

## МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПЛОСКИХ ВЕКТОРНЫХ МОДУЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ СО СВЯЗЯМИ ОТ ФУНКЦИЙ ИХ ВЕКТОРНЫХ КОНТУРОВ

*Косенок Б.Б.*

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,  
Самара*

**Ключевые слова:** теория механизмов и машин, рычажные механизмы, кинематика, векторная модель, замкнутый контур.

**Аннотация.** В большинстве существующих методик расчёта кинематики механизмов лежат геометрические построения или простейшие аналитические зависимости. В статье приведены положения метода математического моделирования векторных замкнутых контуров, основанного на методе В.А. Зиновьева построения векторных моделей механизма. Метод позволяет решать широкий круг задач анализа и синтеза механизмов с учётом кинематических и динамических параметров, а инвариантность метода позволяет решать задачи, не связанные с механизмами. В тоже время, при формировании векторных моделей механизмов часто из-за различной геометрии, условий работы и связей звеньев приходится увеличивать количество расчётных векторных контуров, что приводит к усложнению модели, поэтому сделано обоснование необходимости развития метода в сторону решения более сложных модулей на основе нахождения параметров векторов, связанных с функциями элементарных модулей, которые названы дополненными модулями. Приведены решения для четырёх плоских дополненных модулей.

## METHOD OF CALCULATING PLANAR VECTOR MODULES OF MECHANICAL SYSTEMS WITH LINKS FROM THE FUNCTIONS OF THEIR VECTOR CONTOURS

*Kosenok B.B.*

*Samara National Research University, Samara*

**Keywords:** theory of mechanisms and machines, lever mechanisms, kinematics, vector model, closed loop.

**Abstract.** Most existing methods of calculating the kinematics of mechanisms rely on geometric constructions or simple analytical dependencies. The article presents the provisions of the method of mathematical modeling of vector closed contours, based on V.A. Zinoviev's method of constructing vector models of the mechanism. The method allows solving a wide range of problems of analysis and synthesis of mechanisms, taking into account kinematic and dynamic parameters, and the invariance of the method allows solving problems not related to mechanisms. At the same time, when forming vector models of mechanisms, often due to different geometry, operating conditions and connections of links, it is necessary to increase the number of calculated vector contours, which leads to the complication of the model, therefore a justification has been made for the need to develop the method towards solving more complex modules based on finding the parameters vectors associated with the functions of elementary modules, which are called augmented modules. Solutions for four flat augmented modules are given.

### Введение

Существуют различные методы расчёта механизмов [1-6], одним из которых является основанный на методе построения векторных моделей механизма В.А. Зиновьева [6-8] метод математического моделирования векторных замкнутых контуров, позволяющий систематизировать решения кинематики и динамики механизмов. Этот метод достаточно подробно освещен, например, в работе [9], и успешно применяется для моделирования различных механизмов, применительно к задачам анализа и синтеза, а в более широком смысле и композиции механизмов, в том числе с использованием программы «Кинематический и динамический анализ механизмов» (КДАМ) [10], созданной на кафедре основ конструирования машин Самарского университета. Также метод обладает большой инвариантностью, позволяющей решать задачи, не связанные напрямую с кинематикой и динамикой механизмов [11, 12]. В тоже время существуют механизмы с комбинациями

связей между звеньями механизма, которые требуют более сложных решений, чем могут предоставить элементарные модули. Поэтому была поставлена задача сформировать методику расчёта подобных взаимосвязей.

### Материалы и методы исследования

Для решения поставленной задачи используются векторные замкнутые контуры, состоящие из отдельных векторов. В методе векторного моделирования, любой  $i$ -й вектор – это направленный отрезок с параметрами  $r_i$ ,  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  (рис. 1). Любую структурную схему механизма можно отобразить векторными контурами (рис. 2). Подобные векторные замкнутые контуры можно привести к виду элементарных векторных замкнутых контуров – **модулей**, с заранее известными и подробно описанными решениями, что позволяет строить систему векторных контуров, достаточно простым методом формирования в замкнутые кинематические цепи требуемых модулей.

Условие замкнутости  $m$ -векторного контура на плоскости:

$$\sum_{i=1}^m r_i \cos \alpha_i = 0; \quad \sum_{i=1}^m r_i \sin \alpha_i = 0. \quad (1)$$

Условие замкнутости  $m$ -векторного контура в пространстве:

$$\sum_{i=1}^m r_i \cos \alpha_i \cos \beta_i = 0; \quad \sum_{i=1}^m r_i \sin \alpha_i = 0; \quad \sum_{i=1}^m r_i \cos \alpha_i \sin \beta_i = 0. \quad (2)$$

Построенная на основе модулей **основная векторная модель** – позволяет получить решение определенных функций, с известными для каждого момента времени аргументами модели и связями между отдельными векторами и контурами.

Основные сочетания функций возможных векторных контуров, исходя из условия замкнутости, определяют четыре плоских элементарных модуля (Пл1-Пл4) и двадцать пространственных (Пр1-Пр20) [5]. Также следует отметить, что модули могут иметь несколько вариантов решений.

Решение векторных элементарных модулей модули Пл1- Пл4 приведено в таблице 1.

