

УДК 622.23.05:531.8:62-231.1

А. В. ЛОКТИОНОВ

Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТРЕЛОВИДНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ С ПРОДОЛЬНЫМИ И ПОПЕРЕЧНЫМИ РЕЖУЩИМИ ГОЛОВКАМИ

Предложена методика нахождения кинематических параметров стреловидных пространственных исполнительных механизмов, оснащённых как продольными, так и поперечными резовыми головками матричным методом. Получены формулы, позволяющие определять кинематические углы реза для общего случая движения исполнительного органа.

Ключевые слова: исполнительный механизм, кинематический анализ, матричный метод, режущая головка.

Введение. Для нахождения геометрических, кинематических и силовых параметров исполнительных механизмов используются различные методы расчетов. Наиболее простые из них, например, векторный, при котором определяются проекции звеньев на неподвижные оси координат, а затем дифференцированием находятся скорости и ускорения, целесообразно применять для механизмов, звенья которых расположены в одной плоскости [1].

Проходческие комбайны избирательного действия оснащаются продольно-осевыми [2–5] и поперечно-осевыми [6–8] резовыми коронками. В общем случае движение коронки с резами определяется угловой скоростью вращения коронки, скоростью перемещения ее центра масс в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также скоростью поступательного движения комбайна. Следовательно, в соответствии с теорией сложного движения резец коронки имеет три переносных движения: два вращательных и одно поступательное прямолинейное, а также одно относительное вращательное движение.

Выполнение кинематического расчета режущего инструмента корончатого исполнительного механизма в случае координатного способа задания его движения при сложном движении реза связано с громоздким геометрическим анализом системы. При этом использование векторного метода расчёта параметров движения реза требует значительного числа промежуточных выкладок, чтобы учесть углы, определяющие установку резов на режущей головке [9, 10].

Работа резовых коронки проходческого комбайна связана с изменением положения режущего лезвия по отношению к обрабатываемому массиву, причем направление вектора скорости вершины реза оказывает влияние на геометрические параметры, которые определяют как процесс резания, так и износ инструмента.

Установлено, что определение скорости точки реза применительно к различным конструктивным схемам стреловидных корончатых исполнительных органов проходческого комбайна целесообразно осуществлять с использованием матричной методики расчёта [11, 12]. Знание составляющих вектора абсолютной скорости по отношению к подвижной системе координат даёт возможность нахождения кинематических углов резов [13].

Выполнение кинематического анализа исполнительного механизма матричным методом предполагает выражение координат точки в неподвижной системе отсчёта через ее координаты в подвижных системах. Проекция скорости на неподвижные оси находят путем дифференцирования текущих координат. Определение проекций скорости на подвижные оси координат осуществляется с использованием транспонированной матрицы [11]. Опыт показывает, что расчёт кинематических характеристик матричным методом оказывается более простым по сравнению с применением расчётных формул, описывающих сферическое движение исполнительного механизма [12, 13].

Целью представленной работы является развитие матричного метода кинематического анализа стреловидного исполнительного органа на общий случай его движения. Получающаяся при этом расчётная схема оказывается применимой в случае оснащения стреловидных исполнительных механизмов и продольными, и поперечными режущими головками.

Определение кинематических параметров стреловидных исполнительных механизмов для общего случая движения. Рассмотрим механизм (рисунок 1), в котором реализуются три переносных движения: два вращательных и одно поступательное. Получим проекции вектора абсолютной скорости точки M реза на оси $X_6Y_6Z_6$, которые совпадают с его осями симметрии. В данном случае $x_6 = y_6 = z_6 = 0$, но расчётные формулы будут справедливы как для корончатого, так и для дискового исполнительных органов.

