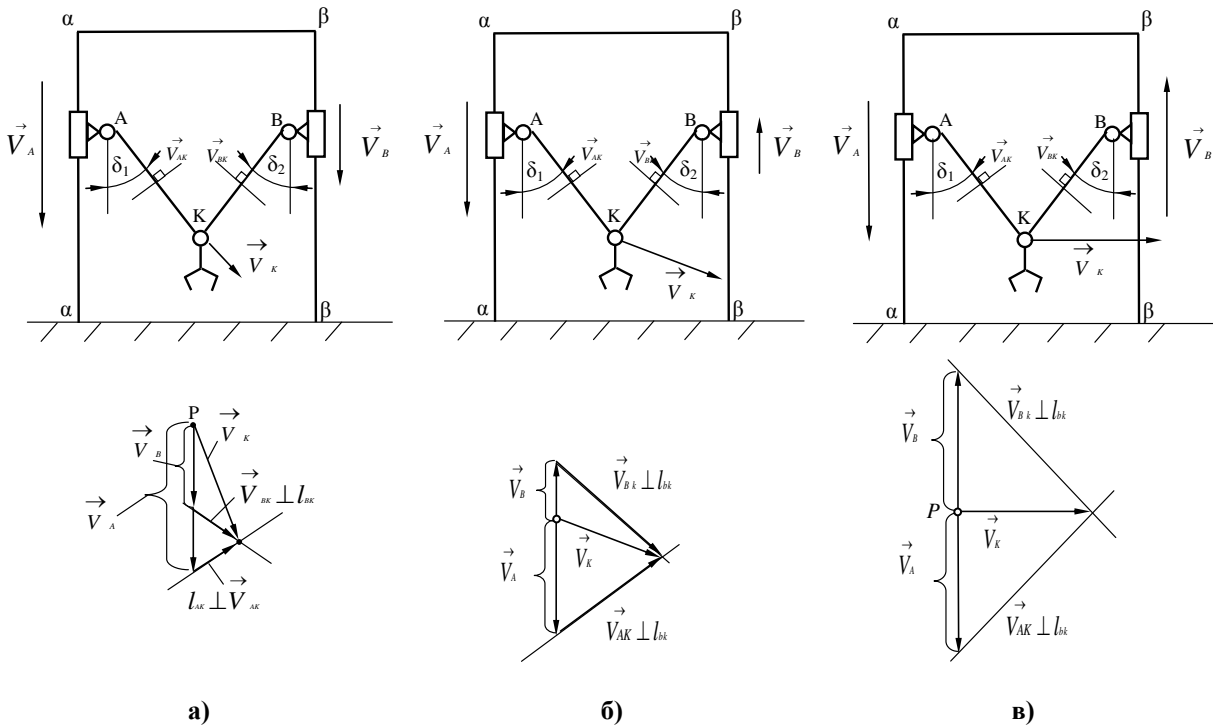
### Формулювання мети дослідження

Удосконалення математичного ядра для зв'язку зворотної і прямої задач кінематики та управління складним рухом шарнірно-стрижневих механізмів. Визначення процедур проектування і засобів забезпечення працездатності та керування мехатронними системами відтворення складних рухів для тренажерної техніки з приводами просторової конструкції.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Для аналізу динаміки (можливих швидкостей переміщення елементів каркасної установки), доцільно застосовувати графоаналітичний метод.

Розглянемо спрощену схему каркасної установки зображеної на рис.1. для випадку  $l_p = 0$ ,  $\alpha = 90^\circ$ . Приклади побудови планів швидкостей ланок МПС і визначення вектору швидкості вихідної ланки  $\vec{V}_k$  для різних випадків співвідношення та напрямку  $\vec{V}_A$  і  $\vec{V}_B$  наведено на рис. 1.



**Рис. 1.** 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:

$$\vec{V}_K = \vec{V}_B + \vec{V}_{BK}; \vec{V}_K = \vec{V}_A + \vec{V}_{AK}; \vec{V}_A + \vec{V}_{AK} = \vec{V}_B + \vec{V}_{BK};$$

$$\vec{V}_A \parallel \alpha - \alpha; \vec{V}_{AK} \perp l_{AK}; \vec{V}_B \parallel \beta - \beta; \vec{V}_{BK} \perp l_{BK}.$$

(1)

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

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

(2)

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 2:

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

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

$$V_{BK} = \frac{\sin(90 - \delta_1) \cdot (V_A - V_B)}{\sin(90 - \delta_1) \cdot \cos(90 - \delta_2) + \cos(90 - \delta_1) \cdot \sin(90 - \delta_2)},$$
(3)

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

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

$$V_{BK} = \frac{\sin(90 - \delta_1) \cdot (V_A + V_B)}{\sin(90 - \delta_1) \cdot \cos(90 - \delta_2) + \cos(90 - \delta_1) \cdot \sin(90 - \delta_2)}.$$
(4)

Розрахункову схему для визначення швидкості переміщення робочого органу  $V_K$  показано на рис. 2.