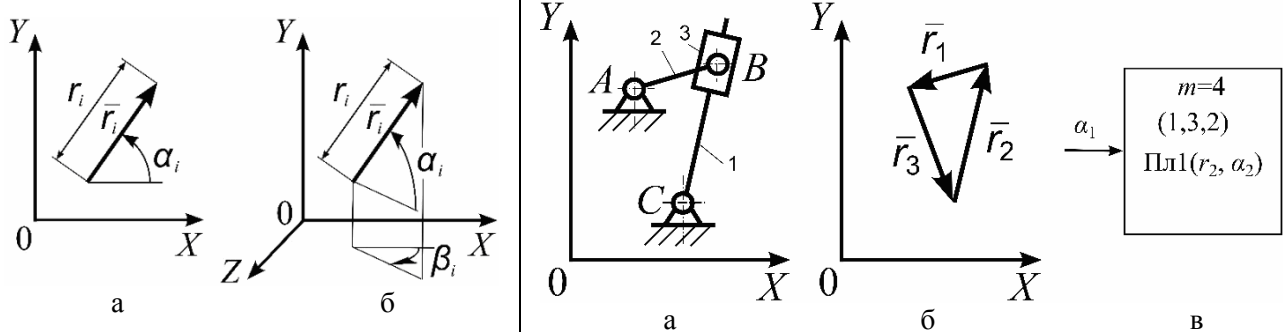


Рис. 1. Параметры плоского и пространственного вектора

Рис. 2. а) структурная схема (1 – кулиса, 2 – кривошип, 3 – ползун), б) векторная модель, в) параметрическая формула механизма

Табл. 1. Элементарные плоские векторные модули

Модуль	Функции		Максимальное число решений	Основные аргументы – любые параметры векторов не равные функциям модуля <sub>2</sub>							
	$u_1$	$u_2$		$r_i$	$\alpha_i$	$r_j$	$\alpha_j$	$r_{i1}$	$\alpha_{i1}$	$r_{i2}$	$\alpha_{i2}$
Пл1	$r_i$	$\alpha_i$	1					x	x	x	x
Пл2	$r_i$	$r_j$	1		x		x	x	x	x	x
Пл3	$r_i$	$\alpha_j$	2		x	x		x	x	x	x
Пл4	$\alpha_i$	$\alpha_j$	2	X		x		x	x	x	x

Для решения задачи расчёта механизмов с комбинациями связей между звеньями механизма, которые требуют более сложных решений, чем могут предоставить элементарные

модули, был сформирован новый класс **дополненных модулей** – модулей в которых, кроме возможных связей любого параметра вектора с любым параметром любого вектора, в том числе и не входящих в состав контура, учитываются связи от функций данного модуля.

Для решения задачи расчёта механизмов с комбинациями связей между звеньями механизма, которые требуют более сложных решений, чем могут предоставить элементарные модули, был сформирован новый класс **дополненных модулей** – модулей в которых, кроме возможных связей любого параметра вектора с любым параметром любого вектора, в том числе и не входящих в состав контура, учитываются связи от функций данного модуля.

Рассмотрим для примера два варианта кулисного механизма, служащего для преобразования вращательного движения кривошипа в поступательное движение кулисы. Структурная схема первого варианта данного механизма, его кинематическая векторная модель приведены на рисунке 2.

Кинематическая модульная векторная модель первого варианта механизма состоит из одного элементарного модуля Пл1.

Структурная схема второго варианта механизма, его кинематическая векторная модель представлены на рисунке 3. Кинематическая модульная векторная модель второго варианта имеет три неизвестных: длину вектора 3 и углы поворота 3 и 2 векторов при наличии связи между векторами 2-3, то есть данный векторный контур не является элементарным и обладает дополнительной к условию замкнутости связью по углу двух векторов 2 и 3.

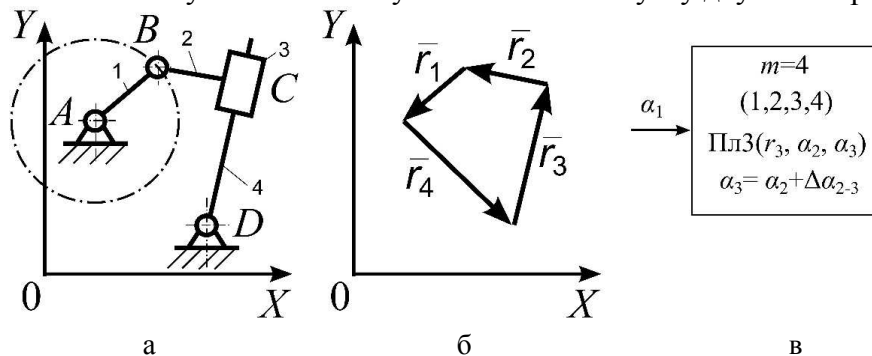


Рис. 3. Вариант механизма согласно рисунку 2: а) структурная схема, б) векторная модель, в) параметрическая формула

Такой векторный контур напрямую не решается и для решения векторная модель можно разбить на последовательное решение трех элементарных модулей Пл1, Пл3 и Пл4 (рис. 4) в следующей последовательности.

1. Используя модуль Пл1 находим суммарный вектор  $\bar{r}_5$  для векторов  $\bar{r}_3$  и  $\bar{r}_2$ ;
2. Используя модуль Пл3 находим длину  $r_3$  вектора  $\bar{r}_3$  в местной системе координат  $X'OY'$ , ось  $X'$  которой направлена вдоль вектора  $\bar{r}_3$ ;
3. Используя модуль Пл4 находим углы  $\alpha_3$  и  $\alpha_2$  векторов  $\bar{r}_3$  и  $\bar{r}_2$ .