Введём систему координат XYZ , начало которой O_1 связано с точкой оси центральной цапфы. Положение начала отсчёта и ориентация данной системы координат сохраняются при любых перемещениях исполнительного органа, перемещающегося поступательно вдоль оси O_1Y (рисунок 1, *a*) со скоростью v_n . Головка с резами установлена на рукояти, состоящей из трёх звеньев длиной r_1 , r_2 и r_3 (рисунок 1, *a*, *в*, *д*), и вращается относительно её продольной оси O_3X_3 с угловой скоростью $\dot{\alpha}_4 = \omega_2$ (рисунок 1, *з*). Рукоять перемещается в горизонтальной и вертикальной плоскостях с угловыми скоростями $\dot{\alpha}_1 = \omega_1$ и $\dot{\alpha}_2 = \omega_3$ (рисунок 1, *a*, *б*).

Исходные данные для расчета: углы поворотов α_1 , α_2 , α_4 исполнительного органа и соответствующие им угловые скорости $\dot{\alpha}_1 = \omega_1$, $\dot{\alpha}_2 = \omega_3$, $\dot{\alpha}_4 = \omega_2$; длины r_1 и r_2 частей рукояти, причем отрезок r_1 перемещается только с угловой скоростью $\dot{\alpha}_1$, а r_2 двигается вместе с рукоятью r_3 с угловыми скоростями

ми $\dot{\alpha}_1$ и $\dot{\alpha}_2$ в горизонтальной и вертикальной плоскостях (рисунок 1, а, б, в); угол $\alpha_3 = \text{const}$, который учитывает наклон оси закрепления головки или диска с резами по отношению к продольной оси O_1Y_1 (рисунок 1, а); угол установки реза α_5 и угол α_6 , учитывающий его тангенциальное размещение на корпусе головки органа (рисунок 1, д, е); координаты точки M в подвижной системе координат $X_4Y_4Z_4$, значения которых $r_3, r_4, 0$.

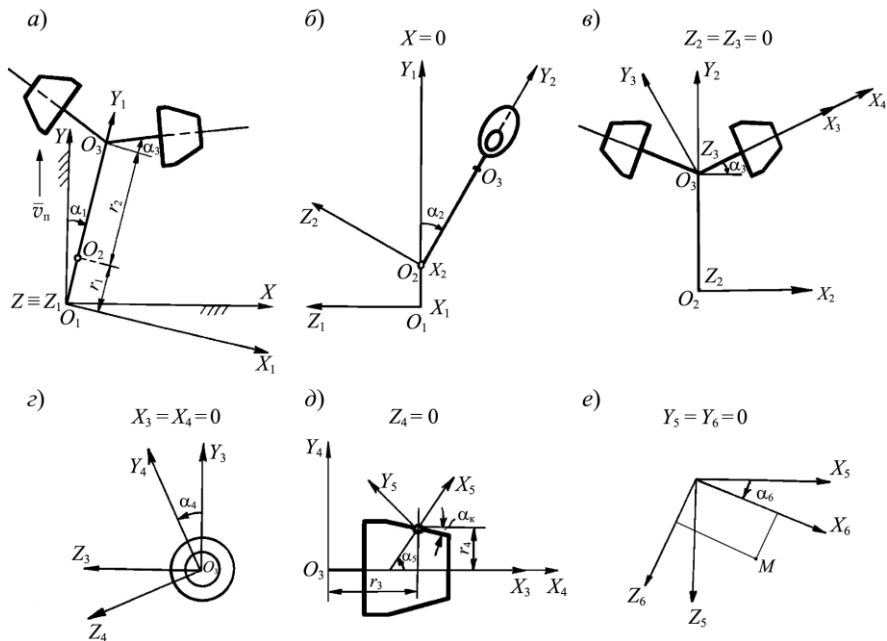


Рисунок 1 – Расчётные схемы для общего случая движения стреловидного исполнительного органа

