

РЕШЕНИЕ АВТОНОМНОГО НЕЛИНЕЙНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ВТОРОГО ПОРЯДКА ПРИ ПОСТРОЕНИИ ПЛОСКИХ КРИВЫХ

Скойбеда А.Т., Жуковец В.Н.

УО «Белорусский национальный технический университет», Минск

Причиной высокой проходимости колесно-шагающего движителя является дискретность следов. В работе [1] были рассмотрены вопросы работы данного движителя в составе транспортного средства: как на его эффективность влияет совместное применение ведущих колесно-шагающих движителей и ведомых круглых колес. В такой ходовой системе ведомые круглые колеса уменьшают преимущества от применения ведущих колесно-шагающих движителей, так как происходит прокладка сплошной колеи и затруднено преодоление препятствий. Следовательно, целесообразно использовать в ходовой системе исключительно колесно-шагающие движители. В ряде случаев, когда это оправдано, ходовая система может быть с полным приводом. Если же нет полного привода, то возможно совместное применение колесно-шагающих движителей двух типов: упомянутых выше, в качестве ведущих, и движителей упрощенной конструкции в качестве ведомых (рисунки 1, 2).

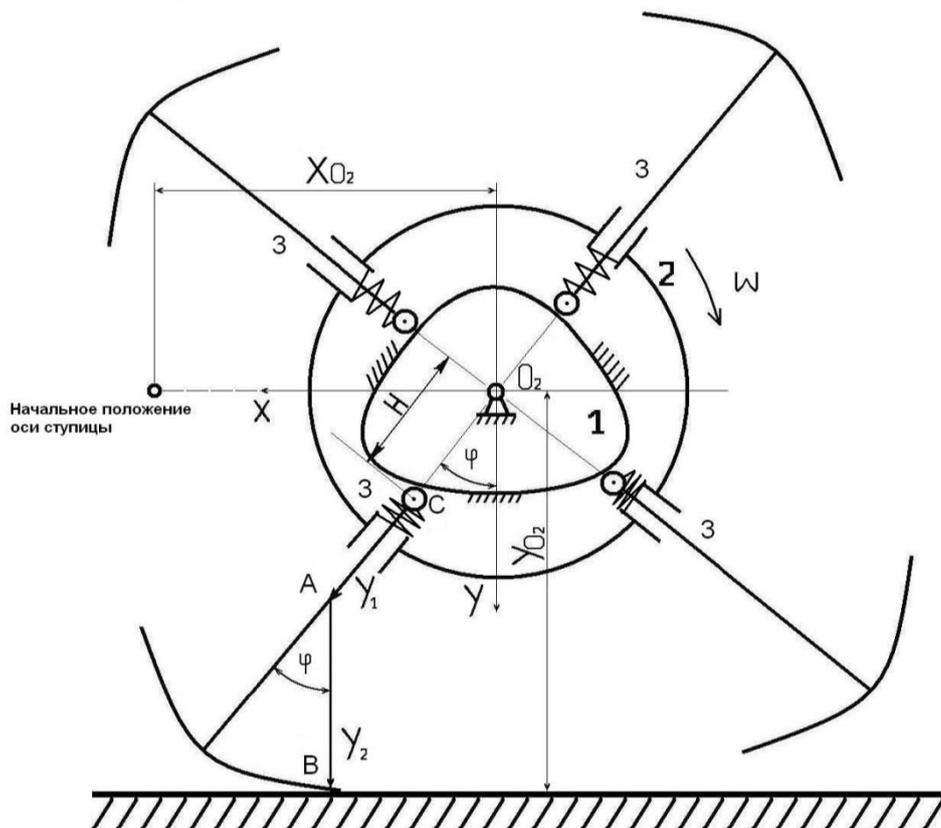


Рис. 1. Ведомый колесно-шагающий движитель с четырьмя ногами

В состав колесно-шагающего движителя упрощенной конструкции согласно рисунку 1 входят звенья: жестко закрепленный на оси O_2 кулачок 1, совершающее вращение вокруг кулачка с угловой скоростью ω водило 2, перемещаемые водилом ноги 3, что обкатываются на роликах вокруг неподвижного кулачка. К ногам присоединены

опорные башмаки. Башмаки могут не иметь надежного сцепления с грунтом, поэтому постоянное вращение водила желательно обеспечить за счет цепной передачи от ведущего движителя.