Для ручного формирования такой модели требуются, как соответствующая квалификация, так и дополнительное время на отладку такой модели, так как вместо одного модуля придётся формировать три модуля, увеличивается не только количество контуров, но и появляются дополнительные вектора в расчёте.

Отсюда следует, что для упрощения расчётной модели необходимо найти прямой алгоритм решения подобных моделей, чтобы не приводить дополнительных преобразований для решения кинематических и динамических задач. На основе решения данного механизма был сформирован общий алгоритм решения плоских векторных контуров с внутриконтурными связями, в том числе и от функций модуля.

Введем для удобства дальнейшего рассуждения два понятия, характеризующих связи между параметрами.

– *связующий параметр*, в зависимости от которого изменяются параметры какого-либо вектора,

– *зависимый параметр*, который зависит от параметра связи.

Если связующие параметры векторов не являются функциями контура, то достаточно провести упорядочивание векторов по цепочке зависимости: связующий параметр – зависимые параметры.

Алгоритм решения подобных модулей будет выглядеть так.

1. Формируются дополнительные списки векторов со связями.  
 2. Проводится упорядочивание эти списков векторов по цепочке зависимости от связующего параметра к зависимым.

3. Проводится вычисление всех выявленных связей.

4. Производится решение модуля.

Если связующий параметр – функция, то следует учитывать три фактора:

– тип функции (длина или угол наклона вектора);

– количество связующих параметров, которые являются функциями контура;

– тип решаемого элементарного модуля.

Если связующие параметры – длины векторов, и они являются функциями, то такое связывание не поддается решению в рамках жесткой кинематической модели, так как, если неизвестны связующие параметры в данном положении модели, то неизвестны и длины зависимые. Такое связывание применимо в рамках так, называемой “инерционной” кинематической модели, когда зависимый параметр изменяется в зависимости от связующих параметров предыдущего положения (пружины, ударные механизмы и т.д.).

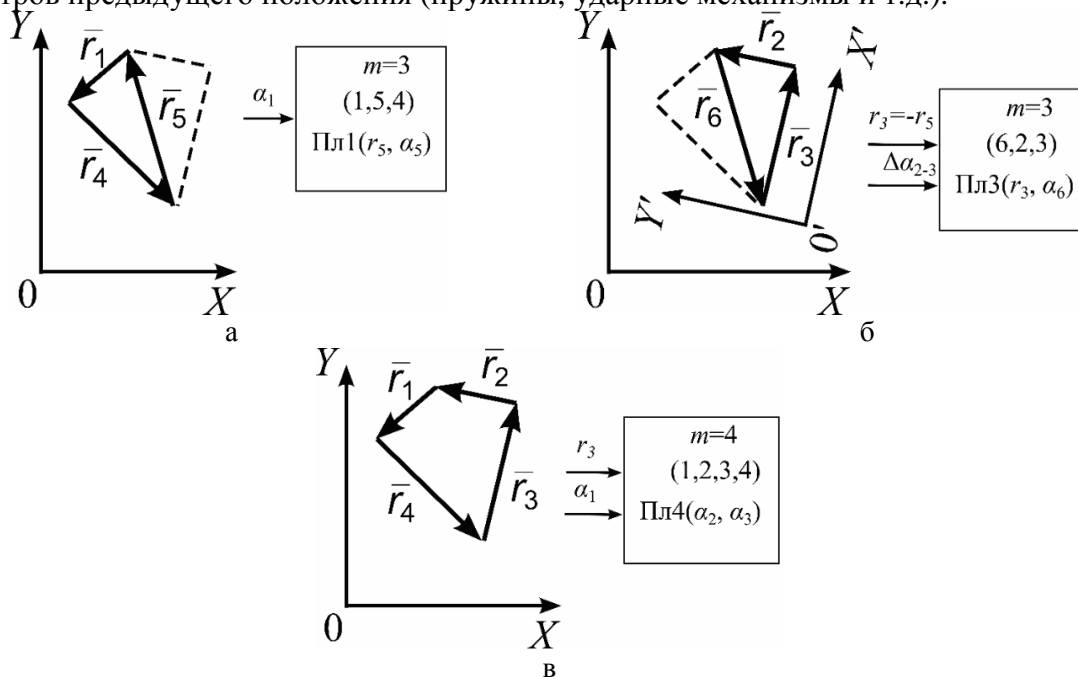


Рис. 4. Разбиение векторной модели 2-го варианта механизма на три элементарных модуля и их структурно-параметрические формулы

Расчет “инерционной” кинематической модели со связующими параметрами - длинами-функциями не отличается от расчета, когда связующие параметры являются постоянными или являются внешними аргументами.

Если углы наклона векторов являются связующими параметрами, и функциями, то необходимо рассмотреть два случая:

– одна функция является связующим параметром;

– две функции являются связующими параметрами.

Так как решения для плоских элементарных замкнутых контуров известны, то на их базе и формируются алгоритмы расчёта для новых дополненных модулей.

Рассмотрим алгоритм решения дополненного модуля на базе модуля  $\text{Пл1}(r_1, \alpha_1)$ , где  $\alpha_1$  – функция модуля и связующий параметр.

