

## КИНЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ОЧИСТКИ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА С РЕГУПЕРАТИВНЫМ ПРИВОДОМ РЕШЕТ И ТРАНСПОРТНОЙ ДОСКИ АНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Мартыненко Д.С.<sup>1</sup>, Устинов Н.Н.<sup>1</sup>, Смолин Н.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья», Тюмень, Россия (625003, Тюмень, ул. Республики, 7), e-mail: UstinovNikNik@mail.ru

---

Проведен кинематический анализ механизма очистки зерноуборочного комбайна с регенеративным приводом решет и транспортной доски, предусматривающим установку на верхних концах двуплечих рычагов пружинных аккумуляторов, с двумя точками неустойчивого равновесия. Причем на каждом из двух двуплечих рычагов закреплены, по меньшей мере, два пружинных аккумулятора, представляющих собой пружины растяжения-сжатия. Для кинематического анализа предложенного механизма применен аналитический метод векторных контуров. Подробно рассмотрено применение данного метода для определения кинематических параметров движения шатуна и двуплечего рычага механизма очистки. Представлены аналитические выражения для определения углов поворота, аналогов (передаточных отношений) угловых скоростей и ускорений звеньев, длины пружинных аккумуляторов в любом положении механизма. Результаты работы могут быть полезны при решении задач связанных с определением динамических параметров механизма очистки.

---

Ключевые слова: зерноуборочный комбайн, система очистки, регенеративный привод, кинематический анализ.

## KINEMATIC STUDIES CLEANING MECHANISM COMBINE HARVESTERS WITH REGENERATIVE DRIVE A SIEVE AND TRANSPORT BOARD ANALYTICAL METHODS

Martynenko D.S.<sup>1</sup>, Ustinov N.N.<sup>1</sup> Smolin N.I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal Stat Budgetery Educational Institution of Higher Professional Education Norten-Ural State Agricultural University (FSBEI HPE «Norten Trans-Ural SAU»), Tyumen, Russia (625003, Tyumen, Republic Street, 7), e-mail: UstinovNikNik@mail.ru

---

An analysis of the kinematic mechanism for cleaning a combine harvester with a regenerative drive sieves and transport board. Regenerative drive involves the installation on the upper ends of the double-arm levers spring batteries, with two points of unstable equilibrium. Wherein each of the two double-arm levers are fixed at least two spring accumulator constituting a compression-tension springs. For kinematic analysis of the proposed mechanism is applied analytical method of vector outlines. Discussed in detail the application of this method to determine the kinematic parameters of the movement of the connecting rod and double-arm lever mechanism clean. The analytical expressions for determining the rotation angles analogues (ratios) of the angular velocity and acceleration units, the length of spring batteries in any position of the mechanism. The results can be useful for solving problems related to the definition of the dynamic parameters of cleaning mechanism.

---

Key words: combine harvester, cleaning shoe drive, regenerative drive, kinematic analysis.

Кинематические параметры движения транспортной доски, верхнего и нижнего решета системы очистки зерноуборочного комбайна, наряду с воздушной сепарацией, определяют качественные показатели работы системы. Кинематика и динамика движения транспортной доски, и верхнего и нижнего решета должна способствовать быстрому перераспределению частиц зернового вороха, для улучшения сепарации воздушным потоком [1].

Для системы очистки зерноуборочного комбайна, предлагается применить регенеративный привод, предусматривающий установку на верхних концах двуплечих

рычагов очистки (в месте крепления шатунов) пружин растяжения-сжатия (пружинных аккумуляторов, с двумя точками неустойчивого равновесия) [4, 5]. Причем на каждом из двух двуплечих рычагов закреплены, по меньшей мере, два пружинных аккумулятора, представляющих собой пружины растяжения-сжатия. Один конец пружинного аккумулятора закреплен при помощи кронштейна на двуплечем рычаге, другой крепится на кронштейне механизма натяжения, позволяющего регулировать натяжение каждого пружинного аккумулятора.

### Цель исследования

Цель — совершенствование системы очистки зерноуборочного комбайна путем применения рекуперативного привода решет и транспортной доски для снижения энергоемкости процесса очистки, повышения качественных показателей работы системы.

Одной из важнейших задач, исходя из указанной цели, является исследование кинематики механизма очистки. Для выявления взаимосвязи кинематических параметров механизма очистки зерноуборочного комбайна с его метрическими параметрами необходимо получить аналитические выражения.