Таким образом, данный движитель представляет собой кулачковый механизм с четырьмя роликовыми толкателями. Для обеспечения постоянного контакта роликов с профилем кулачка предусмотрены прижимные пружины и направляющий канал на наружной поверхности кулачка. Кроме того, возможен и второй вариант упрощенной конструкции колесно-шагающего движителя, который имеет только три ноги. Этот вариант движителя может обеспечивать тот же размер шага, что и вариант с четырьмя ногами, имея при этом меньшие общие габариты (рисунок 2).

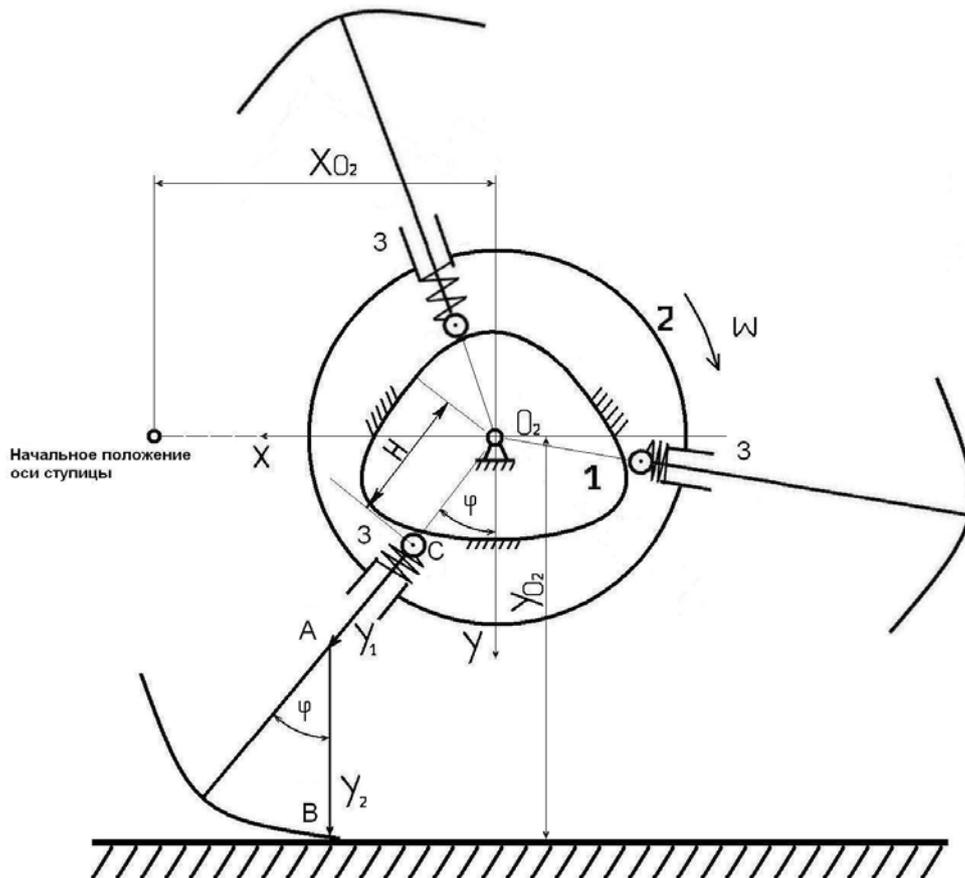


Рис. 2. Ведомый колесно-шагающий движитель с тремя ногами

Таким образом, возможны конструкции ходовых систем нескольких типов. Возможна система с четырьмя ведущими шагающими колесами (полный привод), а также системы с ведущими и ведомыми шагающими колесами. Ведомые движители могут быть как четырехногими, так и трехногими. Данные ходовые системы имеют сравнительно простую и технологичную конструкцию, совмещают в себе преимущества колесного и шагающего способов передвижения.