1. Формируются дополнительные списки векторов со связями.
2. Проводится упорядочивание этих списков векторов по цепочке зависимости от связующего параметра к зависимым.
3. Проводится вычисление всех списков зависимостей, не связанных с функцией.
4. Проводится нахождение суммарного вектора от всех векторов с постоянными и независимыми от функции параметрами с внутриконтурными связями с помощью модуля  $\text{Пл1}(r_{\Sigma_{\text{const}}}, \alpha_{\Sigma_{\text{const}}})$ . Число векторов в контуре уменьшится на  $N-K$ , где  $N$  – первоначальное число векторов контура,  $K$  – число векторов, зависящих от связующего параметра. Соответственно эти вектора исключаются из исходного расчетного списка векторов контура.
5. Проводится переход к местной системе координат с осью  $X$  проходящей вдоль вектора 1 и вычисляется суммарный вектор от векторов, параметры которых зависят от функции  $\alpha_1$ , с помощью модуля  $\text{Пл1}(r_{\Sigma 1}, \alpha_{\Sigma 1})$ .
6. В местной координатной системе вектора 1  $X_1OY_1$  находим длину  $r_1$ , и угол суммарного вектора  $\alpha_{\Sigma_{\text{const}1}}^M$  с помощью модуля  $\text{Пл3}(r_1, \alpha_{\Sigma_{\text{const}1}}^M)$  со списком векторов  $(\Sigma 1, 1, \Sigma_{\text{const}1})$ ;
7. Находим угол  $\alpha_1 = \alpha_{\Sigma_{\text{const}1}} - \alpha_{M\Sigma_{\text{const}1}}$ ;
8. Находим углы векторов, связанных с  $\alpha_1$ :  $\alpha_i = \alpha_1 + \Delta\alpha_{1i}$ .

На основе данного решения сформирован дополненный модуль  $\text{Пл1s}(r_1, \alpha_1)$ . На рисунке 5 показан рычажный механизм и его векторная модель, рассчитанная в программе КДАМ и соответствующая модулю  $\text{Пл1s}(r_3, \alpha_3)$  с дополнительной внутриконтурной связью от функции контура  $\alpha_3$ :  $\alpha_4 = \alpha_3 + \Delta\alpha_{34}$ .

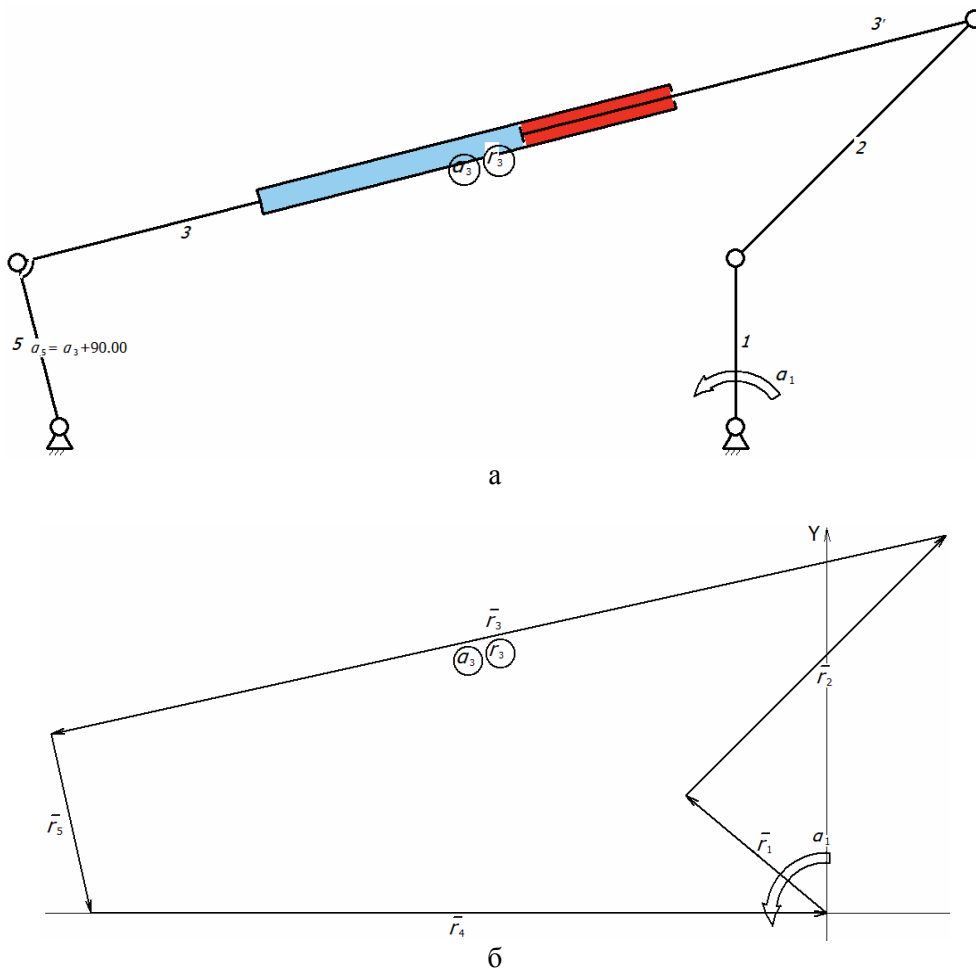


Рис. 5. Рычажный механизм (а) и его векторная модель (б), основанная на модуле  $\text{Пл1s}(r_3, \alpha_3)$

Алгоритм решения дополненного модуля на базе модуля  $\text{Пл2}(r_i, r_j)$ , где  $r_i$  – функция модуля и связующий параметр.