### Метод исследования

Для кинематического анализа используем аналитический метод векторных контуров [2]. Расчетная схема системы очистки зерноуборочного комбайна рекуперативного привода решет и стрясной доски зерноуборочного комбайна представлена на рисунке 1.

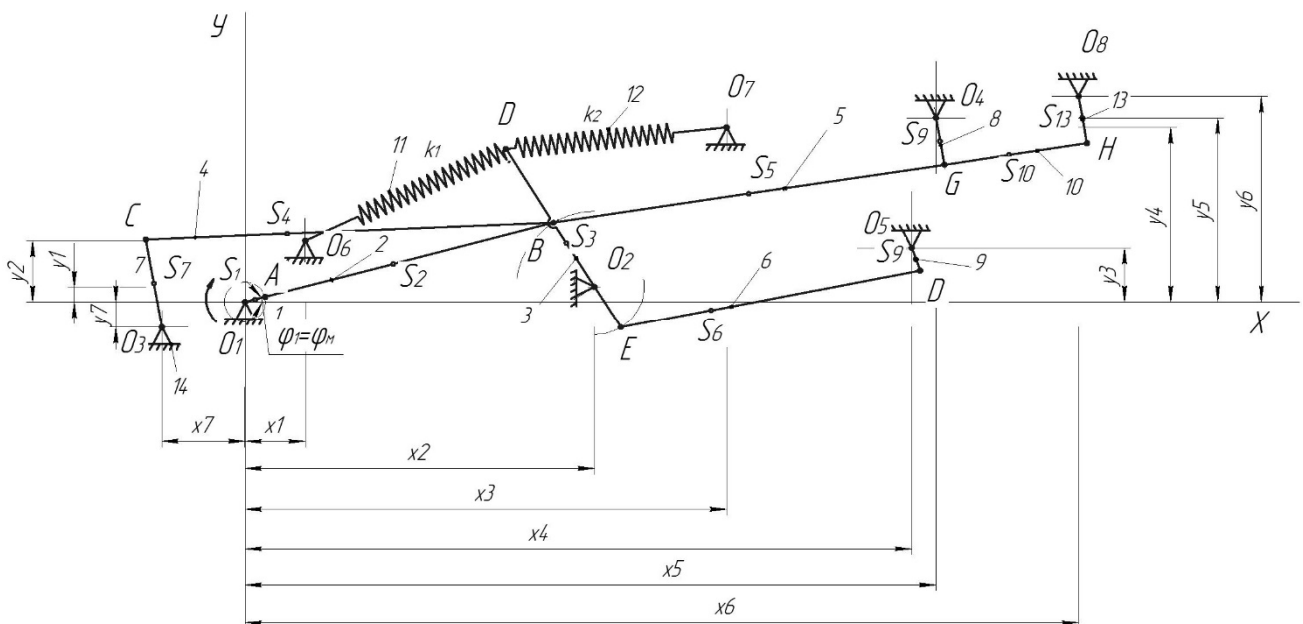


Рис. 1. Расчетная схема системы очистки зерноуборочного комбайна: 1 – колебательный вал, 2 – шатун, 3 – рычаг, 4 – стрясная доска, 5 – верхнее решето, 6 – нижнее решето, 7, 8, 9, 14 – подвески, 10 – удлинитель верхнего решета, 11, 12 – пружинные аккумуляторы, 13 – рычаг, 15 – опора

Разобьём замкнутый четырехугольник на два треугольника  $O_1AO_2$ ,  $ABO_2$  (рис.2). Для этих контуров составим следующие векторные уравнения:

$$l_1 + s_1 - l_{O_1O_2} = 0, \quad (1)$$

$$l_2 - l_{O_2B} - s_1 = 0. \quad (2)$$

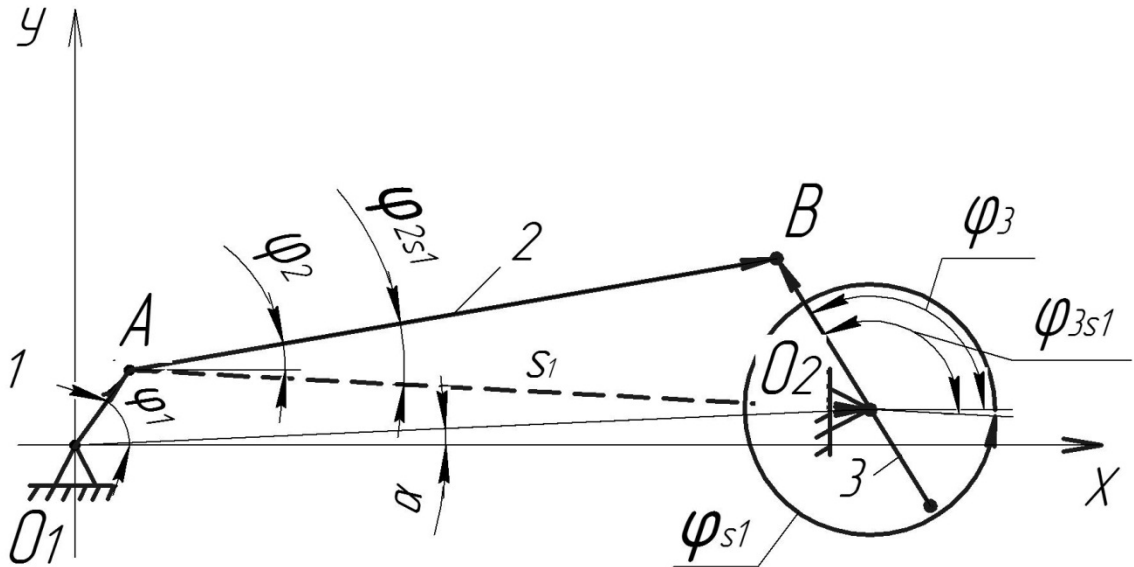


Рис. 2. Схема к определению положений 2-го и 3-го звеньев

где  $s_1$  – переменный по модулю вектор, определяющий положение точек А и В механизма;  $l_{O_1O_2}$  - длина отрезка  $O_1O_2$ ;  $l_2$  - длина шатуна 2;  $l_{O_2B}$  - длина отрезка  $O_2B$  рычага 3.

Проектируем векторы уравнения на оси  $x$  и  $y$ . Имеем:

на ось  $x$   $l_1 \cos \varphi_1 + s_1 \cos \varphi_{s1} - l_{O_1O_2} \cos \alpha = 0, \quad (3)$

на ось  $y$   $l_1 \sin \varphi_1 + s_1 \sin \varphi_{s1} - l_{O_1O_2} \sin \alpha = 0. \quad (4)$

Здесь  $\varphi_1$  – угол поворота кривошипа 1;  $\alpha = \arctan\left(\frac{y_1}{x_1}\right)$  (рис. 1).

Из уравнений (3) и (4) получаем

$$\tan \varphi_{s1} = \frac{l_{O_1O_2} \sin \alpha - l_1 \sin \varphi_1}{l_{O_1O_2} \cos \alpha - l_1 \cos \varphi_1}. \quad (5)$$

Модуль вектора  $s_1$  из уравнения (4)

$$s_1 = \frac{l_{O_1O_2} \sin \alpha - l_1 \sin \varphi_1}{\sin \varphi_{s1}}. \quad (6)$$

Далее, рассматривая треугольник  $ABO_2$ , получим следующие уравнения:

$$l_{BO_2}^2 + s_1^2 + 2s_1 l_{BO_2} \cos \varphi_{3s1}, \quad (7)$$

$$l_{BO_2}^2 = l_2^2 + s_1^2 - 2s_1 l_2 \cos \varphi_{2s1}. \quad (8)$$

Из уравнений (7) и (8) определяем углы наклона векторов  $l_2$  и  $l_3$  к вектору  $s_1$  обозначенные через  $\varphi_{3s1}$ ,  $\varphi_{2s1}$ .

$$\varphi_{2s1} = \arccos \left( \frac{l_2^2 + s_1^2 - l_{BO_2}^2}{2l_2s_1} \right), \quad (9)$$

$$\varphi_{3s1} = \arccos \left( \frac{l_2^2 - l_{BO_2}^2 - s_1^2}{2l_{BO_2}s_1} \right). \quad (10)$$

Далее получим выражения для определения углов поворота  $\varphi_3$ ,  $\varphi_2$ :

$$\varphi_2 = \arccos \left( \frac{l_2^2 + s_1^2 - l_{BO_2}^2}{2l_2s_1} \right) + \varphi_{s1}, \quad (11)$$

$$\varphi_3 = \arccos \left( \frac{l_2^2 - l_{BO_2}^2 - s_1^2}{2l_{BO_2}s_1} \right) + \varphi_{s1}. \quad (12)$$