Таким образом, данные ведомые движители представляет собой кулачковые механизмы с четырьмя или тремя роликовыми толкателями. Для обеспечения постоянного контакта роликов с профилем кулачка предусмотрены прижимные пружины и направляющий канал на наружной поверхности кулачка. Что касается опорных башмаков, то для определения их профиля применяется методика анализа плоских кривых, изложенная в работах [2, 3].

Вертикальное положение оси O_2 ступицы составит:

$$Y_{02} = (H + Y_1) \cdot \cos \varphi + Y_2 \quad (1)$$

Горизонтальное перемещение оси ступицы:

$$X_{02} = (H + Y_1) \cdot \sin \varphi + \int_0^{\varphi} \left(Y_2 - \frac{dY_1}{d\varphi} \cdot \sin \varphi \right) \cdot d\varphi \quad (2)$$

Аналог скорости по горизонтали:

$$\frac{dX_{02}}{d\varphi} = \frac{dH}{d\varphi} \cdot \sin \varphi + (H + Y_1) \cdot \cos \varphi + Y_2 \quad (3)$$

При условии движения по плоской поверхности, очень важно обеспечить постоянное значение вертикального положения оси O_2 ступицы:

$$Y_{02} = (H + Y_1) \cdot \cos \varphi + Y_2 = \text{const}$$

Следовательно, получаем равенство:

$$(H + Y_1) \cdot \cos \varphi + Y_2 = R_0 + r + C \quad (4)$$

где: R_0 – радиус начальной окружности кулачка, м; r – радиус ролика, м; C – длина стойки башмака, м.

После подстановки формулы (4) в выражение (3) получаем:

$$\frac{dX_{02}}{d\varphi} = \frac{dH}{d\varphi} \cdot \sin \varphi + R_0 + r + C \quad (5)$$

Таким образом, задача заключается в том, чтобы определить функцию $H(\varphi)$, затем найти функции $Y_1(\varphi)$ и $Y_2(\varphi)$ при заданных величинах C , R_0 , r согласно работам [1, 2]. По функции $H(\varphi)$ строим профиль неподвижного кулачка в координатах осей X и Y , приведенных на рисунках 1, 2. Для расчетов используем приведенные ниже формулы из работы [3]:

$$\begin{cases} X = H \cdot \sin \varphi - r \cdot \sin \psi, \\ Y = H \cdot \cos \varphi - r \cdot \cos \psi. \end{cases} \quad (6)$$

$$\psi = \varphi - \arctg \left(\left(\frac{dH}{d\varphi} \right) / H \right). \quad (7)$$

После этого, по значениям $Y_1(\varphi)$, $Y_2(\varphi)$ можно вычислить координаты X_B и Y_B точек профиля опорного башмака:

$$\begin{cases} X_B = Y_2 \cdot \sin \varphi, \\ Y_B = Y_1 + Y_2 \cdot \cos \varphi. \end{cases} \quad (8)$$

Затем координаты профиля выразим через радиус-вектор ρ и угол его поворота α , что отсчитывается от оси симметрии башмака:

$$\alpha = \arctg(X_B/Y_B) \quad (9)$$

$$\rho = \sqrt{X_B^2 + Y_B^2}. \quad (10)$$

Описанные выше формулы позволяют определить основные геометрические параметры движителя, но открытым остается вопрос, на основании каких критериев следует искать функцию $H(\varphi)$, которая и задает, по сути дела, все характеристики механизма.

