

А.М. Бусыгин

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ПРИВОДА КОВША КОЛЕСНОГО ФРОНТАЛЬНОГО ПОГРУЗЧИКА С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ АНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Кинематический анализ механизма является важной технической инженерной задачей при проектировании и конструировании любого механизма. Наиболее предпочтительным из всех существующих методов кинематического анализа (графического, графо-аналитического, аналитического) является аналитический метод. Так как, имея математические уравнения, связывающие основные кинематические и геометрические параметры механизма, можно составить программу, позволяющую автоматизировать процесс вычислений, причем степень точности вычислений может быть задана любая. Рассмотрен кинематический анализ аналитическим способом механизма привода ковша колесного фронтального погрузчика с двумя степенями свободы. Составлены уравнения, определяющие математические зависимости между геометрическими (ходом гидроцилиндров, углами поворота звеньев, линейными размерами звеньев) и кинематическими (линейными скоростями гидроцилиндров, угловыми скоростями и угловыми ускорениями звеньев) параметрами механизма привода ковша колесного фронтального погрузчика с двумя степенями свободы. Полученные математические зависимости могут быть использованы при проектировании механизмов данного типа. Полученные математические уравнения могут быть использованы для создания соответствующих программ, позволяющих значительно сократить время при анализе различных вариантов кинематических схем и проектировании механизмов данного типа, тем самым значительно облегчая работу инженеров проектировщиков, участвующих в создании данного механизма.

Ключевые слова: кинематический анализ, аналитический метод, векторная модель механизма, метод замкнутого контура, фронтальный колесный погрузчик, угловая скорость, угловое ускорение.

Произведем аналитическим методом кинематический анализ механизма привода ковша колесного фронтального погрузчика с двумя степенями свободы аналитическим методом. Для этого создадим векторную модель механизма. На рис. 1 представлена такая векторная модель.

Составим векторное уравнение в соответствии с рис. 1

$$\vec{l}_6 + \vec{l}_4 = \vec{l}_K \quad (1)$$

Спроецируем векторное уравнение (1) на оси координат

$$\begin{cases} l_6 \cdot \cos \varphi_6 + l_4 \cdot \cos \varphi_4 = l_K \cdot \cos \varphi_{IK} = x_K \\ l_6 \cdot \sin \varphi_6 + l_4 \cdot \sin \varphi_4 = l_K \cdot \sin \varphi_{IK} = y_K \end{cases} \quad (2)$$

При заданных $l_6, l_4, \varphi_6, \varphi_4$ можно вычислить координаты точки К – x_K, y_K .

Или, задаваясь координатами x_K, y_K, l_6, l_4 и φ_4 можно вычислить φ_6 . Продифференцируем систему уравнений (2) по времени.

$$\begin{cases} -l_6 \cdot \sin \varphi_6 \cdot \omega_6 - l_4 \cdot \sin \varphi_4 \cdot \omega_4 = \dot{x}_K = v_{xK} \\ l_6 \cdot \cos \varphi_6 \cdot \omega_6 + l_4 \cdot \cos \varphi_4 \cdot \omega_4 = \dot{y}_K = v_{yK} \end{cases} \quad (3)$$

Из четырех параметров ω_6 , ω_4 , v_{xK} , v_{yK} двумя параметрами задаются, а остальные два определяются из системы уравнений (3). Например, задавшись v_{xK} , v_{yK} , можно определить ω_6 и ω_4 .

Из первого уравнения системы уравнений (3) выразим ω_6

$$\omega_6 = -\frac{v_{xK} + l_4 \cdot \sin \varphi_4 \cdot \omega_4}{l_6 \cdot \sin \varphi_6} \quad (4)$$

Подставив полученное выражение во второе уравнение системы уравнений (3), определим ω_4 .

$$\omega_4 = -\frac{v_{yK} \cdot \sin \varphi_6 + v_{xK} \cdot \cos \varphi_6}{l_4 \cdot \sin(\varphi_6 - \varphi_4)} \quad (4)$$

Подставим полученное выражение ω_4 в уравнение (4) получим ω_6 .