Для определения скоростей и ускорений звеньев механизма очистки составляем векторное уравнение замкнутости контура  $O_1ABO_2$ . Имеем

$$l_{O_1O_2} + l_1 + l_2 = l_{O_2B}. \quad (13)$$

Вводя обозначение  $l_{O_2B} = l_3$ , проецируем уравнение (2.16) на оси  $x$  и  $y$  получим:

$$l_{O_1O_2} \cos \alpha + l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 = l_3 \cos \varphi_3, \quad (14)$$

$$l_{O_1O_2} \sin \alpha + l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 = l_3 \sin \varphi_3. \quad (15)$$

Для определения аналогов угловых скоростей дифференцируем полученные уравнения [3] по обобщенной координате  $\varphi_1$ .

$$l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 \frac{d\varphi_2}{d\varphi_1} = l_3 \sin \varphi_3 \frac{d\varphi_3}{d\varphi_1}, \quad (16)$$

$$l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 \frac{d\varphi_2}{d\varphi_1} = l_3 \cos \varphi_3 \frac{d\varphi_3}{d\varphi_1}. \quad (17)$$

Здесь  $\frac{d\varphi_2}{d\varphi_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = u_{21}$ ,  $\frac{d\varphi_3}{d\varphi_1} = \frac{\omega_3}{\omega_1} = u_{31}$ , передаточные отношения угловых скоростей  $\omega_2$  и  $\omega_3$  к угловой скорости входного звена  $\omega_1$ . В этом случае уравнения 16, 17 принимают вид

$$l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 \frac{\omega_2}{\omega_1} = l_3 \sin \varphi_3 \frac{\omega_3}{\omega_1}, \quad (18)$$

$$l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 \frac{\omega_2}{\omega_1} = l_3 \cos \varphi_3 \frac{\omega_3}{\omega_1}. \quad (19)$$

Выполним поворот осей на угол  $\varphi_2$ , путем вычитания из уравнения 18:

$$l_1 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) = l_3 \sin(\varphi_3 - \varphi_2) \frac{\omega_3}{\omega_1}.$$

Далее получаем уравнение

$$\frac{\omega_3}{\omega_1} = u_{31} = \frac{l_1 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{l_3 \sin(\varphi_3 - \varphi_2)}.$$

Аналогично выполним поворот осей на угол  $\varphi_3$ , получим

$$l_1 \sin(\varphi_1 - \varphi_3) = l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3) \frac{\omega_2}{\omega_1} = 0,$$

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = u_{21} = -\frac{l_1 \sin(\varphi_1 - \varphi_3)}{l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)}.$$

Для определения угловых ускорений дифференцируем уравнения (18), (19) по обобщенной координате  $\varphi_1$ :

$$l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 u_{21}^2 + u_{21}' l_2 \sin \varphi_2 = l_3 \cos \varphi_3 u_{31}^2 + u_{31}' \sin \varphi_3 l_3,$$

$$-l_1 \sin \varphi_1 - u_{21}^2 l_2 \sin \varphi_2 + u_{21}' l_2 \cos \varphi_2 = -u_{31}^2 l_3 \sin \varphi_3 + u_{31}' l_3 \cos \varphi_3.$$

Здесь  $u_{21}'$ ,  $u_{31}'$  - аналоги угловых ускорений звеньев 2 и 3 соответственно.

Выполняя поворот на угол  $\varphi_2$ , получим

$$l_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + l_2 u_{21}^2 = l_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_2) u_{31}^2 + u_{31}' l_3 \sin(\varphi_3 - \varphi_2),$$

$$l_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + u_{21}^2 l_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) + u_{21}' l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3) = l_3 u_{31}^2.$$

Из последних двух уравнений имеем:

$$u_{31}' = \frac{l_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + l_2 u_{21}^2 - l_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_2) u_{31}^2}{l_3 \sin(\varphi_3 - \varphi_2)},$$

$$u_{21}' = \frac{l_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + u_{21}^2 l_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) - u_{31}^2 l_3}{-l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)}.$$

Истинные угловые ускорения звеньев  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$  в данном случае равны:

$$\varepsilon_1 = 0, \varepsilon_2 = \omega_1^2 u_{21}' + \varepsilon_1 u_{21}, \varepsilon_3 = \omega_1^2 u_{31}' + \varepsilon_1 u_{31}.$$

### Результаты исследования

Аналогичным образом, определены углы поворота основных звеньев механизма.