Поскольку движитель подвергается серьезным динамическим нагрузкам, возникает проблема обеспечения контактной прочности соприкасающихся поверхностей кулачка и роликов. Как известно, величина контактных напряжений вычисляется по формуле Герца [4]:

$$\sigma_K = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{P_\Sigma \cdot E}{b \cdot \cos \gamma} \cdot \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right)}; \text{ МПа.} \quad (11)$$

где: P_Σ – суммарная сила, действующая вдоль оси толкателя, Н; E – приведенный модуль упругости материалов кулачка и ролика, МПа; b – длина линии контакта кулачка с роликом, мм; γ – величина угла давления, радианы; r – радиус ролика, мм; R – радиус кривизны кулачкового профиля, мм.

Из зависимости (11) можно сделать вывод, что кривизна профиля криволинейной цилиндрической поверхности неподвижного кулачка оказывает серьезное влияние на величину контактных напряжений. Таким образом, при определении функции $H(\varphi)$ будем придерживаться следующего подхода: зададимся некоторой функцией $K(\varphi)$ изменения кривизны линии, эквидистантной профилю кулачка и проходящей через ось вращения ролика при его движении вокруг кулачка. Данная функция должна обеспечивать допустимую величину контактных напряжений. Затем по заданной функции $K(\varphi)$ находим функцию $H(\varphi)$, что позволит в дальнейшем определить все остальные параметры движителя.

При решении задачи о вычислении радиуса кривизны профиля кулачка были получены следующие выражения [1, 3]:

$$\begin{cases} \frac{dH}{d\varphi} = H \cdot \operatorname{tg} \gamma, \\ R = \frac{H}{\left(1 - \frac{d\gamma}{d\varphi}\right) \cdot \cos \gamma} - r. \end{cases} \quad (12)$$

где: $H(\varphi)$ – расстояние между осями кулачка и ролика, мм; $\gamma(\varphi)$ – угол давления кулачка на ролик, радианы; $R(\varphi)$ – радиус кривизны профиля кулачка, мм; r – радиус ролика, мм; φ – угол поворота ступицы, радианы. Примем обозначение: $K(\varphi) = 1/(R(\varphi) + r)$ – кривизна линии, описываемой осью вращения ролика при его качении вокруг профиля кулачка, 1/мм. Для соответствия методике, изложенной в работах [1, 3] примем обозначение, которого будем придерживаться в дальнейшем: $H(\varphi) = \rho(\varphi)$.

Тогда, после выполнения несложных преобразований системы (12), можно получить следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\rho}{d\varphi} = \rho \cdot \operatorname{tg} \gamma, \\ \frac{d\gamma}{d\varphi} = 1 - \frac{\rho \cdot K}{\cos \gamma}. \end{cases} \quad (13)$$

Данная система (13) из двух дифференциальных уравнений первого порядка после подстановок и преобразований приводится к нелинейному дифференциальному уравнению второго порядка [1, 5, 6]:

$$K \cdot \eta''_{\varphi\varphi} - K'_{\varphi} \cdot \eta'_{\varphi} + K \cdot \eta + K'_{\varphi} \cdot \sqrt{1 - \eta^2} = 0. \quad (14)$$

В работе [1] были получены формулы:

$$\rho = \frac{\sqrt{1 - \eta^2} - \eta'_{\varphi}}{K} \quad (15)$$

$$\rho = -\frac{(\eta''_{\varphi\varphi} + \eta)}{K'_{\varphi}}. \quad (16)$$

Таким образом, для нахождения уравнения $\rho(\varphi)$ плоской кривой в полярных координатах следует из уравнения (14) найти функцию $\eta(\varphi)$, а затем воспользоваться выражением (15) или (16). Так как $H(\varphi) = \rho(\varphi)$, находим расстояние между осями кулачка и ролика $H(\varphi)$, а затем по формулам (1-10) определяем все остальные параметры движителя.