$$\omega_6 = \frac{v_{xK} \cdot \sin \varphi_6 \cdot \cos \varphi_4 + v_{yK} \cdot \sin \varphi_6 \cdot \sin \varphi_4}{l_4 \cdot \sin(\varphi_6 - \varphi_4)}$$

Продифференцируем систему уравнений (3) по времени

$$\begin{cases} -l_6 \cdot \cos \varphi_6 \cdot \omega_6^2 - l_6 \cdot \sin \varphi_6 \cdot \varepsilon_6 - l_4 \cdot \cos \varphi_4 \cdot \omega_4^2 - l_4 \cdot \sin \varphi_4 \cdot \varepsilon_4 = a_{xK} \\ -l_6 \cdot \sin \varphi_6 \cdot \omega_6^2 + l_6 \cdot \cos \varphi_6 \cdot \varepsilon_6 - l_4 \cdot \sin \varphi_4 \cdot \omega_4^2 + l_4 \cdot \cos \varphi_4 \cdot \varepsilon_4 = a_{yK} \end{cases} \quad (5)$$

Из четырех параметров ε_6 , ε_4 , a_{xK} , a_{yK} двумя параметрами можно задаться, а остальные два определяются из системы уравнений (5). Например, задавшись a_{xK} , a_{yK} , можно определить ε_6 , ε_4 .

Из первого уравнения системы уравнений (5) выразим ε_4

$$\varepsilon_4 = \frac{a_{xK} + l_6 \cdot \cos \varphi_6 \cdot \omega_6^2 + l_6 \cdot \sin \varphi_6 \cdot \varepsilon_6 + l_4 \cdot \cos \varphi_4 \cdot \omega_4^2}{l_4 \cdot \sin \varphi_4} \quad (6)$$

Подставив полученное выражение во второе уравнение системы уравнений (5) получим ε_6 .

$$\varepsilon_6 = \frac{a_{yK} \cdot \sin \varphi_4 + a_{xK} \cdot \cos \varphi_4 + l_6 \cdot \omega_6^2 \cdot \cos(\varphi_6 - \varphi_4) + l_4 \cdot \omega_4^2}{l_6 \cdot \sin(\varphi_4 - \varphi_6)}$$

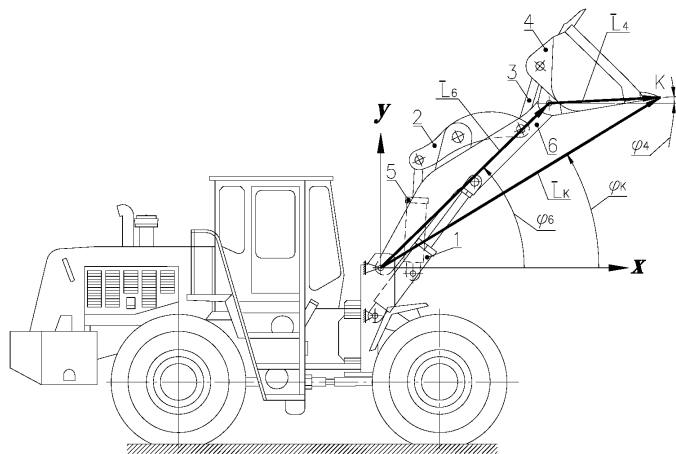


Рис. 1

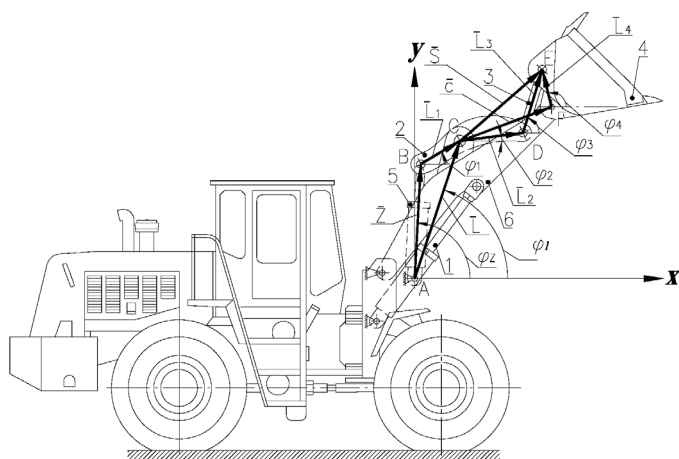


Рис. 2

Подставив полученное выражение ε_6 в уравнение (6) можно получить ε_4 , зависящее от наперед заданных параметров a_{xK} , a_{yK} и известных величин.