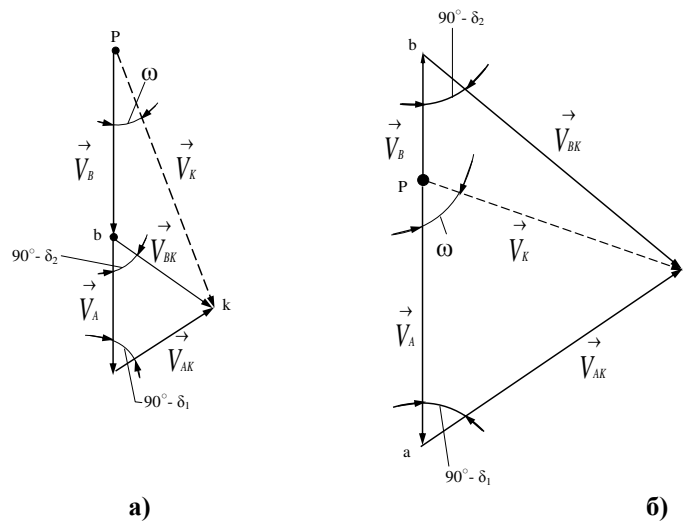


Рис. 2. Розрахункова схема для визначення швидкості  $V_K$  вихідної ланки (робочого органу)

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 встановлюється як:

$$V_K = \sqrt{\left( V_B \frac{\cos(\delta_1)(V_A - V_B) \cdot \sin(\delta_2)}{\cos(\delta_1) \sin(\delta_2) + \sin(\delta_1) \cos(\delta_2)} \right)^2 + \frac{\cos(\delta_1)^2 (V_A - V_B)^2 \cdot \sin(\delta_2)^2}{(\cos(\delta_1) \sin(\delta_2) + \sin(\delta_1) \cos(\delta_2))}}$$
(5)

Кут вектору  $\dot{V}_K$  з вертикальною віссю згідно рис. 2 визначається як:

$$\omega = \arcsin \left( \frac{\cos(\delta_2)(V_A - V_B) \cos(\delta_1)}{(\cos(\delta_1) \sin(\delta_2) + \sin(\delta_1) \cos(\delta_2)) \cdot V_A} \right).$$
(6)

При конструюванні обладнання з МПС застосовуються установки з непаралельними прямими, які з'єднані під різними кутами  $\theta$  (рис. 4а). Також згідно з векторних рівнянь (1,2), застосовують метод побудови планів швидкостей ланок. Результати обчислень областей рішень швидкості  $V_K$  та кута нахилу векторів  $\omega$  за рівнянням (6) при значенні векторів швидкостей в діапазоні  $V_A - V_B \in \{0, 20, 40, 60\}$  мм, наведено на рис. 3.

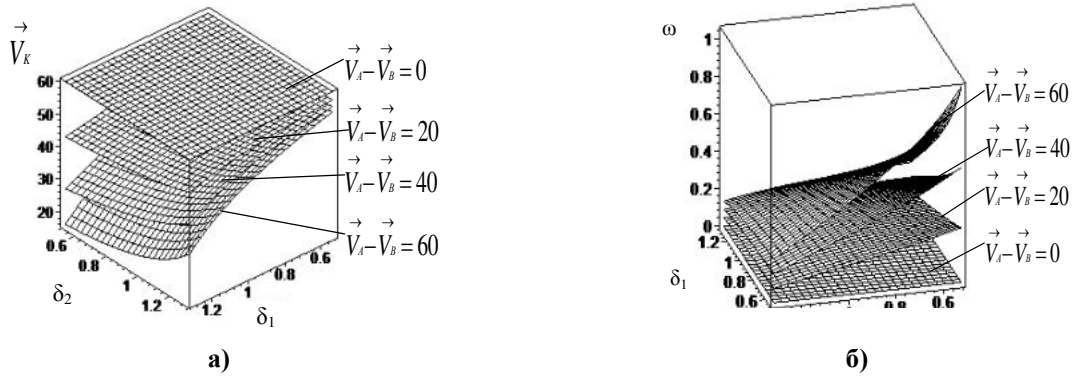


Рис. 3. Область обчислених рішень для значень: а) швидкості  $V_K$ ; б) кута  $\omega$  нахилу вектора швидкості  $V_K$

На рис. 4 наведено плани для визначення швидкостей графоаналітичним методом для напрямних під кутами  $\theta$ .