Для решения уравнений типа (14) можно воспользоваться методом, позволяющим привести их к линейному виду, чтобы затем получить через разложение в ряд аналитическое решение высокой точности [5, 6]:

$$K \cdot \eta''_{\varphi\varphi} - K'_{\varphi} \cdot \eta'_{\varphi} + K \cdot \eta + K'_{\varphi} \cdot \sqrt{1 - \eta^2} = 0;$$

$$\lambda(\varphi) = \sqrt{1 - (\eta(\varphi))^2}; \quad (17)$$

$$\eta(\varphi) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i \cdot \varphi^i;$$

$$\lambda(\varphi) = \sum_{i=0}^{\infty} b_i \cdot \varphi^i;$$

$$(\lambda(\varphi))^2 + (\eta(\varphi))^2 = 1. \quad (18)$$

Произведем дифференцирование по углу φ :

$$2 \cdot \lambda(\varphi) \cdot \frac{d\lambda(\varphi)}{d\varphi} + 2 \cdot \eta(\varphi) \cdot \frac{d\eta(\varphi)}{d\varphi} = 0;$$

$$\lambda(\varphi) \cdot \frac{d\lambda(\varphi)}{d\varphi} = -\eta(\varphi) \cdot \frac{d\eta(\varphi)}{d\varphi};$$

$$\left(\sum_{i=0}^{\infty} b_i \cdot \varphi^i \right) \cdot \left(\sum_{j=1}^{\infty} j \cdot b_j \cdot \varphi^{j-1} \right) = - \left(\sum_{i=0}^{\infty} a_i \cdot \varphi^i \right) \cdot \left(\sum_{j=1}^{\infty} j \cdot a_j \cdot \varphi^{j-1} \right); \quad (19)$$

$$\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} b_i \cdot \varphi^i \cdot j \cdot b_j \cdot \varphi^{j-1} = - \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} a_i \cdot \varphi^i \cdot j \cdot a_j \cdot \varphi^{j-1};$$

$$\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} b_i \cdot j \cdot b_j \cdot \varphi^{i+j-1} = - \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} a_i \cdot j \cdot a_j \cdot \varphi^{i+j-1}.$$

Запишем равенства для каждой степени $n = i + j - 1$ переменной φ . Так как индекс $j = n + 1 - i$, то для фиксированного значения степени n все значения j будут определяться величиной i . Запишем равенство для конкретной степени n :

$$\sum_{i=0}^n b_i \cdot (n+1-i) \cdot b_{(n+1-i)} \cdot \varphi^n = - \sum_{i=0}^n a_i \cdot (n+1-i) \cdot a_{(n+1-i)} \cdot \varphi^n.$$

После сокращения на величину φ^n получаем окончательно:

$$\sum_{i=0}^n b_i \cdot (n+1-i) \cdot b_{(n+1-i)} = - \sum_{i=0}^n a_i \cdot (n+1-i) \cdot a_{(n+1-i)}. \quad (20)$$

Для степени $n = 0$ получаем:

$$\sum_{i=0}^0 b_i \cdot (1-i) \cdot b_{(1-i)} = - \sum_{i=0}^0 a_i \cdot (1-i) \cdot a_{(1-i)};$$

$$b_0 \cdot b_1 = -a_0 \cdot a_1 ..$$

Для степени $n=1$ получаем:

$$\sum_{i=0}^1 b_i \cdot (2-i) \cdot b_{(2-i)} = - \sum_{i=0}^1 a_i \cdot (2-i) \cdot a_{(2-i)};$$

$$2 \cdot b_0 \cdot b_2 + b_1 \cdot b_1 = -2 \cdot a_0 \cdot a_2 - a_1 \cdot a_1.$$

Для степени $n=2$ получаем:

$$\sum_{i=0}^2 b_i \cdot (3-i) \cdot b_{(3-i)} = - \sum_{i=0}^2 a_i \cdot (3-i) \cdot a_{(3-i)}.$$

$$b_0 \cdot b_3 + b_1 \cdot b_2 = -a_0 \cdot a_3 - a_1 \cdot a_2.$$

Для степени $n=m$ получаем:

$$\sum_{i=0}^m b_i \cdot (m+1-i) \cdot b_{(m+1-i)} = - \sum_{i=0}^m a_i \cdot (m+1-i) \cdot a_{(m+1-i)}.$$