$$\varepsilon_4 = [a_{xK} \cdot \sin \varphi_4 \cdot \cos \varphi_6 + a_{yK} \cdot \sin \varphi_6 \cdot \sin \varphi_4 + l_6 \cdot \omega_6^2 \cdot \sin \varphi_4 + l_4 \cdot \omega_4^2 \cdot \sin \varphi_6 + l_4 \cos \varphi_4 \cdot \sin(\varphi_4 - \varphi_6)] / l_4 \cdot \sin \varphi_4 \cdot \sin(\varphi_4 - \varphi_6)$$

Положение ковша погрузчика при работе определяется ходом двух гидроцилиндров, их рабочей длиной, т.е. значения углов φ_6 , φ_4 напрямую зависят от хода гидроцилиндров. Для примера рассмотрим механизм поворота ковша погрузчика вокруг точки C, состоящего из системы рычагов 2, 3 и ковша 4, степень подвижности которого $W = 1$. Применяя метод замкнутого контура, составим три замкнутых векторных контура – ABC, CFE и CDEF (см. рис. 2 и рис. 3).

Составим уравнение для первого замкнутого контура ABC.

$$\vec{z} + \vec{l}_1 = \vec{l} \quad (7)$$

Спроецируем уравнение (7) на оси координат.

$$\begin{cases} z \cdot \cos \varphi_z + l_1 \cdot \cos \varphi_1 = l \cdot \cos \varphi_l \\ z \cdot \sin \varphi_z + l_1 \cdot \sin \varphi_1 = l \cdot \sin \varphi_l \end{cases} \quad (8)$$

В этом уравнении угол φ_l определяется конструктивными размерами стрелы погрузчика 6, т.е. $\varphi_l = \text{const}$. Выразим из первого уравнения системы (8) $\cos \varphi_z$.

$$\cos \varphi_z = \frac{l \cdot \cos \varphi_l - l_1 \cos \varphi_1}{z} \quad (9)$$

Тогда

$$\sin \varphi_z = \sqrt{1 - \frac{(l \cdot \cos \varphi_l - l_1 \cdot \cos \varphi_1)^2}{z^2}}$$

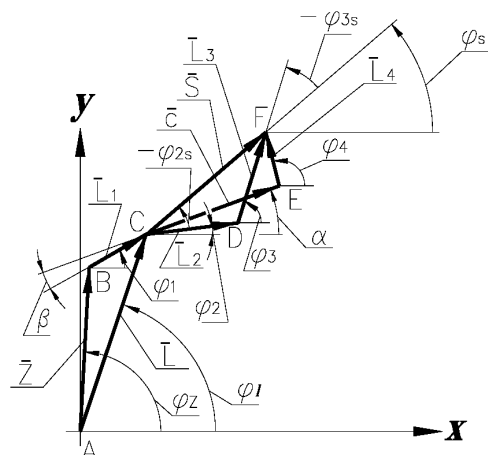


Рис. 3

Подставив $\sin \varphi_z$ во второе уравнение системы уравнений (8), получим

$$z = l^2 + l_1^2 - 2 \cdot l \cdot l_1 \cdot \cos(\varphi_l - \varphi_1)$$

Подставив z в формулу (9) получим $\cos \varphi_z$

$$\cos \varphi_z = \frac{l \cdot \cos \varphi_l - l_1 \cos \varphi_1}{l^2 + l_1^2 - 2 \cdot l \cdot l_1 \cos(\varphi_l - \varphi_1)}$$

Продифференцируем по времени систему уравнений (8)

$$\begin{cases} \dot{z} \cdot \cos \varphi_z - z \cdot \sin \varphi_z \cdot \omega_z - l_1 \sin \varphi_1 \cdot \omega_1 = 0 \\ \dot{z} \cdot \sin \varphi_z + z \cdot \cos \varphi_z \cdot \omega_z + l_1 \cdot \cos \varphi_1 \cdot \omega_1 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