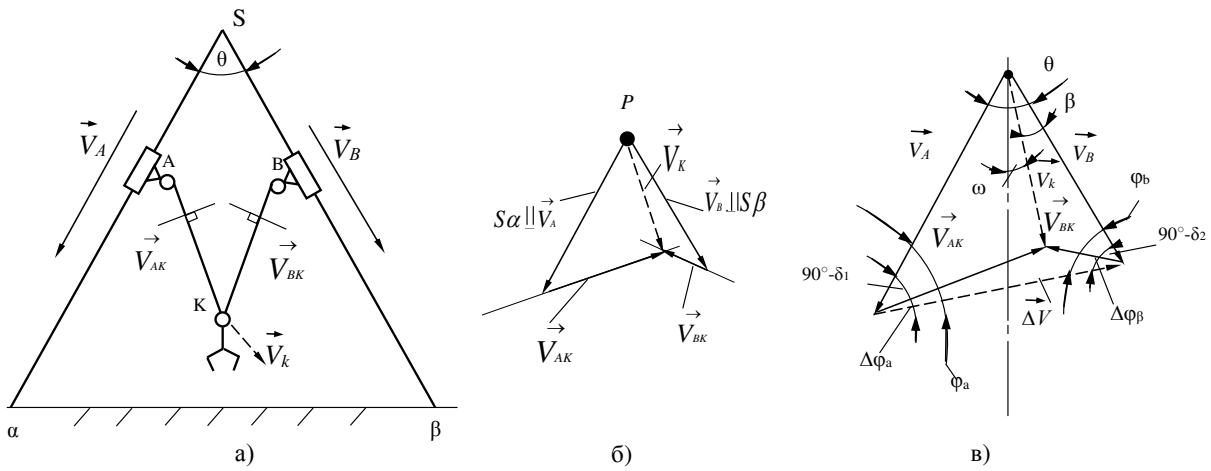


Рис. 4. Приклад застосування графоаналітичного методу планів для визначення швидкостей: а) кінематична схема механізму; б) план швидкостей; в) розрахункова схема для визначення швидкості  $V_K$

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

$$V_K = \sqrt{V_A^2 + V_{AK}^2 - 2V_A \cdot V_{AK} \cdot \cos(90 - \delta_1)}, \tag{7}$$

$$\omega = \frac{\theta}{2} - \beta, \tag{8}$$

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

Розрахунок за рівняннями (7) і (8) для кута  $\theta=30^\circ$  при вершині МПС та значенні  $\vec{V}_B = 20$  мм/с в діапазонах  $\delta_1$  і  $\delta_2$  і  $\dot{V}_A = 0, 20, 40, 60$  мм/с наведено на рис. 5.

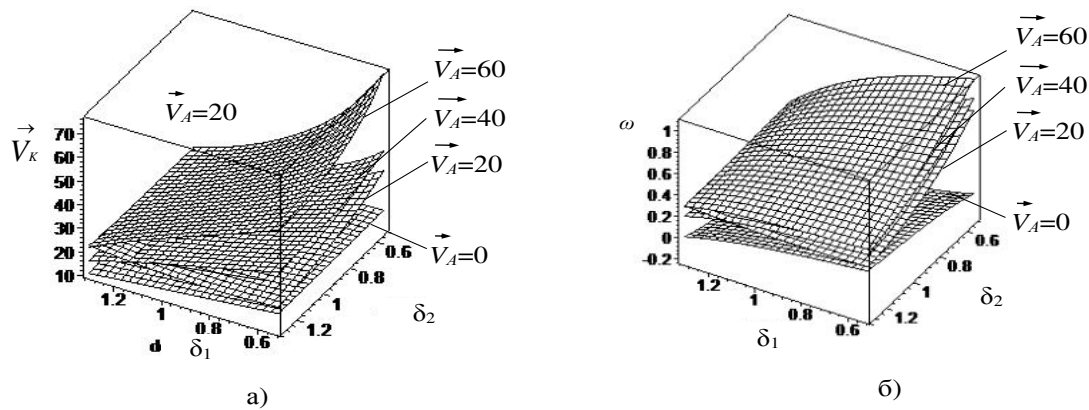


Рис. 5. Приклад застосування графоаналітичного методу планів:  
а) при визначенні швидкостей, б) при визначенні кутів

На основі отриманих виразів та залежностей було розроблено спеціалізоване програмне забезпечення Tangle (рис. 6), яке дозволяє здійснювати аналіз кінематичних параметрів каркасної установки з МПС, що проектується.