Выполнив преобразования, запишем для четной степени $n=m$:

$$\sum_{i=0}^{0,5 \cdot m} b_i \cdot b_{(m+1-i)} = - \sum_{i=0}^{0,5 \cdot m} a_i \cdot a_{(m+1-i)}. \quad (21)$$

Для нечетной степени $n=m$ получаем:

$$2 \cdot \left(\sum_{i=0}^{0,5 \cdot (m-1)} b_i \cdot b_{(m+1-i)} \right) + (b_{(0,5 \cdot (m-1)+1)})^2 =$$

$$= -2 \cdot \left(\sum_{i=0}^{0,5 \cdot (m-1)} a_i \cdot a_{(m+1-i)} \right) - (a_{(0,5 \cdot (m-1)+1)})^2. \quad (22)$$

Итак, заданное дифференциальное уравнение можно представить в виде:

$$K \cdot \eta''_{\varphi\varphi} - K'_{\varphi} \cdot \eta'_{\varphi} + K \cdot \eta + K'_{\varphi} \cdot \lambda = 0. \quad (23)$$

Для начального значения угла $\varphi = \varphi_0 = 0$ необходимо знать величины $\gamma = \gamma_0$, $\rho = \rho_0$, а также значение кривизны линии $K(\varphi_0)$. Получаем значения начальных коэффициентов:

$$a_0 = \sin \gamma_0;$$

$$a_1 = \cos \gamma_0 - \rho_0 \cdot K(\varphi_0);$$

$$b_0 = \cos \gamma_0.$$

Выразим расчетные коэффициенты:

$$b_1 = -a_0 \cdot a_1 / b_0;$$

$$b_2 = (-2 \cdot a_0 \cdot a_2 - a_1^2 - b_1^2) / (2 \cdot b_0);$$

$$b_3 = (-a_0 \cdot a_3 - a_1 \cdot a_2 - b_1 \cdot b_2) / b_0.$$

Запишем выражения для расчетных коэффициентов более высокого порядка, исходя из формул (21, 22).

Для четной степени $n=m$:

$$b_{(m+1)} = \left(- \sum_{i=0}^{0,5 \cdot m} a_i \cdot a_{(m+1-i)} - \sum_{i=1}^{0,5 \cdot m} b_i \cdot b_{(m+1-i)} \right) / b_0. \quad (24)$$

Для нечетной степени $n = m$:

$$b_{(m+1)} = \left(2 \cdot \left(- \sum_{i=0}^{0,5 \cdot (m-1)} a_i \cdot a_{(m+1-i)} - \sum_{i=1}^{0,5 \cdot (m-1)} b_i \cdot b_{(m+1-i)} \right) - (a_{(0,5 \cdot (m-1)+1)})^2 - (b_{(0,5 \cdot (m-1)+1)})^2 \right) / (2 \cdot b_0). \quad (25)$$

Для расчета профиля кулачка с учетом допустимого уровня контактных напряжений зададимся функцией кривизны следующего вида: $K = k_0 \cdot e^{k_1 \cdot \varphi}$; где k_0, k_1 – постоянные коэффициенты. Уравнение (14) примет вид:

$$\eta''_{\varphi\varphi} - k_1 \cdot \eta'_{\varphi} + \eta + k_1 \cdot \sqrt{1 - \eta^2} = 0. \quad (26)$$

Получено автономное нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка [6]. При решении уравнения (26) задаемся начальными условиями и различными значениями коэффициентов k_0, k_1 . Из полученных вариантов функции $H(\varphi)$ выберем тот, что обеспечивает допустимый уровень контактных напряжений при рациональных значениях остальных параметров механизма движителя.