В системе уравнений (10) $\dot{z}$ – относительная скорость штока гидроцилиндра 5, т.е. скорость штока относительно гидроцилиндра 5. Обозначим ее v^r , тогда система уравнений (10) примет вид.

$$\begin{cases} v^r \cdot \cos \varphi_z - z \cdot \sin \varphi_z \cdot \omega_z - l_1 \sin \varphi_1 \cdot \omega_1 = 0 \\ v^r \cdot \sin \varphi_z + z \cdot \cos \varphi_z \cdot \omega_z + l_1 \cdot \cos \varphi_1 \cdot \omega_1 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Умножая первое уравнение системы уравнений (11) на $\sin \varphi_z$, а второе на $\cos \varphi_z$, и вычитая из второго первое, получим.

$$\omega_z = -\frac{l_1 \cdot \cos(\varphi_z - \varphi_1)}{z} \cdot \omega_1$$

Получив ω_z и подставив ω_z в первое уравнение системы уравнений (11) получим v^r .

$$v^r = [\sin \varphi_z \cdot l_1 \cdot \cos(\varphi_z - \varphi_1) + l_1 \sin \varphi_1 \cdot \omega_1] / \cos \varphi_z$$

Продифференцируем по времени систему уравнений (11). Учитывая, что $\ddot{z} = a^r$, а $2 \cdot v^r \cdot \omega_z = a^k$, получим.

$$\begin{cases} a^r \cdot \cos \varphi_z - a^k \cdot \sin \varphi_z - z \cdot \cos \varphi_z \cdot \omega_z^2 - z \cdot \sin \varphi_z \cdot \varepsilon_z - \\ - l_1 \cdot \cos \varphi_1 \cdot \omega_1^2 - l_1 \cdot \sin \varphi_1 \cdot \varepsilon_1 = 0 \\ a^r \cdot \sin \varphi_z + a^k \cdot \cos \varphi_z - z \cdot \sin \varphi_z \cdot \omega_z^2 + z \cdot \cos \varphi_z \cdot \varepsilon_z - \\ - l_1 \cdot \sin \varphi_1 \cdot \omega_1^2 + l_1 \cdot \cos \varphi_1 \cdot \varepsilon_1 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Задаввшись значением ε_1 , можно определить из системы уравнений (12) a^r и ε_z . Для этого умножим первое уравнение системы уравнений (12) на $\cos \varphi_z$, а второе на $\sin \varphi_z$ и сложим.

$$a^r = -l_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \sin(\varphi_z - \varphi_1) + l_1 \cdot \omega_1^2 \cdot \cos(\varphi_z - \varphi_1) + z \cdot \omega_z^2$$

Подставив в первое уравнение системы уравнений (12) a^r получим ε_z .

$$\begin{aligned} \varepsilon_z = \{ & -a^k \cdot \sin \varphi_z - z \cdot \cos \varphi_z \cdot \omega_z^2 - l_1 \cdot \cos \varphi_1 \cdot \omega_1^2 - l_1 \cdot \sin \varphi_1 \cdot \varepsilon_1 + \\ & + [-l_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \sin(\varphi_z - \varphi_1) + l_1 \cdot \omega_1^2 \cdot \cos(\varphi_z - \varphi_1) + z \cdot \omega_z^2] \cdot \cos \varphi_z \} / z \cdot \sin \varphi_z \end{aligned}$$

Составим векторное уравнение для замкнутого контура CEF

$$\vec{c} + \vec{l}_4 = \vec{s} \quad (13)$$

Спроецируем уравнение (13) на оси координат, учитывая, что $\overline{l_4} = \text{const}$

$$\begin{cases} c \cdot \cos \alpha + l_4 \cdot \cos \varphi_4 = s \cdot \cos \varphi_s \\ c \cdot \sin \alpha + l_4 \cdot \sin \varphi_4 = s \cdot \sin \varphi_s \end{cases} \quad (14)$$