1. Формируются дополнительные списки векторов со связями.
2. Проводится упорядочивание эти списков векторов по цепочке зависимости от связующего параметра к зависимым.
3. Проводится вычисление всех выявленных связей.
4. Производится решение модуля  $\text{Пл2}(r_i, r_j)$ .

На основе данного решения сформирован дополненный модуль  $\text{Пл2s}(r_i, r_j)$ . На рисунке б показан рычажный механизм и его векторная модель, рассчитанная в программе КДАМ и соответствующая модулю  $\text{Пл2s}(r_2, r_3)$  с дополнительной внутриконтурной связью от функции контура  $r_2$ :  $r_5 = r_2 + \Delta r_{25}$ .

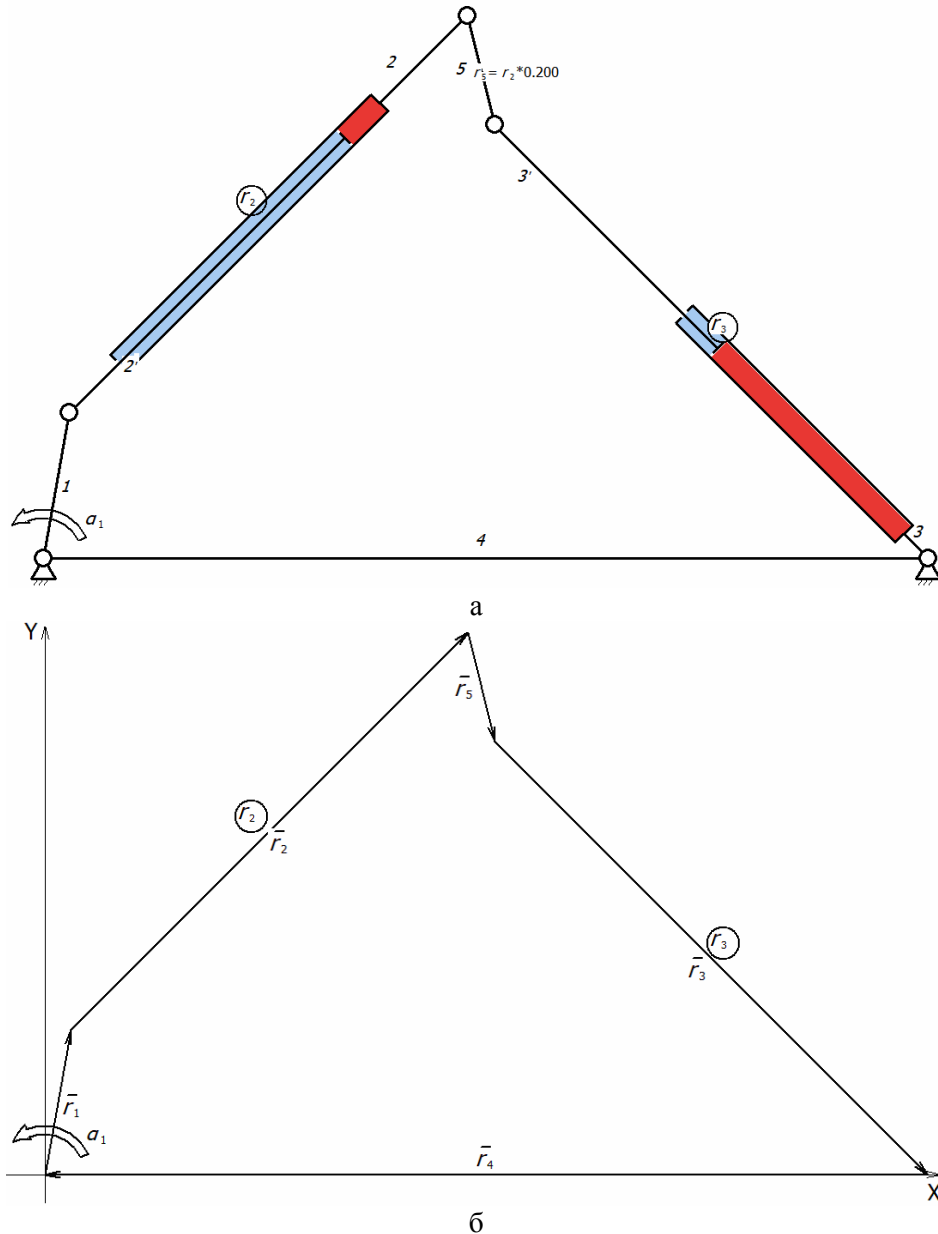


Рис. 6. Рычажный механизм (а) и его векторная модель (б), основанная на модуле  $\text{Пл2s}(r_2, r_3)$ .

Алгоритм решения модуля  $\text{Пл3s}(\alpha_1, r_2)$ , где  $\alpha_1$  – функция модуля и связующий параметр.

1. Формируются дополнительные списки векторов со связями.
2. Проводится упорядочивание эти списков векторов по цепочке зависимости от связующего параметра к зависимым.
3. Проводится вычисление всех списков зависимостей, не связанных с функцией.

4. Проводится переход к местной системе координат с осью  $X$  проходящей вдоль вектора 1 с функцией  $\alpha_1$  и нахождение суммарного вектора векторов, параметры, которых связаны с  $\alpha_1$  и вектора 1 с помощью модуля  $\text{Пл1}(r_{\Sigma 1}, \alpha_{\Sigma 1})$ . Проводится смена направления суммарного вектора на 180 градусов:  $\alpha_{\Sigma 1}^M = \alpha_{\Sigma 1} + 180^\circ$ . Число векторов в контуре уменьшится на  $N-K$ , где  $N$  – первоначальное число векторов контура,  $K$  – число векторов, зависящих от связующего параметра. Соответственно, эти вектора исключаются из исходного расчетного списка векторов контура.

