

УДК 531.8

А. В. ЛОКТИОНОВ, А. А. СИДОРОВИЧ

Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь

КИНЕМАТИКА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ СФЕРИЧЕСКОМ ДВИЖЕНИИ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА

Проанализированы методики расчёта кинематических параметров исполнительных механизмов проходческих комбайнов. Получены расчётные формулы для определения кинематических характеристик пространственного механизма в сферической системе координат. Рассмотрены кинематические углы резов, которые при разрушении массива не должны превышать их геометрические значения. Дана сравнительная оценка методик расчёта кинематических характеристик с использованием кинематических уравнений Эйлера и матричным методом. Продемонстрировано, что расчёт матричным методом позволяет существенно упростить расчёт.

Ключевые слова: кинематический расчёт, исполнительный механизм, режущий инструмент, сферическое движение, матричный метод.

Введение. Проходческие комбайны избирательного действия оснащены продольно-осевыми (КИД220М – Беларусь, КСП – Украина, ГПКС, 4ПП-5 – Россия, МК-3 – Англия, EVR-160 – Германия) и поперечно-осевыми (КИД220М2 – Беларусь, 4ПУ, ГПК-2 – Россия, МК-2 – Англия, АМ-75 – Австрия, EVA-160 – Германия) резовыми коронками [1, 2]. Стреловидные рабочие рукояти проходческих комбайнов с продольно-осевыми резовыми коронками могут совершать сферическое движение. При этом перемещения коронки с резцами в общем случае зависят от угловой скорости вращения коронки, скорости её перемещения в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также линейной скорости подачи комбайна вдоль проходимой выработки. Таким образом, резец коронки имеет одно относительное вращательное движение и три переносных: два вращательных и одно поступательное прямолинейное.

Существуют различные методы расчетов геометрических, кинематических и силовых параметров исполнительных механизмов [3]. Анализом установлено, что наиболее простые методы расчета следует использовать для механизмов, звенья которых перемещаются в параллельных плоскостях. Например, при векторном способе определяются проекции на неподвижные оси координат звеньев, а также векторов скоростей и ускорений [4]. Однако такой метод расчета достаточно сложен и неприменим для пространственных схем размещения звеньев механизма. Для расчёта кинематических параметров исполнительного механизма, совершающего сферическое движение, на головке механизма выбирают некоторую точку M . Описание её движения относительно неподвижной системы координат задаётся положением

подвижной системы координат относительно неподвижной. Далее, используя углы Эйлера (прецессии, нутации и собственного вращения) и применяя кинематические уравнения и формулы Эйлера, определяются проекции скорости точки M на подвижные и неподвижные оси координат.

При рассмотрении кинематики режущего инструмента корончатого исполнительного механизма, движение которого задано координатным способом, в случае составного движения резца для определения абсолютной скорости режущего инструмента требуется составление сложных расчётных схем. При этом для определения составляющих вектора абсолютной скорости \bar{v} точки M (резца) без учёта угла установки резцов и тангенциального их размещения на режущей головке используется векторный метод расчёта, который требует множества промежуточных шагов [5, 6].

При работе резцовой коронки проходческого комбайна приходится изменять положение режущего лезвия относительно обрабатываемого массива, а положение вершины резца определяет направления вектора скорости и геометрические параметры резцов, от которых зависят процесс резания и износ инструмента. Кинематические углы вектора абсолютной скорости движения резцового инструмента [7] – это углы между вектором \bar{v} абсолютной скорости и его проекцией на плоскость вращения инструмента (угол ψ_1) и на плоскость, нормальную к радиусу вращения инструмента (угол ψ_2) (рисунок 1).