Функция кривизны и ее производная:

$$K = k_0 \cdot e^{k_1 \cdot \varphi}; \quad (27)$$

$$K'_{\varphi} = k_0 \cdot k_1 \cdot e^{k_1 \cdot \varphi}. \quad (28)$$

Воспользуемся подстановками:

$$\eta = \sum_{i=0}^{\infty} a_i \cdot \varphi^i;$$

$$\eta'_{\varphi} = \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot a_i \cdot \varphi^{i-1};$$

$$\eta''_{\varphi\varphi} = \sum_{i=2}^{\infty} i \cdot (i-1) \cdot a_i \cdot \varphi^{i-2};$$

$$\lambda = \sqrt{1 - \eta^2};$$

$$\lambda = \sum_{i=0}^{\infty} b_i \cdot \varphi^i.$$

Получаем:

$$\begin{aligned} \eta''_{\varphi\varphi} - k_1 \cdot \eta'_{\varphi} + \eta + k_1 \cdot \lambda &= 0; \\ \eta''_{\varphi\varphi} &= k_1 \cdot (\eta'_{\varphi} - \lambda) - \eta. \end{aligned} \quad (29)$$

Запишем равенства для каждой степени n переменной φ .

$$\eta = \sum_{i=0}^{\infty} a_i \cdot \varphi^i. \text{ Здесь } n = i.$$

$$\eta'_{\varphi} = \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot a_i \cdot \varphi^{i-1}. \text{ Здесь } n = i-1.$$

$$\eta''_{\varphi\varphi} = \sum_{i=2}^{\infty} i \cdot (i-1) \cdot a_i \cdot \varphi^{i-2}. \text{ Здесь } n = i - 2.$$

$$\lambda = \sum_{i=0}^{\infty} b_i \cdot \varphi^i. \text{ Здесь } n = i.$$

Таким образом

$$\eta = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cdot \varphi^n; \quad (30)$$

$$\eta'_{\varphi} = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) \cdot a_{(n+1)} \cdot \varphi^n; \quad (31)$$

$$\eta''_{\varphi\varphi} = \sum_{n=0}^{\infty} (n+2) \cdot (n+1) \cdot a_{(n+2)} \cdot \varphi^n; \quad (32)$$

$$\lambda = \sum_{n=0}^{\infty} b_n \cdot \varphi^n. \quad (33)$$

Запишем равенство

$$\begin{aligned} & \sum_{n=0}^{\infty} (n+2) \cdot (n+1) \cdot a_{(n+2)} \cdot \varphi^n = \\ & = k_1 \cdot \left(\sum_{n=0}^{\infty} (n+1) \cdot a_{(n+1)} \cdot \varphi^n - \sum_{n=0}^{\infty} b_n \cdot \varphi^n \right) - \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cdot \varphi^n. \end{aligned}$$

Тогда получим:

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2) \cdot (n+1) \cdot a_{(n+2)} \cdot \varphi^n = \sum_{n=0}^{\infty} (k_1 \cdot ((n+1) \cdot a_{(n+1)} - b_n) - a_n) \cdot \varphi^n.$$

Запишем равенство для конкретной степени n :

$$\begin{aligned} (n+2) \cdot (n+1) \cdot a_{(n+2)} \cdot \varphi^n &= (k_1 \cdot ((n+1) \cdot a_{(n+1)} - b_n) - a_n) \cdot \varphi^n; \\ a_{(n+2)} &= (k_1 \cdot ((n+1) \cdot a_{(n+1)} - b_n) - a_n) / ((n+2) \cdot (n+1)). \end{aligned}$$

Для степени $n = 0$ получаем:

$$a_2 = (k_1 \cdot (a_1 - b_0) - a_0) / 2.$$

Для степени $n = 1$ получаем:

$$a_3 = (k_1 \cdot (2 \cdot a_2 - b_1) - a_1) / 6.$$

Для степени $n = 2$ получаем:

$$a_4 = (k_1 \cdot (3 \cdot a_3 - b_2) - a_2) / 12.$$

Для степени $n = m$ получаем:

$$a_{(m+2)} = (k_1 \cdot ((m+1) \cdot a_{(m+1)} - b_m) - a_m) / ((m+2) \cdot (m+1)). \quad (34)$$

Таким образом, получены выражения для расчетных коэффициентов ряда (30), с помощью которого будет получено приближенное решение автономного нелинейного дифференциального уравнения второго порядка (26).