5. Находим  $\text{Пл3}(\alpha_{\Sigma 1}, r_2)$  в общей системе координат.

6. Проводим смену направления вектора 1:  $\alpha_1 = \alpha_{\Sigma 1} - \alpha_{\Sigma 1}^M$ ;

7. Производится решение модуля  $\text{Пл3}(\alpha_1, r_2)$ .

8. После нахождения функций в основной системе координат основного модуля найдем углы векторов, связанных с  $\alpha_1$ :  $\alpha_i^j = \alpha_1 + \Delta\alpha_{1i}$ .

На рисунке 7 показан рычажный механизм, а на рис.8 его векторная модель, соответствующая модулю  $\text{Пл3s}(\alpha_2, r_4)$  с дополнительной внутриконтурной связью от функции контура  $\alpha_2$ :  $\alpha_3 = \alpha_2 + \Delta\alpha_{23}$ .

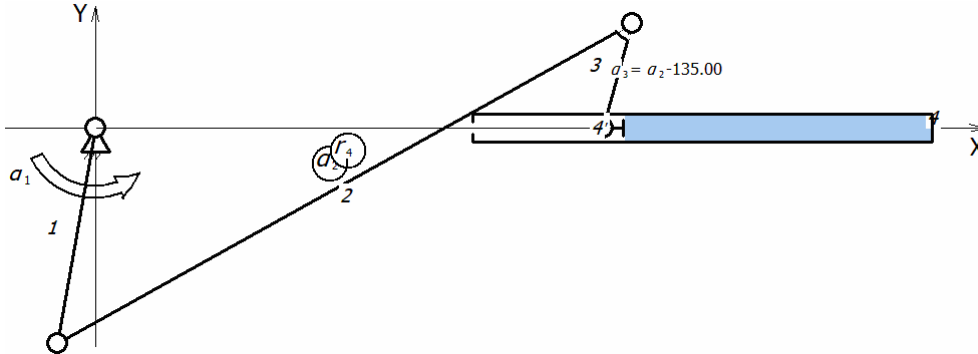


Рис. 7. Рычажный механизм, соответствующий модулю  $\text{Пл3s}(\alpha_2, r_4)$

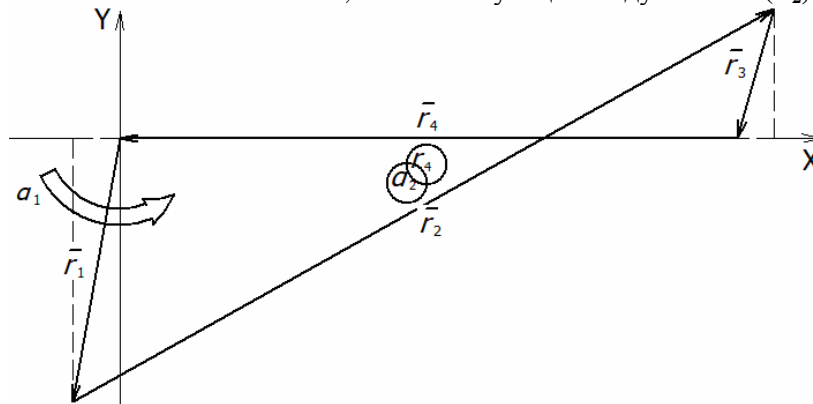


Рис. 8. Векторная модель, основанная на модуле  $\text{Пл3s}(\alpha_2, r_4)$

Алгоритм решения модуля  $\text{Пл4s}(\alpha_2, \alpha_3)$ , где  $\alpha_2, \alpha_3$  – функции модуля и связующие параметры:

1. Формируются дополнительные списки векторов со связями.

2. Проводится упорядочивание эти списков векторов по цепочке зависимости от связующего параметра к зависимым.

3. Проводится вычисление всех списков зависимостей, не связанных с функциями

4. Проводится переход к местной системе координат с осью  $X$  проходящей вдоль вектора 2 с функцией  $\alpha_2$  и нахождение суммарного вектора векторов, параметры, которых связаны с  $\alpha_2$  и вектора 2 с помощью модуля  $\text{Пл1}(r_{\Sigma 1}, \alpha_{\Sigma 1})$ . Преобразуем направление суммарного вектора на 180 градусов:  $\alpha_{\Sigma 1}^M = \alpha_{\Sigma 1} + 180^\circ$ . Число векторов в контуре уменьшится на  $N-Ki$ , где  $N$  – первоначальное число векторов контура,  $Ki$  – число векторов, зависящих от связующего параметра. Соответственно, эти вектора исключаются из исходного расчетного списка векторов контура.

5. Проводится переход к местной системе координат с осью X проходящей вдоль вектора 3 с функцией  $\alpha_3$  и нахождение суммарного вектора векторов, параметры, которых связаны с  $\alpha_3$  и вектора 3, с помощью модуля Пл1( $r_{\Sigma 2}, \alpha_{\Sigma 2}$ ). Преобразуем направление суммарного вектора на 180 градусов:  $\alpha_{\Sigma 2}^M = \alpha_{\Sigma 2} + 180^\circ$ . Число векторов в контуре уменьшится на  $N_i - K_i - K_j$ , где  $N_i$  – число векторов контура,  $K_j$  – число векторов, зависящих от связующего параметра. Соответственно, эти вектора исключаются и из расчетного списка векторов контура.