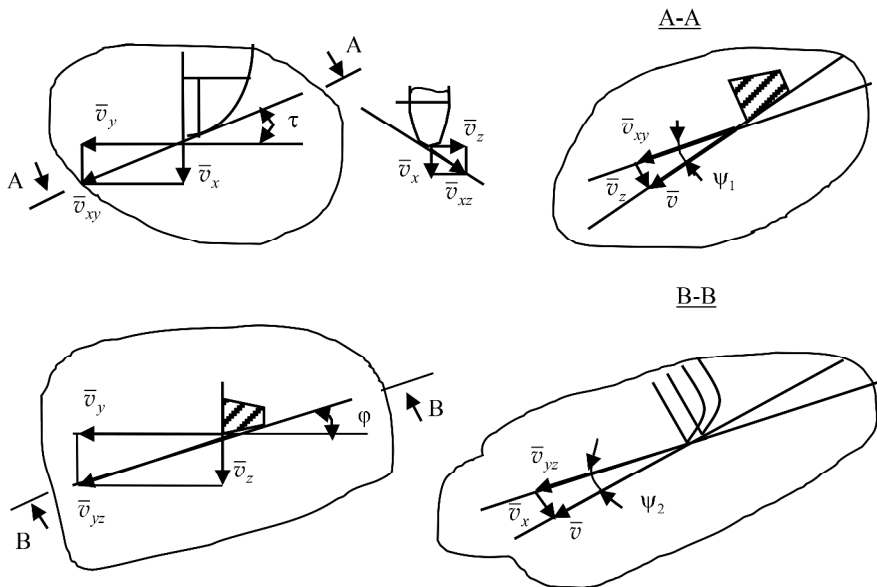


Рисунок 1 – Кинематические углы ψ_1 , ψ_2 вектора абсолютной скорости движения резца для боковой и задней поверхностей инструмента

При обработке массива кинематические углы резцов не должны превышать их геометрические значения, иначе массив разрушается боковыми и задними гранями резцов, увеличивается расход режущего инструмента, повышаются усилия и мощность резания, что является одной из причин малоэффективной работы машин.

Для различных конструктивных схем стреловидного корончатого исполнительного органа проходческого комбайна определение скорости реза целесообразно выполнять, используя матричную методику расчёта [8, 9], которая позволяет найти составляющие вектора абсолютной скорости в подвижной системе координат, а их помощью – кинематические углы резцов, определяющие необходимые углы заточки.

Методика расчета кинематических параметров матричным методом заключается в том, что координаты точки в неподвижной системе отсчета выражаются через ее координаты в подвижной системе. Дифференцируя текущие координаты, определяют проекции скорости точки на неподвижные оси. Далее с использованием транспонированной матрицы находят проекции скорости точки на подвижные оси [8]. Векторным дифференцированием текущих координат определяются проекции ускорения на неподвижные оси. Аналогично с использованием транспонированной матрицы определяются проекции ускорения на подвижные оси координат. Модули скорости и ускорения рассчитываются по известным формулам, а их направление определяются направляющими косинусами. Получаемые расчетные формулы позволяют определить скорость и ускорение точки матричным методом. При этом расчёт кинематических характеристик оказывается более простым, чем при использовании расчётных формул для сферического движения исполнительного механизма [9, 10]. При численном расчете на компьютере удобно использовать стандартные программы нахождения произведения матриц.

Цель работы – получение формул для расчёта кинематических углов резцов механизма в процессе резания с применением матричного метода.

Кинематические параметры режущего инструмента исполнительных механизмов. В процессе резания расчет задних углов, выражающих реальную величину зазора между поверхностью инструмента и поверхностью резания, непосредственно связан с изучением перемещения инструмента [5–9].

Для того, чтобы геометрические углы резцов соответствовали кинематическим углам ψ_1 и ψ_2 , необходимо знать углы φ и τ (см. рисунок 1): $\operatorname{tg} \psi_1 = \operatorname{tg} \varphi \cos \tau$, $\operatorname{tg} \psi_2 = \operatorname{tg} \tau \cos \varphi$. Подставляя соответствующие выражения тангенсов углов, получим

$$v_z / v_{xy} = (v_z / v_y) \cdot (v_y / v_{xy}); v_x / v_{yz} = (v_x / v_y) \cdot (v_y / v_{yz}).$$

Следовательно, для обеспечения в процессе разрушения массива необходимых кинематических углов ψ_1 и ψ_2 боковые и задний углы реза в статике следует определять из выражений

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \psi_1 / \cos \tau = v_z / v_y, \quad \operatorname{tg} \tau = \operatorname{tg} \psi_2 / \cos \varphi = v_x / v_y.$$

Углы φ и τ являются кинематическими углами резца в процессе резания. Для определения угла φ необходимо знать v_z и v_y , угла τ – v_x и v_y . Кинематический угол ξ для передней грани находится по формуле $\operatorname{tg} \xi/2 = v_z / v_x$. Ось X направлена вдоль оси резца, ось Y – перпендикулярно к оси X в плоскости симметрии резца, ось Z – перпендикулярно плоскости симметрии резца.