Где $\alpha = \text{const}$, так как точки C и F принадлежат звену 6, которое при рассмотрении механизма поворота ковша вокруг точки C считаем неподвижным. Возведя в квадрат уравнения (14) и сложив их, получим.

$$s = \sqrt{l_4^2 + c^2 + 2c \cdot l_4 \cdot \cos(\varphi_4 - \alpha)} \quad (15)$$

Из системы уравнений (14) можно выразить $\text{tg} \varphi_s$

$$\text{tg} \varphi_s = \frac{c \cdot \sin \alpha + l_4 \cdot \sin \varphi_4}{c \cdot \cos \alpha + l_4 \cdot \cos \varphi_4}, \text{ откуда } \varphi_s = \arctg \frac{c \cdot \sin \alpha + l_4 \cdot \sin \varphi_4}{c \cdot \cos \alpha + l_4 \cdot \cos \varphi_4} \quad (16)$$

Составим векторное уравнение для замкнутого контура CDE

$$\overline{l_2} + \overline{l_3} = \overline{s} \quad (17)$$

Спроецируем уравнение (17) на оси координат

$$\begin{cases} l_2 \cdot \cos \varphi_2 + l_3 \cdot \cos \varphi_3 = s \cdot \cos \varphi_s \\ l_2 \cdot \sin \varphi_2 + l_3 \cdot \sin \varphi_3 = s \cdot \sin \varphi_s \end{cases} \quad (18)$$

Используя теорему косинусов, можно записать (см. рис. 3)

$$\begin{cases} l_2^2 = s^2 + l_3^2 - 2 \cdot l_3 \cdot s \cdot \cos \varphi_s \\ l_3^2 = s^2 + l_2^2 - 2 \cdot l_2 \cdot s \cdot \cos \varphi_s \end{cases} \quad (19),$$

Откуда получаем

$$\varphi_{3s} = \arccos \frac{l_2^2 - s^2 - l_3^2}{2 \cdot l_3 \cdot s}, \text{ а } \varphi_{2s} = \arccos \frac{l_3^2 - s^2 - l_2^2}{2 \cdot l_2 \cdot s} \quad (20)$$

Как видно из рис. 3

$$\varphi_2 = \varphi_s + \varphi_{2s}, \text{ а } \varphi_3 = \varphi_s + \varphi_{3s} \quad (21)$$

Тогда, подставив в формулы (21) φ_s из (16) и φ_{2s} , φ_{3s} из (20), получим зависимости φ_2 и φ_3 от φ_4 .

$$\varphi_2 = \arctg \frac{c \cdot \sin \alpha + l_4 \cdot \sin \varphi_4}{c \cdot \cos \alpha + l_4 \cdot \cos \varphi_4} + \arccos \frac{l_3^2 - l_4^2 - c^2 - 2c \cdot l_4 \cdot \cos(\varphi_4 - \alpha) - l_2^2}{2 \cdot l_2 \cdot \sqrt{l_4^2 + c^2 + 2c \cdot l_4 \cdot \cos(\varphi_4 - \alpha)}} \quad (21)$$

$$\varphi_3 = \arctg \frac{c \cdot \sin \alpha + l_4 \cdot \sin \varphi_4}{c \cdot \cos \alpha + l_4 \cdot \cos \varphi_4} + \arccos \frac{l_2^2 - l_4^2 - c^2 - 2c \cdot l_4 \cdot \cos(\varphi_4 - \alpha) - l_3^2}{2 \cdot l_3 \cdot \sqrt{l_4^2 + c^2 + 2c \cdot l_4 \cdot \cos(\varphi_4 - \alpha)}} \quad (22)$$

Для определения скоростей и ускорений звеньев механизма поворота ковша вокруг точки C используем замкнутый векторный контур $CDFE$. Составим векторное уравнение.

$$\overline{l_2} + \overline{l_3} = \overline{c} + \overline{l_4} \quad (23)$$

Спроецируем векторное уравнение (23) на оси координат.