6. Находим Пл4( $\alpha_{\Sigma 1}, \alpha_{\Sigma 1}$ ) в общей системе координат.

7. Преобразуем направление вектора 2:  $\alpha_2 = \alpha_{\Sigma 1} - \alpha_{\Sigma 1}^M$ .

8. Преобразуем направление вектора 3:  $\alpha_3 = \alpha_{\Sigma 2} - \alpha_{\Sigma 2}^M$ .

9. Производится решение модуля Пл4( $\alpha_2, \alpha_3$ ).

10. После нахождения функций в основной системе координат основного контура найдем углы векторов связанных с  $\alpha_2$ :  $\alpha_i = \alpha_2 + \Delta\alpha_{2i}$ , и углы векторов связанных с  $\alpha_3$ :  $\alpha_j = \alpha_3 + \Delta\alpha_{3j}$ .

На рисунке 9 показан рычажный механизм и его векторная модель, соответствующая модулю Пл4s( $\alpha_2, \alpha_3$ ), с дополнительными внутриконтурными связями от функций контура  $\alpha_2$ :  $\alpha_6 = \alpha_2 + \Delta\alpha_{26}$  и  $\alpha_3$ :  $\alpha_5 = \alpha_3 + \Delta\alpha_{35}$ .

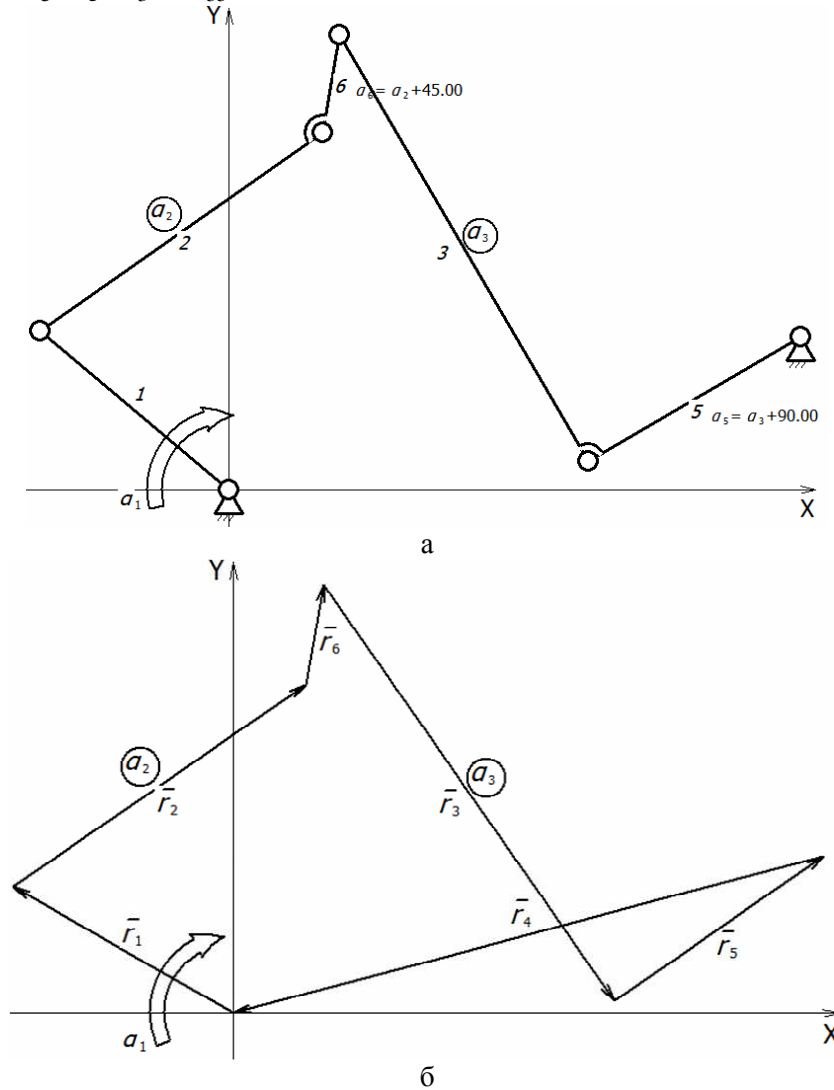


Рис. 9. Рычажный механизм (а) и его векторная модель (б), основанная на модуле Пл4s( $\alpha_2, \alpha_3$ )

Создание подобных модулей и реализация в программе КДАМ расширяет возможности более быстрого расчета кинематики и динамики механизмов. Новые дополненные модули Пл1s-Пл4s с новыми вариантами решения, приведены в таблице 2.



Табл. 2. Дополненные плоские векторные модули

Модуль	Функции		Максимально число решений	Основные аргументы – любые параметры векторов не равные функциям модуля							
	$u_1$	$u_2$		$r_i$	$\alpha_i$	$r_j$	$\alpha_j$	$r_{i1}$	$\alpha_{i1}$	$r_{i2}$	$\alpha_{i2}$
Пл1s	$r_i$	$\alpha_i$	2					x	x	x	x
Пл2s	$r_i$	$r_j$	2		x		x	x	x	x	x
Пл3s	$r_i$	$\alpha_j$	4		x	x		x	x	x	x
Пл4s	$\alpha_i$	$\alpha_j$	4	x		x		x	x	x	x

### Результаты

Полученные результаты позволили создать их программную реализацию в программе КДАМ. Программа КДАМ решает задачи кинематического и динамического анализа и синтеза для плоских и пространственных механизмов, путём их моделирования стандартными векторными замкнутыми контурами – модулями, позволяющих получать однозначные решения нахождения неизвестных параметров.