Конструктивные параметры при расчёте должны быть едины для режущих головок любой конфигурации: выполненных в виде конуса, сферы, цилиндра, овального корпуса, диска. Для всех конструкций исходными расчетными конструктивными параметрами будут расстояние R от оси поворота исполнительного механизма до плоскости вращения или до центра диска и текущий радиус r вращения резца (рисунок 2). Перемещения режущей головки и ее угловые скорости вращения и должны соответствовать сумме элементарных движений резца в процессе резания [10].

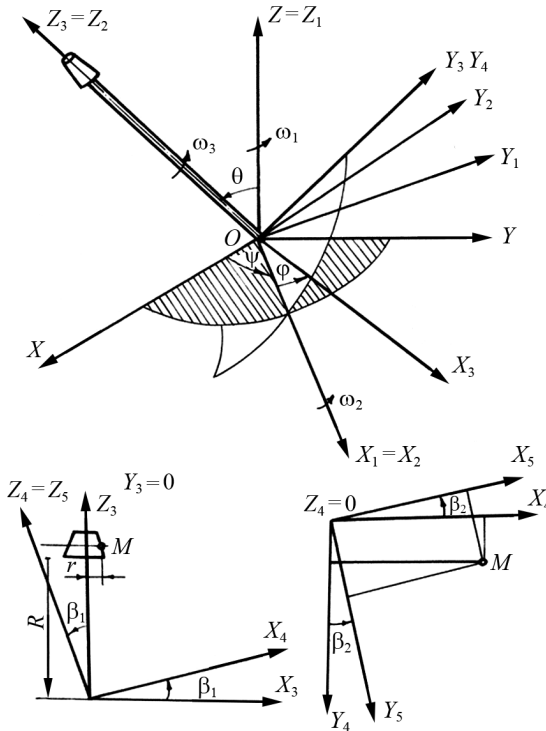


Рисунок 2 – Расчетная схема для определения кинематических параметров исполнительного механизма

Исходные параметры для расчёта кинематических характеристик пространственного исполнительного механизма с использованием углов Эйлера. Рассмотрим кинематические параметры исполнительного механизма, совершающего сферическое движение (см. рисунок 2). На головке исполнительного механизма выберем точку M . Для задания её положения относительно неподвижной системы координат $OXYZ$ определим положение подвижной системы координат относительно неподвижной. Для этой цели используем углы Эйлера, три независимых параметра – углы прецессии, нутации и собственного вращения.

Для изменения угла прецессии ψ тело должно вращаться вокруг неподвижной оси OZ , называемой осью прецессии, с угловой скоростью $\omega_1 = \dot{\psi}$. В результате такого поворота система XYZ переходит в систему $X_1Y_1Z_1$, где ось OX – ось узлов. Изменение угла нутации θ связано с вращением вокруг оси OX_1 (оси нутации) с угловой скоростью $\omega_2 = \dot{\theta}$. В результате этого поворота система $X_1Y_1Z_1$ переходит в систему $X_2Y_2Z_2$. Третий угол Эйлера – угол собственного вращения ϕ . При его изменении тело вращается вокруг оси OZ_2 , которую называют осью собственного вращения, с угловой скоростью $\omega_3 = \dot{\phi}$. В результате такого поворота система $X_2Y_2Z_2$ переходит в положение $X_3Y_3Z_3$.

Исходными параметрами для расчета являются координаты точки M в подвижной системе координат $X_3Y_3Z_3$, равные $(r, 0, R)$, углы β_1 и β_2 , углы поворота ψ, θ, ϕ корончатого механизма и соответствующие им угловые скорости $\dot{\psi}, \dot{\theta}, \dot{\phi}$.