Примем, что изображенные на рисунке 1 системы координат составляют между собой углы, косинусы которых образуют матрицы A_1, \dots, A_6 . Тогда координаты точки M в неподвижной системе отсчета XYZ связаны с ее координатами в системе $X_6Y_6Z_6$ следующим образом:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = A_1 \begin{pmatrix} 0 \\ r_1 \\ 0 \end{pmatrix} + A_1 A_2 \begin{pmatrix} 0 \\ r_2 \\ 0 \end{pmatrix} + A_1 A_2 A_3 A_4 \begin{pmatrix} r_3 \\ r_4 \\ 0 \end{pmatrix} + A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 \begin{pmatrix} x_6 \\ y_6 \\ z_6 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Вектор скорости точки M в системе XYZ с учётом перемещения исполнительного органа вдоль оси O_1Y_1 со скоростью \bar{v}_n определяется дифференцированием равенства (1) из выражения

$$\bar{v} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ v_{\Pi} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

В свою очередь вектор скорости той же точки M в системе $X_6Y_6Z_6$

$$\bar{v}_6 = \begin{pmatrix} \dot{x}_6 \\ \dot{y}_6 \\ \dot{z}_6 \end{pmatrix} + A' \begin{pmatrix} 0 \\ v_{\Pi} \\ 0 \end{pmatrix} = A' \bar{v}. \quad (3)$$

где $A' = A'_6 A'_5 A'_4 A'_3 A'_2 A'_1$ – транспонированная матрица, которая получается перемножением транспонированных матриц, взятых в обратном порядке.

Выражения (2) и (3) представляют собой один и тот же вектор в базисах систем координат XYZ и $X_6Y_6Z_6$. С учётом (1) формула (3) записывается в виде

$$\begin{aligned} \bar{v}_6 = & \dot{\alpha}_1 \left[A' \frac{dA_1}{d\alpha_1} \begin{pmatrix} 0 \\ r_1 \\ 0 \end{pmatrix} + A' \frac{dA_1}{d\alpha_1} A_2 \begin{pmatrix} 0 \\ r_2 \\ 0 \end{pmatrix} + A' \frac{dA_1}{d\alpha_1} A_2 A_3 A_4 \begin{pmatrix} r_3 \\ r_4 \\ 0 \end{pmatrix} + A' \frac{dA_1}{d\alpha_1} A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 \begin{pmatrix} x_6 \\ y_6 \\ z_6 \end{pmatrix} \right] + \\ & + \dot{\alpha}_2 \left[A'_6 A'_5 A'_4 A'_3 A'_2 \frac{dA_2}{d\alpha_2} \begin{pmatrix} 0 \\ r_2 \\ 0 \end{pmatrix} + A'_6 A'_5 A'_4 A'_3 A'_2 \frac{dA_2}{d\alpha_2} A_3 A_4 \begin{pmatrix} r_3 \\ r_4 \\ 0 \end{pmatrix} + \right. \\ & + A'_6 A'_5 A'_4 A'_3 A'_2 \frac{dA_2}{d\alpha_2} A_3 A_4 A_5 A_6 \begin{pmatrix} x_6 \\ y_6 \\ z_6 \end{pmatrix} \left. \right] + \dot{\alpha}_4 \left[A'_6 A'_5 A'_4 \frac{dA_4}{d\alpha_4} \begin{pmatrix} r_3 \\ r_4 \\ 0 \end{pmatrix} + \right. \\ & \left. + A'_6 A'_5 A'_4 \frac{dA_4}{d\alpha_4} A_5 A_6 \begin{pmatrix} x_6 \\ y_6 \\ z_6 \end{pmatrix} \right] + A' \begin{pmatrix} 0 \\ v_{\Pi} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (4) \end{aligned}$$

Здесь учтено, что $\alpha_3 = \text{const}$, $\alpha_5 = \text{const}$, $\alpha_6 = \text{const}$.

Из равенства (4) легко определяются проекции $\dot{x}_6, \dot{y}_6, \dot{z}_6$ вектора \bar{v}_6 абсолютной скорости точки M на оси координат x_6, y_6, z_6 .

Из представленного выражения несложно получить значения кинематических углов реза (в точке M) в процессе резания при общем случае движения исполнительного органа как для радиальной, так и тангенциальной установки резов. Формула (4) справедлива при любом сочетании кинематических и конструктивных параметров стреловидных исполнительных органов проходческих комбайнов $\dot{\alpha}_1, \dot{\alpha}_2, \dot{\alpha}_4, \bar{v}_{\Pi}, r_1, r_2, r_3, r_4, \alpha_5, \alpha_6$. Аналогично можно получить решение и для случая, при котором $x_6 = y_6 = z_6 \neq 0$.