Приведем пример расчета. Заданы исходные данные для начального значения угла $\varphi_0 = 0$ радиан: $\gamma_0 = 0$ радиан, $\rho_0 = 50$ мм, $k_0 = 0,01$ мм⁻¹, $k_1 = 0,75$.

Получаем значения коэффициентов разложения в ряд:

$$a_0 = 0,0; \quad a_1 = 0,5; \quad a_2 = -0,1875; \quad a_3 = -0,130208; \quad a_4 = -0,000977.$$

$$b_0 = 1,0; b_1 = 0,0; b_2 = -0,1250; b_3 = 0,093750; b_4 = 0,039714.$$

Таблица 1 – Параметры вычисленной плоской кривой

№	φ , градусы	η	η'	η''	$\cos \gamma$	$K(\varphi)$, мм ⁻¹	ρ , мм
1	0	0,000000	0,500000	-0,375000	1,000000	0,010000	50,00 0
2	5	0,042119	0,464299	-0,443229	0,999113	0,010676	50,09 3
3	10	0,080862	0,422643	-0,511424	0,996725	0,011399	50,36 5
4	15	0,115711	0,375045	-0,579390	0,993283	0,012170	50,80 2
5	20	0,146148	0,321532	-0,646946	0,989263	0,012993	51,39 3
6	25	0,171658	0,262149	-0,713914	0,985157	0,013871	52,12 2
7	30	0,191732	0,196953	-0,780103	0,981447	0,014810	52,97 2
8	35	0,205866	0,126024	-0,845283	0,978580	0,015811	53,92 0
9	40	0,213564	0,049461	-0,909165	0,976929	0,016881	54,94 2
10	45	0,214339	-0,032606	-0,971363	0,976759	0,018023	56,00 5
11	50	0,207718	-0,120010	-1,031367	0,978189	0,019242	57,07 4
12	55	0,193244	-0,212530	-1,088507	0,981151	0,020543	58,10 6
13	60	0,170484	-0,309882	-1,141925	0,985361	0,021933	59,05 5
14	65	0,139030	-0,411695	-1,190563	0,990288	0,023416	59,87 2
15	70	0,098513	-0,517499	-1,233180	0,995136	0,025000	60,50 5
16	75	0,048610	-0,626712	-1,268474	0,998818	0,026691	60,90 1
17	80	-0,010948	-0,738647	-1,295449	0,999940	0,028497	61,01 0
18	85	-0,080366	-0,852574	-1,314394	0,996765	0,030424	60,78 5
19	90	-0,159791	-0,967925	-1,329273	0,987151	0,032482	60,19 0

Приведенные расчеты показали, что разработанная приближенная методика решения данного дифференциального уравнения дает достаточно высокую точность расчетов, достаточную для решения задач конструирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скойбеда А.Т., Жуковец В.Н. Колесно-шагающие движители для транспортного средства высокой проходимости // *Международный научно-технический журнал «Теоретическая и прикладная механика»*, Минск, 2013 г., вып. 28. – С. 228–233.
2. Скойбеда А.Т., Жуковец В.Н. Рациональный профиль опорных башмаков колесно-шагающего движителя // *Наука и техника. Международный научно-технический журнал*. 2013. № 6. – С. 38–42.
3. Жуковец В.Н. Профиль плоского кулачка в виде замкнутой кривой, описанной системой уравнений в параметрическом виде. // *Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. 2006. № 1. – С. 76–86.
4. Колчин Н.И. Теория механизмов и машин. Структура и кинематика механизмов. Динамика машин и трение. / Н.И. Колчин, М.С. Мовнин. – Л.: Судпромгиз, 1962. – 616 с.
5. Воднев В.Т., Наумович А.Ф., Наумович Н.Ф. Основные математические формулы: Справочник. Под ред. Богданова Ю.С. – Мн.: Выш. шк., 1995. – 380 с.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: 1973. – 832 с.