$$\begin{cases} l_2 \cdot \cos \varphi_2 + l_3 \cdot \cos \varphi_3 = c \cdot \cos \alpha + l_4 \cdot \cos \varphi_4 \\ l_2 \cdot \sin \varphi_2 + l_3 \cdot \sin \varphi_3 = c \cdot \sin \alpha + l_4 \cdot \sin \varphi_4 \end{cases} \quad (24)$$

Продифференцируем по времени систему уравнений (24)

$$\begin{cases} -l_2 \sin \varphi_2 \cdot \omega_2 - l_3 \cdot \sin \varphi_3 \cdot \omega_3 = -l_4 \cdot \sin \varphi_4 \cdot \omega_4 \\ l_2 \cdot \cos \varphi_2 + l_3 \cdot \cos \varphi_3 = l_4 \cdot \cos \varphi_4 \cdot \omega_4 \end{cases} \quad (25)$$

Из системы уравнений (25), умножив первое уравнение на $\cos \varphi_3$, а второе на $\sin \varphi_3$, и сложив их, получим.

$$\omega_2 = \frac{l_4 \cdot \sin(\varphi_3 - \varphi_4)}{l_2 \cdot \sin(\varphi_3 - \varphi_2)}$$

Подставив в первое уравнение системы уравнений (25) ω_2 получим ω_3 , зависящее от ω_4 .

$$\omega_3 = \frac{l_4 \cdot \omega_4 \cdot [\sin \varphi_4 \cdot \sin(\varphi_3 - \varphi_2) - \sin \varphi_2 \cdot \sin(\varphi_3 - \varphi_4)]}{l_3 \cdot \sin \varphi_3 \cdot \sin(\varphi_3 - \varphi_2)}$$

Продифференцируем по времени систему уравнений (25)

$$\begin{cases} -l_2 \cdot \cos \varphi_2 \cdot \omega_2^2 - l_2 \cdot \sin \varphi_2 \cdot \varepsilon_2 - l_3 \cdot \cos \varphi_3 \cdot \omega_3^2 - l_3 \cdot \sin \varphi_3 \cdot \varepsilon_3 = \\ = -l_4 \cdot \cos \varphi_4 \cdot \omega_4^2 - l_4 \cdot \sin \varphi_4 \cdot \varepsilon_4 \\ l_2 \cdot \sin \varphi_2 \cdot \omega_2^2 + l_2 \cdot \cos \varphi_2 \cdot \varepsilon_2 - l_3 \cdot \sin \varphi_3 \cdot \omega_3^2 + l_3 \cdot \cos \varphi_3 \cdot \varepsilon_3 = \\ = -l_4 \cdot \sin \varphi_4 \cdot \omega_4^2 + l_4 \cdot \cos \varphi_4 \cdot \varepsilon_4 \end{cases} \quad (26)$$

Умножив первое уравнение системы уравнений (26) на $\cos \varphi_3$, а второе на $\sin \varphi_3$ и сложив эти два уравнения, в итоге получим.

$$\varepsilon_2 = \frac{l_3 \cdot \omega_3^2 + l_2 \cdot \cos(\varphi_3 - \varphi_2) \cdot \omega_2^2 - l_4 \cdot \cos(\varphi_4 - \varphi_3) \cdot \omega_4^2 + l_4 \cdot \sin(\varphi_3 - \varphi_4) \cdot \varepsilon_4}{l_2 \cdot \sin(\varphi_3 - \varphi_2)}$$

Умножив первое уравнение системы уравнений (26) на $\cos \varphi_2$, а второе на $\sin \varphi_2$ и сложив эти два уравнения, в итоге получим.

$$\varepsilon_3 = \frac{l_2 \cdot \omega_2^2 + l_3 \cdot \cos(\varphi_3 - \varphi_2) \cdot \omega_3^2 - l_4 \cdot \cos(\varphi_4 - \varphi_2) \cdot \omega_4^2 + l_4 \cdot \sin(\varphi_2 - \varphi_4) \cdot \varepsilon_4}{l_3 \cdot \sin(\varphi_2 - \varphi_3)}$$

Зная зависимости $\varphi_2 = f(\varphi_4)$, $\varphi_3 = f(\varphi_4)$, $\omega_2 = f(\omega_4)$, $\omega_3 = f(\omega_4)$, $\varepsilon_2 = f(\varepsilon_4)$, $\varepsilon_3 = f(\varepsilon_4)$, можно установить зависимости $\varphi_4 = f(\varphi_2)$, $\varphi_3 = f(\varphi_2)$, $\omega_4 = f(\omega_2)$, $\omega_3 = f(\omega_2)$, $\varepsilon_4 = f(\varepsilon_2)$, $\varepsilon_3 = f(\varepsilon_2)$.