Выражения для определения углов поворота основных звеньев имеют вид:

$$\varphi_4 = \varphi_{s2} - 2\pi + \arccos \frac{l_7^2 - l_4^2 - s_2^2}{-2l_4 s_2},$$

$$\varphi_5 = \varphi_{s3} - \arccos \frac{l_8^2 - l_5^2 - s_3^2}{2l_5 s_3},$$

$$\varphi_6 = \varphi_{s4} - \arccos \frac{l_6^2 + s_4^2 - l_9^2}{2l_6 s_4},$$

$$\varphi_7 = \arccos \frac{l_4^2 - l_7^2 - s_2^2}{2l_7 s_2} - 2\pi + \varphi_{s2},$$

$$\varphi_8 = \varphi_{s3} + \arccos \frac{l_5^2 - l_8^2 - s_3^2}{2l_8 s_3},$$

$$\varphi_9 = \varphi_{s4} + \pi - \arccos \frac{l_9^2 + s_4^2 - l_6^2}{2l_9 s_4},$$

$$\varphi_{11} = \arctan \left( \frac{l_{O_2O_6} \sin \alpha_5 - l_{O_2D} \sin(\pi - \varphi_3)}{l_{O_2O_6} \cos \alpha_5 - l_{O_2D} \cos(\pi - \varphi_3)} \right)$$

$$\varphi_{12} = \arctan \left( \frac{-l_{O_2O_7} \sin \alpha_6 + l_{O_2D} \sin \varphi_3}{-l_{O_2O_7} \cos \alpha_6 + l_{O_2D} \cos \varphi_3} \right).$$

где  $l_4, l_5, l_6, l_7, l_8, l_9$  – длины соответствующих звеньев механизма;  $l_3'$  – длина плеча  $O_2E$ ;  $l_{O_2D}$  – длина плеча  $O_2D$ ;  $l_{O_2O_6}, l_{O_2O_7}$  – расстояние между опорами  $O_2$  и  $O_6$ ,  $O_2$  и  $O_7$  соответственно.

Здесь

$$s_2 = \frac{-l_3 \cos(\pi - \varphi_3) - l_{O_3O_2} \cos \alpha_2}{\cos(\varphi_{s2} - \pi)},$$

$$s_3 = \frac{l_3 \cos \varphi_3 + l_{O_2O_4} \cos \alpha_3}{\cos \varphi_3},$$

$$s_4 = \frac{-l_3 \cos(\pi - \varphi_3) - l_{O_3O_2} \cos \alpha_2}{\cos(\varphi_{s6} - \pi)},$$

$$\varphi_{s2} = \arctan \left( \frac{l_3 \sin(\pi - \varphi_3) - l_{O_3O_2} \sin \alpha_2}{-l_3 \cos(\pi - \varphi_3) - l_{O_3O_2} \cos \alpha_2} \right),$$

$$\varphi_{s3} = \arctan \left( \frac{-l_3 \sin \varphi_3 - l_{O_2O_4} \sin \alpha_3}{l_3 \cos \varphi_3 + l_{O_2O_4} \cos \alpha_3} \right),$$

$$\varphi_{s4} = \arctan \left( \frac{l_{O_2O_5} \sin \alpha_4 - l_3' \sin(2\pi - \varphi_3)}{l_{O_2O_5} \cos \alpha_4 - l_3' \cos(2\pi - \varphi_3)} \right),$$

$$\alpha_2 = \arctan \left( \frac{y_1 + y_7}{x_1 + x_7} \right),$$

$$\alpha_3 = \arctan \left( \frac{y_5 - y_1}{x_5 - x_2} \right),$$

$$\alpha_4 = \arctan \left( \frac{y_3 - y_1}{x_4 - x_2} \right),$$

$$\alpha_5 = \arctan \left( \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right),$$

$$\alpha_6 = \arctan \left( \frac{y_4 - y_1}{x_3 - x_2} \right).$$

Выражения для определения аналогов угловых скоростей для основных звеньев механизма имеют вид:

$$u_{43} = \frac{l_3 \sin(\varphi_3 - \varphi_7)}{l_4 \sin(\varphi_4 - \varphi_7)}, \quad u_{73} = \frac{-l_3 \sin(\varphi_3 - \varphi_4)}{l_7 \sin(\varphi_7 - \varphi_4)},$$

$$u_{53} = \frac{l_3 \sin(\varphi_3 - \varphi_8)}{l_5 \sin(\varphi_5 - \varphi_8)}, \quad u_{83} = -\frac{l_3 \sin(\varphi_3 - \varphi_5)}{l_8 \sin(\varphi_8 - \varphi_5)},$$

$$u_{63} = \frac{-l_3' \sin(\varphi_3 - \varphi_9)}{l_6 \sin(\varphi_6 - \varphi_9)}, \quad u_{93} = \frac{l_3' \sin(\varphi_3 - \varphi_6)}{l_9 \sin(\varphi_9 - \varphi_6)}.$$