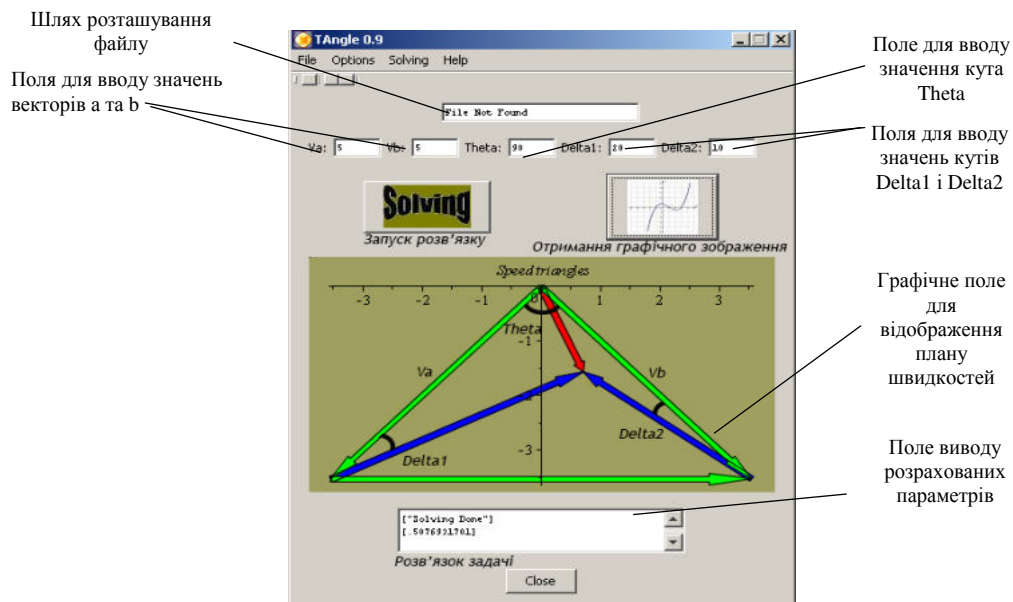


Рис. 6. Зовнішній вигляд робочого вікна програми TAngle

### Висновки

Розглянуто і удосконалено математичне ядро для зв'язку зворотньої і прямої задач кінематики та управління складним рухом шарнірно-стрижневих механізмів. Створено алгоритми і моделі, які в поєднанні з апаратно-технічним забезпеченням керування просторовою шарнірно-стрижневою механічною системою, на прикладі, автоматизованого пристрою технологічного призначення, дозволяють виконувати наскрізне проектування, виготовлення і оцінки працездатності будь-якої компоновки просторової системи приводів для відповідних задач об'єктами у просторі та швидко перебудувати або переналадити елементи системи. На основі векторного аналізу, створено програмне забезпечення Tangle.

### Список використаної літератури

1. Кузнецов Ю.М. Компоновки верстатів з механізмами паралельної структури: Монографія / Ю.М. Кузнецов, Д.О. Дмитрієв, Г.Ю. Діневич; під ред. Ю.М. Кузнецова. – Херсон: ПП Вишемирський В.С., 2009. – 456 с.
2. С.А. Русанов, А.А. Омельчук, Д.Д. Федорчук Математичні моделі і програмні продукти розв'язку задач кінематики і аналізу стратегій обробки // Прикладні питання математичного моделювання №2, 2018 р. С. 57-71.

3. Русанов С.А., Дмитрієв Д.О., Омельчук А.А. Компютерна програма «Tangle» - Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №76042 від 19.01.2018.
4. Дмитрієв Д.О. Застосування графоаналітичного методу для аналізу кінематики механізмів паралельної структури і викладання дисципліни теорія механізмів і машин / Д.О. Дмитрієв, С.А. Русанов, О.О. Сафьяник // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу», випуск 3. – Херсон: ХНТУ, 2017. - С. 67 – 71.
5. Дмитрієв Д.О., Русанов С.А., Федорчук Д.Д. Прогнозування функціональних можливостей і закономірності керування просторовими системами приводів для технологічних задач // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем", випуск 1,- Чернігів: ЧНТУ, 2019. - с.49-52