Как видно из рис. 3 $\varphi_1 = \varphi_2 + \beta$, где $\beta = \text{const}$. Отсюда получаем $\omega_1 = \omega_2$ и $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$. Таким образом, отсюда можно установить зависимости кинематических параметров механизма поворота ковша погрузчика вокруг точки С от кинематических параметров z , φ_z , ω_z , ε_z гидроцилиндра 5.

1. Артоболевский И.И. Теория машин и механизмов. – М.: Наука, 1988.
2. Фролов К.В., Попов С.А. и др. Теория машин и механизмов. – М.: Высшая школа, 2001.
3. Кульбачный О.И., Гродзенская Л.С. и др. Теория машин и механизмов. Проектирование. – М.: Высшая школа, 1970.
4. Осецкий В.М., Горбачев Б.Г. и др. Прикладная механика. – М.: Машиностроение, 1977.
5. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления для втузов, т. 1. – М.: Наука, 1985. **ПЛАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Бусыгин Александр Михайлович – кандидат технических наук, доцент, МГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: Busy9@rambler.ru.

UDC 622.233.5.051.78.0015

KINEMATIC ANALYSIS OF THE MECHANISM OF THE DRIVE OF THE BUCKET WHEEL FRONT LOADER WITH TWO DEGREES OF FREEDOM ANALYTICAL METHOD

Busygin A.M., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia, e-mail: Busy9@rambler.ru.

Kinematic analysis of the mechanism is an important technical engineering challenge in designing and construction of any mechanism. The most preferred of all existing methods of kinematic analysis (graphical, grapho – analytical, analytical) is an analytical method. As with mathematical equations linking the main kinematic and geometric parameters of the mechanism, it is possible to make a program to automate the calculation process, and the degree of precision of the calculations can be set to any.

The article considers the kinematic analysis of the analytical method of the drive mechanism of the bucket wheel front loader with two degrees of freedom. Composed of equations that determine the mathematical relationships between the geometric (stroke cylinders, the rotation angles of the links, the linear dimensions of the links) and kinematic (linear speeds of the cylinders, the angular velocities and angular accelerations of the links) parameters of the drive mechanism of the bucket wheel front loader with two degrees of freedom. Obtained in this article, mathematical relationships can be used in the design of mechanisms of this type. In addition, mathematical equations in this article can be used to create relevant programs that significantly reduce the time when the analysis of different variants of kinematic schemes and the design of mechanisms of this type, thereby greatly facilitating the work of design engineers involved in the creation of such a mechanism.

Key words: kinematic analysis, analytical method, the vector model of the mechanism, method, closed-loop, front wheel loader, angular velocity, angular acceleration.

REFERENCES

1. Artobolevskii I.I. *Teoriya mashin i mekhanizmov* (Theory of machines and mechanisms), Moscow, Nauka, 1988.
2. Frolov K.V., Popov S.A. *Teoriya mashin i mekhanizmov* (Theory of machines and mechanisms), Moscow, Vysshaya shkola, 2001.
3. Kul'bachnyi O.I., Grodzenskaya L.S. *Teoriya mashin i mekhanizmov. Proektirovanie* (Theory of machines and mechanisms. Design), Moscow, Vysshaya shkola, 1970.
4. Osetskii V.M., Gorbachev B.G. *Prikladnaya mekhanika* (Applied mechanics), Moscow, Mashinostroyeniye, 1977.
5. Piskunov N.S. *Differentsial'noe i integral'noe ischisleniya dlya vtuzov*, t. 1 (Differential and integral calculus for technical colleges, vol. 1), Moscow, Nauka, 1985.