Выражения для определения аналогов угловых ускорений для основных звеньев механизма имеют вид:

$$u_{43}' = \frac{l_7 u_{73}^2 - u_{43}^2 l_4 \cos(\varphi_4 - \varphi_7) + l_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_7)}{l_4 \sin(\varphi_4 - \varphi_7)},$$

$$u_{73}' = \frac{u_{73}^2 l_7 \cos(\varphi_7 - \varphi_4) - u_{43}^2 l_4 + l_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_4)}{l_7 \sin(\varphi_7 - \varphi_4)},$$

$$u_{53}' = \frac{l_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_8) - u_{53}^2 l_5 \cos(\varphi_5 - \varphi_8) + l_8 u_{83}^2}{l_5 \sin(\varphi_5 - \varphi_8)},$$

$$u_{83}' = \frac{u_{53}^2 l_5 - l_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_5) + u_{83}^2 \cos(\varphi_3 - \varphi_5)}{l_8 \sin(\varphi_8 - \varphi_5)},$$

$$u_{63}' = \frac{u_{93}^2 l_9 - l_3' \cos(\varphi_3 - \varphi_9) - u_{63}^2 l_6 \cos(\varphi_6 - \varphi_9)}{l_6 \sin(\varphi_6 - \varphi_9)},$$

$$u_{93}' = \frac{l_3' \cos(\varphi_3 - \varphi_6) + u_{63}^2 l_6 - u_{93}^2 l_9 \sin(\varphi_9 - \varphi_6)}{l_6 \cos(\varphi_9 - \varphi_6)}.$$

Истинные ускорения звеньев, в данном случае равны:

$$\varepsilon_4 = \omega_3^2 u_{43}' + \varepsilon_3 u_{43}, \quad \varepsilon_5 = \omega_3^2 u_{53}' + \varepsilon_3 u_{53}, \quad \varepsilon_6 = \omega_3^2 u_{63}' + \varepsilon_3 u_{63},$$

$$\varepsilon_7 = \omega_3^2 u_{73}' + \varepsilon_3 u_{73}, \quad \varepsilon_8 = \omega_3^2 u_{83}' + \varepsilon_3 u_{83}, \quad \varepsilon_9 = \omega_3^2 u_{93}' + \varepsilon_3 u_{93}.$$

Длины упругих звеньев 11 и 12 при движении механизма определяются следующим образом:

$$l_{11} = \frac{l_{O_2 O_6} \cos \alpha_5 - l_{O_2 D} \cos(\pi - \varphi_3)}{\cos \varphi_{11}},$$

$$l_{12} = \frac{l_{O_2 O_7} \cos \alpha_6 - l_{O_2 D} \cos(\pi - \varphi_3)}{\sin(\pi - \varphi_{12})}.$$

Достоверность предложенного подхода подтверждена сравнением полученных результатов решения с результатами решения данной задачи графическим методом.

### Выводы

Таким образом, определены аналитические выражения для определения углов поворота, аналогов (передаточных отношений) угловых скоростей и ускорений звеньев, позволяющие определить значения данных параметров в любом положении механизма.

### Список литературы

1. Алфёров С.А. Воздушно-решётные очистки зерноуборочных комбайнов. — М.: Агропромиздат, 1987. — С. 18.

2. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин: учеб. для вузов. — 4-е изд. — М.: Наука, 1988. — С. 112-117.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). — М.: Наука, 1973. — С. 832.
4. Мартыненко Д.С., Устинов Н.Н., Смолин Н.И. Экспериментальное обоснование параметров рекуперативного привода решет и стрясной доски зерноуборочного комбайна // Известия Международной академии аграрного образования. – 2013. – № 17. – С. 72-74.
5. Патент РФ №2012145830/13, 20.05.2013.

**Рецензенты:**

Пирогов С.П., д.т.н., профессор, профессор кафедры теоретической и прикладной механики ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень;

Лапшин И.П., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой энергообеспечения сельского хозяйства ФГБОУ ВПО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья», г. Тюмень.