### Заключение

В результате для всех плоских модулей найдены алгоритмы нахождения параметров связанных с функциями модулей и подобные решения на базе элементарных модулей сформировали новый класс векторных модулей – дополненных. Для всех дополненных модулей количество вариантов решения по сравнению с элементарными увеличилось вдвое. Также было показано, что дополненные модули имеют ограничения – модули со связями сразу от обеих функций не имеет решения, кроме модуля Пл4s.

### Список литературы

1. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 2009. – 639 с.
2. Артоболевский И. И. Геометрические методы решения некоторых задач плоских механизмов // Труды семинара по ТММ. – М.: Изд-во АН СССР, 1947. – Т. 1, Вып.3. – С. 129-152.
3. Артоболевский И.И. Теория механизмов для воспроизведения плоских кривых. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 255 с.
4. Uicker J., Pennock G., Shigley J. Theory of machines and mechanisms. – Fourth edition. – New York – Oxford: Oxford university press, 2011. – 900 p.
5. Khurmi R.S., Gupta J.K. Theory of machines. – 14th edition. – S Chand & Co Ltd, 2005. – 1071 p.
6. Зиновьев В.А. Векторный метод в структурном и кинематическом исследовании механизмов // Известия вузов. Машиностроение. – 1958. – №6. – С. 3-9.
7. Зиновьев В.А. Кинематический анализ пространственных механизмов // Труды семинара по ТММ. – М.: Изд-во АН СССР, 1951. – Т. 11, Вып. 42. – С. 52-99.
8. Зиновьев В.А. Курс теории механизмов и машин. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1972. – 384 с.
9. Семенов Б.П., Косенок Б.Б. Методы и средства динамического синтеза механизмов авиационных энергоустановок. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2010. – 281 с.
10. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ №2010616342. Программа КДАМ (Кинематический и динамический анализ механизмов) / Б.Б. Косенок, В.П. Тукмаков. – Заявка № 2010614593 от 29.07.2010; зарег. 24.09.2010.
11. Косенок Б.Б. Инвариантность векторных моделей в моделировании зубчатых передач // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. – 2009. – №3-1(19). – С. 157-161.
12. Родионов Л.В., Косенок Б.Б., Крючков А.Н., Шахматов Е.В. Математическое векторное моделирование пульсаций подачи жидкости шестеренным качающим узлом // Самара: Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – Т. 11, № 3-1. – С. 257-262.

### References

1. Artobolevsky I.I. Theory of mechanisms and machines: Textbook for colleges. – 4th ed., revised and additional. – М.: Science, 2009. – 639 p.
2. Artobolevsky I.I. Geometric methods for solving some problems of plane mechanisms // Proceedings of the seminar on TMM. – М.: Publ. house of the USSR Academy of Sciences, 1947. – Vol. 1, Iss. 3. – P.129-152.
3. Artobolevsky I.I. Theory of mechanisms for reproducing plane curves. – М.: Publ. house of the USSR Academy of Sciences, 1957. – 255 p.

4. Uicker J., Pennock G., Shigley J. Theory of machines and mechanisms. – Fourth edition. – New York – Oxford: Oxford university press, 2011. – 900 p.
5. Khurmi R.S., Gupta J.K. Theory of machines. – 14th edition. – S Chand & Co Ltd, 2005. – 1071 p.
6. Zinoviev V.A. Vector method in the structural and kinematic study of mechanisms // News of universities. Mechanical Engineering. 1958, no. 6, pp. 3-9.
7. Zinoviev V.A. Kinematic analysis of spatial mechanisms // Proceedings of seminar on TMM. –M.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1951. – Vol. 11, Iss. 42. – P. 52-99.
8. Zinoviev V.A. Course on the theory of mechanisms and machines. – M.: Science. Ch. ed. physics and mathematics lit., 1972. – 384 p.
9. Semenov B.P., Kosenok B.B. Methods and means of dynamic synthesis of mechanisms of aviation power plants. – Samara: Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2010. – 281 p.
10. Certificate of official registration of computer programs No. 2010616342. KDAM Program (Kinematic and Dynamic Analysis of Mechanisms) / B.B. Kosenok, V.P. Tukmakov. – Appl. No. 2010614593 from 29.07.2010; reg. 24.09.2010.
11. Kosenok B.B. Invariance of vector models in the modeling of gears // Samara: Bulletin of the Samara State Aerospace University n.a. academician S.P. Korolev. 2009, no. 3-1(19), pp. 157-161.
12. Rodionov L.V., Kosenok B.B., Kryuchkov A.N., Shakhmatov E.V. Mathematical vector modeling of fluid supply pulsations by a gear pumping unit // News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2009, vol. 11, no. 3-1, pp. 257-262.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

**Косенок Борис Борисович** – кандидат технических наук, доцент кафедры основ конструирования машин

**Kosenok Boris Borisovich** – candidate of technical sciences, associate professor of department of machine design principles

borkos@yandex.ru

Получена 30.10.2023