Расчёт кинематических характеристик пространственного исполнительного механизма матричным методом. Рассмотрим исполнительный механизм, совершающий сферическое движение (см. рисунок 2). Определим скорость точки M исполнительного механизма в общем случае его движения с использованием матричной записи кинематических параметров.

Оси на рисунке 2 образуют между собой углы, косинусы которых являются коэффициентами матриц P_ψ, P_θ, P_ϕ . Для расчета кинематических углов резцов необходимо найти проекции абсолютной скорости точки M на оси системы координат $X_5Y_5Z_5$.

Формулы преобразования координат точек при переходе к новому базису можно представить как произведение матриц в виде

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{pmatrix},$$

где

$$P = P_\psi P_\theta P_\phi.$$

Скорость \vec{v} точки M без учета скорости \vec{v}_n подачи механизма вдоль оси OX определится дифференцированием по времени текущих координат X, Y, Z :

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Скорость точки M в подвижной системе $X_3Y_3Z_3$

$$\vec{v}_3 = \begin{pmatrix} \dot{X}_3 \\ \dot{Y}_3 \\ \dot{Z}_3 \end{pmatrix} = P' \begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $P' = P'_y P'_\theta P'_\psi$ – транспонированная матрица.

Векторы \vec{v} и \vec{v}_3 в равенствах (1), (2) представляют разложение одного и того же вектора по разным базисам систем координат XYZ и $X_3Y_3Z_3$. С учетом равенства (1) равенство (2) можно переписать в виде

$$\vec{v}_3 = \left(P'_y P'_\theta P'_\psi \frac{dP_\psi}{d\psi} P_\theta P_y \dot{\psi} + P'_y P'_\theta \frac{dP_\theta}{d\theta} P_y \dot{\theta} + P'_y \frac{dP_y}{dy} \dot{\phi} \right) \begin{pmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Обозначая коэффициенты при $\dot{\psi}$, $\dot{\theta}$, $\dot{\phi}$ через B , C , D , получаем

$$\vec{v}_3 = (B\dot{\psi} + C\dot{\theta} + D\dot{\phi}) \begin{pmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{pmatrix}.$$

Отсюда проекции на подвижные оси координат $X_3Y_3Z_3$

$$v_{x_3} = R(\dot{\psi} \sin \theta \cos \phi - \dot{\theta} \sin \phi); \quad (4)$$

$$v_{y_3} = r\dot{\phi} + \dot{\psi}(r \cos \theta - R \sin \theta \sin \phi) - R\dot{\theta} \cos \phi; \quad (5)$$

$$v_{z_3} = -r\dot{\psi} \sin \theta \cos \phi + r\dot{\theta} \sin \phi. \quad (6)$$

Используя повороты координатных осей на углы β_1 и β_2 вокруг осей OY_3 и OX_4 соответственно (см. рисунок 2), получим искомую систему $X_5Y_5Z_5$. Тогда

$$\begin{pmatrix} \dot{X}_5 \\ \dot{Y}_5 \\ \dot{Z}_5 \end{pmatrix} = P'_\beta \begin{pmatrix} \dot{X}_3 \\ \dot{Y}_3 \\ \dot{Z}_3 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где $P'_\beta = P'_{\beta_1} P'_{\beta_2}$ – транспонированная матрица $P_\beta = P_{\beta_1} P_{\beta_2}$, P_{β_1} и P_{β_2} – матрицы косинусов углов между осями рассматриваемых систем (см. рисунок 2).