Боковой φ и задний τ углы заточки резца следует рассчитывать по формуле $\operatorname{tg} \varphi = \dot{y}_6 / \dot{x}_6$, $\operatorname{tg} \tau = \dot{y}_6 / \dot{z}_6$. Кинематический угол ξ для передней грани [12] можно выразить из равенства $\operatorname{tg}(\xi/2) = \dot{y}_6 / \dot{x}_6$.

Рассмотрим частные случаи определения \dot{x}_6 , \dot{y}_6 , \dot{z}_6 , при которых расчётные формулы значительно упрощаются.

Если $\alpha_3 = \alpha_5 = \alpha_6 = 0$ и $x_6 = y_6 = z_6 = 0$, то формулы имеют вид:

$$\dot{x}_6 = \dot{x}_4 = \dot{\alpha}_1[r_1 + r_2 \cos \alpha_2 + r_4 \cos(\alpha_2 - \alpha_4)] - v_{\text{п}} \sin \alpha_1;$$

$$\dot{y}_6 = \dot{y}_4 = -\dot{\alpha}_2 r_2 \sin \alpha_4 + (v_{\text{п}} \cos \alpha_1 - \dot{\alpha}_1 r_3) \cos(\alpha_2 - \alpha_4);$$

$$\dot{z}_6 = \dot{z}_4 = \dot{\alpha}_4 r_4 - \dot{\alpha}_2 (r_2 \cos \alpha_4 + r_4) + (\dot{\alpha}_1 r_3 - v_{\text{п}} \cos \alpha_1) \sin(\alpha_4 - \alpha_2).$$

Они применимы для радиальных резцов дискового исполнительного органа комбайнов, аналогичных ГПК-2.

В случае $r_1 = r_2 = 0$, $\alpha_3 = \pi/2$, $x_6 = y_6 = z_6 = 0$ получаем

$$\dot{x}_6 = \dot{x}_5 = (\dot{\alpha}_1 \cos \alpha_4 \cos \alpha_2 + \dot{\alpha}_2 \sin \alpha_4)(-r_3 \sin \alpha_5 + r_1 \cos \alpha_5) +$$

$$+ v_{\text{п}} [\sin \alpha_5 (\cos \alpha_4 \sin \alpha_1 + \sin \alpha_4 \sin \alpha_2 \cos \alpha_1) + \cos \alpha_5 \cos \alpha_2 \cos \alpha_1];$$

$$\dot{y}_6 = \dot{y}_5 = -(\dot{\alpha}_1 \cos \alpha_4 \cos \alpha_2 + \dot{\alpha}_2 \sin \alpha_4)(r_3 \cos \alpha_5 + r_4 \sin \alpha_5) +$$

$$+ v_{\text{п}} [\cos \alpha_5 (\cos \alpha_4 \sin \alpha_1 + \sin \alpha_4 \sin \alpha_2 \cos \alpha_1) - \sin \alpha_5 \cos \alpha_2 \cos \alpha_1];$$

$$\dot{z}_6 = \dot{z}_5 = \dot{\alpha}_4 r_4 + \dot{\alpha}_1 (r_3 \sin \alpha_4 \cos \alpha_2 + r_4 \sin \alpha_2) - \dot{\alpha}_2 r_3 \cos \alpha_4 +$$

$$+ v_{\text{п}} (\cos \alpha_4 \sin \alpha_2 \cos \alpha_1 - \sin \alpha_4 \sin \alpha_1).$$

Эти выражения справедливы для резцов корончатого исполнительного органа, используемого в комбайнах типа ПК-3р.