Из равенства (7) с учетом формул (4)–(6) получаем проекции абсолютной скорости \vec{v} резца на координатные оси системы $X_5Y_5Z_5$, которые без учета скорости подачи исполнительного механизма вдоль оси OX имеют вид:

$$\begin{aligned}v_{x_5} &= v_{x_3} \cos \beta_1 \cos \beta_2 + v_{y_3} \sin \beta_2 + v_{z_3} \sin \beta_1 \sin \beta_2; \\v_{y_5} &= -v_{x_3} \cos \beta_1 \sin \beta_2 + v_{y_3} \sin \beta_2 - v_{z_3} \sin \beta_1 \sin \beta_2; \\v_{z_5} &= -v_{x_3} \sin \beta_1 + v_{z_3} \cos \beta_1.\end{aligned}\quad (8)$$

Формулы (3), (7), (8) применимы для механизмов, выполненных в виде конуса, сферы, цилиндра, овального корпуса, так как конструктивные параметры R , r и углы β_1 , β_2 применимы к различным конфигурациям.

При расчёте кинематических характеристик при сферическом движении исполнительного механизма, применяя известные кинематические уравнения и формулы Эйлера, определяют проекции вектора абсолютной скорости точки M (резца) на координатные оси системы $X_3Y_3Z_3$ [10]. Для определения проекций вектора \vec{v} на оси системы $X_5Y_5Z_5$ необходимы дополнительные векторные расчёты.

Рассматривая v_{x_3} , v_{y_3} , v_{z_3} как координаты точки, принадлежащей годографу вектора скорости, и используя формулы поворота координатных осей на углы β_1 и β_2 , поворотом системы $X_3Y_3Z_3$ на β_1 вокруг оси OY_3 получим систему $X_4Y_4Z_4$, которая в свою очередь поворачивается на угол β_2 вокруг оси OX_4 . Таким образом, получена искомая система $X_5Y_5Z_5$, проекции на которую вектора скорости \vec{v} в соответствии с равенством (7) окончательно можно представить в виде

$$\begin{pmatrix} \dot{X}_5 \\ \dot{Y}_5 \\ \dot{Z}_5 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} P'_{\beta_2} & P'_{\beta_1} \end{bmatrix} (B\dot{\psi} + C\dot{\theta} + D\dot{\phi}) \begin{pmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{pmatrix}.\quad (9)$$

Из этой формулы находятся проекции вектора скорости \vec{v} на оси системы $X_5Y_5Z_5$, которые определяются из выражений, имеющих вид (8). Методика их определения помимо компактности математической записи сравнительно проста. Полученные расчетные формулы позволяют исследовать кинематические характеристики корончатого исполнительного механизма.

При оснащении исполнительного механизма резцами необходимо знать расчетные формулы для определения кинематических углов резцов в процессе работы механизма, которые определяются из соотношения проекций (8) скорости точки M (резца) на подвижные оси координат X_5 , Y_5 , Z_5 связанные с режущим инструментом (см. рисунок 2). Индексация осей принимается с учетом рассматриваемой расчетной схемы исполнительного механизма. Согласно рисунку 2 ось X_5 направлена вдоль оси резца, ось Y_5 – перпендику-

лярно оси X_5 в плоскости симметрии реза, ось Z_5 – перпендикулярно плоскости симметрии реза. Искомые соотношения равенств (8) позволяют получить формулы для расчета и исследования кинематических углов резов в процессе резания. Они применимы для механизма по рисунку 2, у которого скорость его подачи вдоль оси OX не учитывается и равна нулю. Подача механизма вдоль оси OX осуществляется только в процессе забуривания коронки в забой выработки.

При оснащении режущей коронки резцами с круглым стержнем, типа РКС, угол конусности реза следует оценивать с учётом кинематических углов τ и $\xi/2$.

Влияние скорости подачи \vec{v}_n механизма вдоль оси X (см. рисунок 2) на расчёт кинематических характеристик учитывается равенством

$$\begin{pmatrix} v_{n_{x5}} \\ v_{n_{y5}} \\ v_{n_{z5}} \end{pmatrix} = A' \begin{pmatrix} v_{n_x} \\ v_{n_y} \\ v_{n_z} \end{pmatrix} \quad (10)$$

В рассматриваемом случае $v_{nx} = v_n$, $v_{ny} = v_{nz} = 0$ транспонированная матрица $A' = P'_\beta P'$. Из равенства (10) определяются проекции $v_{n_{x5}}$, $v_{n_{y5}}$, $v_{n_{z5}}$ скорости подачи \vec{v}_n на координатные оси системы $X_5 Y_5 Z_5$, необходимые для расчёта \dot{X}_5 , \dot{Y}_5 , \dot{Z}_5 с учётом перемещения механизма вдоль оси OX , которые алгебраически складываются с соответствующими проекциями равенства (8).

Выражение (9) с учётом (10) окончательно можно представить в виде

$$\begin{pmatrix} \dot{X}_n \\ \dot{Y}_n \\ \dot{Z}_n \end{pmatrix} = (P_{\beta_1} P_{\beta_2})(B\psi + C\theta + D\phi) \begin{pmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{pmatrix} + P'_{\beta_1} P'_{\beta_2} P'_\phi P'_\psi \begin{pmatrix} v_n \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

где \dot{X}_n , \dot{Y}_n , \dot{Z}_n – проекции вектора абсолютной скорости реза на координатные оси X_5 , Y_5 , Z_5 с учётом скорости подачи \vec{v}_n механизма вдоль оси OX .

Выводы. В работе проанализированы методы расчета кинематических параметров исполнительных механизмов. Получены расчетные формулы для определения кинематических характеристик пространственного исполнительного механизма, работающего в сферической системе координат. Показано, что расчёт матричным методом более прост по сравнению с использованием расчетных формул для сферического движения исполнительного механизма. Получены расчетные формулы для определения кинематических углов резов в процессе работы машины, которые позволяют найти проекции вектора абсолютной скорости реза на подвижные оси координат, связанные с режущим инструментом, учитывая прямолинейное перемещение исполнительного механизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Казаченко, Г. В.** Горные машины : в 2 ч. Ч. 2 : Машины и комплексы для добычи полезных ископаемых / Г. В. Казаченко, В. Я. Прушак, Г. А. Басалай. – Минск : Выш. шк., 2018. – 227 с.

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

3 Cutting force and machine kinematics constrained cutter location planning for five-axis flank milling of ruled surfaces / К. Xu [et al.] // Journal of Computational Design and Engineering. – 2017. – Vol. 4, is. 3. – P. 203–217.

4 **Локтионов, А. В.** Расчет кинематических параметров исполнительного механизма / А. В. Локтионов, О. С. Лысова // Теоретическая и прикладная механика. – 2009. – № 24. – С. 293–299.

5 **Бойко, Н. Г.** Разрушение угольных пластов режущим инструментом очистных комбайнов / Н. Г. Бойко. – Донецк : РВД ДонНТУ, 2007. – 128 с.

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

7 Исследование характеристик режущих инструментов исполнительных органов современных горных машин / В. Н. Павлыш [и др.] // Прогресивні технології і системи машинобудування. – 2014. – № 2. – С. 15–21.

8 **Локтионов, А. В.** Методика расчёта кинематических параметров корончатых исполнительных органов матричным методом / А. В. Локтионов // Механизация горных работ на угольных шахтах. – Тула : ТПИ, 1986. – С. 125–132.

9 **Локтионов, А. В.** Матричная методика расчёта кинематических характеристик при сферическом движении исполнительного механизма / А. В. Локтионов, А. В. Лемницкая // Современные проблемы машиноведения : тезисы докладов XI междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому). – Гомель : ГГТУ им П. О. Сухого, 2016. – С. 214.

10 **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.

A. V. LOKTIONOV, A. A. SIDOROVICH

Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Belarus

THE KINEMATICS OF THE CUTTING TOOL AT A SPHERICAL MOVEMENT OF A MINING HEADING MACHINE ACTUATOR

The methods of calculating the kinematic parameters of actuators are analyzed. The calculation formulas for determining the kinematic characteristics of the spatial actuator operating in a spherical coordinate system are obtained. The kinematic angles of the cutters are considered, they should not exceed their geometric values when the mass is destroyed. There is given a comparative evaluation of methods for calculating the actuator kinematic characteristics using the kinematic equations and Euler formulas and matrix method. It is shown that the usage of the matrix method can significantly simplify the calculation.

Keywords: kinematic calculation, actuator, cutting tool, spherical motion, matrix method.

Получено 27.06.2020