Полученные в работе [13] проекции на оси координат вектора абсолютной скорости точки M для корончатого исполнительного органа также являются частным случаем рассмотренного. При $r_1 = 0$, $\alpha_2 = \pi/2$, $\alpha_3 = 0$ расчётная схема (см. рисунок 1) и формулы могут быть применены при кинематическом анализе движения резцов дискового планетарного исполнительного органа, которым оснащены комбайны типа «Урал-10КС» и «Урал-20КС».

Выводы. Представленный алгоритм кинематического анализа стреловидных исполнительных механизмов, основанный на использовании матричного метода, позволяет осуществлять расчёты в случаях сложных кинематических схем исполнительных органов горных машин. Таким образом, можно осуществить верификацию результатов расчётов, полученных путем компьютерного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Локтионов, А. В. Оценка методов расчета кинематических параметров исполнительного механизма / А. В. Локтионов, А. В. Гусаков // Современные методы проектирования машин. – 2004. – Вып. 2. – Т. 2. – С. 132–136.

2 Менцель, Б. Комбайны избирательного действия с продольными и поперечными режущими головками / Б. Менцель, П. Френьо // Глюкауф. – 1981. – № 5. – С. 25–29.

3 Automatic section cutting and forming control of longitudinal-axial-roadheaders / J. Tian [et al.] // Meitan Xuebao = Journal of the China Coal Society. – 2009. – Vol. 34, is. 1. – P. 111–115.

4 Совершенствование конструкции продольно-осевых коронок проходческого комбайна избирательного действия / А. А. Хорешок [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. – 2010. – № 5. – С. 2–6.

5 New model for predicting instantaneous cutting rate of axial-type roadheaders / Q. Zhang [et al.] // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2016. – Vol. 21, is. 1. – P. 168–177.

6 Семенов, В. В. Проходческие комбайны избирательного действия отечественного и зарубежного производства / В. В. Семенов, С. А. Калашников, А. С. Носенко. – Новочеркасск : ЮРГТУ (НПИ), 2012. – 124 с.

7 Мостаков, В. А. Анализ стреловидных исполнительных органов проходческих комбайнов с продольно-осевыми и поперечно-осевыми режущими коронками и барабанами / В. А. Мостаков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – Отдельный выпуск № 6. Горная механика и транспорт. – С. 200–205.

8 Disk rock cutting tool for the implementation of resource-saving technologies of mining of solid minerals / L. Mametyev [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2017. – Vol. 21. – Article 03005. – 6 p.

9 Локтионов, А. В. Расчёт кинематических параметров режущего инструмента исполнительных органов проходческих комбайнов с продольной режущей головкой / А. В. Локтионов // Изв. вузов. Горный журнал. – 1990. – № 3. – С. 68–76.

10 Computer-aided efficient design and performance optimization of cutting head for roadheader / X. Jin [et al.] // Scientific Reports. – 2022. – Vol. 12. – Article 6788. – 16 p.

11 Локтионов, А. В. К матричной записи кинематических параметров режущего инструмента горных машин / А. В. Локтионов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1979. – № 7. – С. 138–141.

12 Локтионов, А. В. Матричная методика расчёта кинематических параметров исполнительного механизма в общем случае его движения / А. В. Локтионов // Механика. Исследования и инновации. – 2018. – Вып. 11. – С. 176–184.

13 Локтионов, А. В. Кинематика режущего инструмента при сферическом движении исполнительного механизма проходческого комбайна / А. В. Локтионов, А. А. Сидорович // Механика. Исследования и инновации. – 2020. – Вып. 13. – С. 93–101.

A. V. LOKTIONOV

Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Belarus

KINEMATICAL ANALYSIS OF ARROW-SHAPED ACTUATORS WITH LONGITUDINAL AND TRANSVERSAL CUTTING HEADS

There is proposed a technique for finding the kinematic parameters of arrow-shaped spatial actuators equipped both with longitudinal and transverse cutting heads using the matrix method. The obtained formulas allow to determine the kinematic angles of the cutter for the general case of the executive body movement.

Keywords: actuator, kinematic analysis, matrix method, cutting head.

Получено 31.07.2020