

РАЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ ОПОРНЫХ БАШМАКОВ КОЛЕСНО-ШАГАЮЩЕГО ДВИЖИТЕЛЯ

Докт. техн. наук, проф. СКОЙБЕДА А. Т., инж. ЖУКОВЕЦ В. Н.

Белорусский национальный технический университет

Разработанный в БНТУ колесно-шагающий движитель имеет преимущества в тяге и проходимости по сравнению с обычным колесом. При этом совершаются поочередно три фазы движения, характерные для ходьбы человека: выброс ноги вперед по отношению к центру тяжести, перенос на нее веса и выталкивание ноги в последней фазе. Одной из причин высокой проходимости колесно-шагающего движителя является дискретность следов. Обычное колесо прокладывает сплошную колею, тратит больше энергии на смятие грунта и не может преодолеть относительно невысокие препятствия, которые колесно-шагающий движитель способен перешагнуть [1].

Вместе с тем, проведенный в работе [2] анализ кинематики движителя показал, что круглый профиль наружной поверхности опорного башмака не обеспечивает постоянства вертикальной координаты центральной оси ступицы и аналога скорости горизонтального перемещения. Поэтому возникла потребность в нахождении такой формы наружной поверхности башмака, отличной от круглого профиля, которая смогла бы улучшить характеристики движителя. Для этого применим методику анализа плоских кривых, изложенную в [3].

Профиль наружной поверхности опорного башмака описывается двумя радиус-векторами, являющимися функциями от угла φ поворота ступицы (рис. 1). Радиус-вектор Y_1 начинается в точке B_1 соединения стойки ноги с кривошипом, направлен вдоль стойки ноги B_1K_1 в сторону наружной поверхности башмака. Не доходя до наружной поверхности, радиус-вектор Y_1 в своей конечной точке C дает начало новому

радиус-вектору Y_2 , который заканчивается в точке K_1' на наружной поверхности башмака.

Своей конечной точкой K_1' радиус-вектор Y_2 обеспечивает контакт наружной поверхности башмака с опорной поверхностью. Радиус-вектор Y_2 всегда перпендикулярен к опорной поверхности, находится на нормали к наружной поверхности башмака, образуя с осью стойки ноги B_1K_1 угол φ , равный углу поворота ступицы. Расстояние O_1B_2 между осями ступицы и кривошипа равно a , длина кривошипа B_2B_1 обозначается b , длина стойки ноги B_1K_1 равна c . Профиль наружной поверхности башмака в декартовой системе координат представим через систему из двух уравнений:

$$\begin{cases} X = Y_2 \sin \varphi; \\ Y = Y_1 + Y_2 \cos \varphi. \end{cases} \quad (1)$$

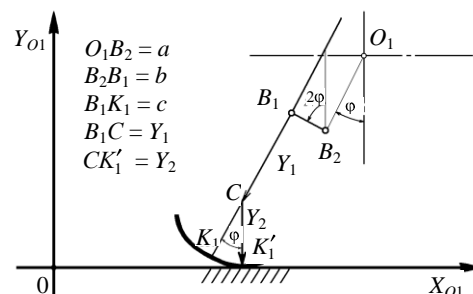


Рис. 1. Схема опорного башмака колесно-шагающего движителя

Здесь точка B_1 совпадает с началом координат: $X_{B_1} = 0$; $Y_{B_1} = 0$. Радиус-вектор Y_1 находится на оси OY и совпадает с ней по направлению (рис. 2).

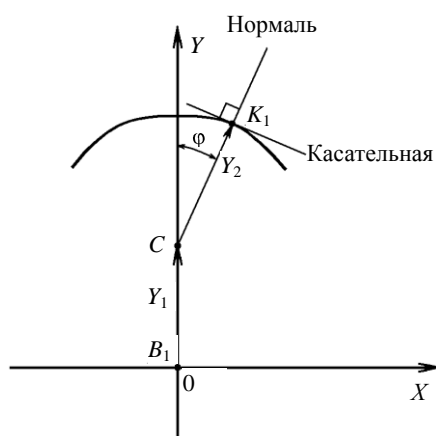


Рис. 2. Схема расчета координат профиля башмака

Согласно [3, 4], радиус-вектор Y_2 будет нормален к профилю опорного башмака при выполнении условия

$$\frac{dY_2}{d\varphi} = -\frac{dY_1}{d\varphi} \cos \varphi. \quad (2)$$

Используя [2], запишем уравнение вертикальной координаты центральной оси ступицы для различных значений угла $-\pi/4 \leq \varphi \leq \pi/4$

$$Y_{01} = (a + Y_1) \cos \varphi - b \cos 2\varphi + Y_2. \quad (3)$$

Поставим при этом условие

$$Y_{01} = a - b + c = \text{const}. \quad (4)$$

Продифференцировав (3), находим аналог скорости вертикальных колебаний

$$\frac{dY_{01}}{d\varphi} = \frac{dY_1}{d\varphi} \cos \varphi - a + Y_1 \sin \varphi + 2b \sin 2\varphi + \frac{dY_2}{d\varphi}.$$

С учетом (2), (4) получаем

$$\frac{dY_{01}}{d\varphi} = -a + Y_1 \sin \varphi + 2b \sin 2\varphi = 0. \quad (5)$$

Из выражения (5) вытекают следующие преобразования:

$$\begin{aligned} -a + Y_1 \sin \varphi + 2b \sin 2\varphi &= 0; \\ a + Y_1 \sin \varphi &= 4b \sin \varphi \cos \varphi; \\ Y_1 &= 4b \cos \varphi - a. \end{aligned} \quad (6)$$

Функцию Y_2 определим из условия (4) с учетом выражений (3), (6):

$$(a + Y_1) \cos \varphi - b \cos 2\varphi + Y_2 = a - b + c;$$

$$(a + 4b \cos \varphi - a) \cos \varphi - b \cos 2\varphi + Y_2 = a - b + c;$$

$$Y_2 = a - 2b(1 + \cos^2 \varphi) + c. \quad (7)$$

Найдем уравнение горизонтального перемещения движителя для данного профиля башмака, используя выводы [2]. Горизонтальное перемещение оси ступицы при повороте на угол φ для диапазона $0 \leq \varphi \leq \pi/4$ состоит из двух составляющих:

1) перемещение за счет поворота ноги и кривошипов, равное

$$X_I = (a + Y_1) \sin \varphi + b \sin 2\varphi; \quad (8)$$

2) перемещение за счет прокатывания башмака по поверхности, равное длине линии профиля башмака, которая определяется криволинейным интегралом

$$X_{II} = \int_0^\varphi \sqrt{X'^2 + Y'^2} d\varphi. \quad (9)$$

В выражении (9) с учетом системы (1) и зависимости (2):

$$X' = \left(Y_2 - \frac{dY_1}{d\varphi} \sin \varphi \right) \cos \varphi;$$

$$Y' = -\left(Y_2 - \frac{dY_1}{d\varphi} \sin \varphi \right) \sin \varphi.$$

Следовательно, для формулы (9) получим:

$$X'^2 + Y'^2 = \left(Y_2 - \frac{dY_1}{d\varphi} \sin \varphi \right)^2;$$

$$X_{II} = \int_0^\varphi \sqrt{X'^2 + Y'^2} d\varphi = \int_0^\varphi \left(Y_2 - \frac{dY_1}{d\varphi} \sin \varphi \right) d\varphi. \quad (10)$$

Полное горизонтальное перемещение оси ступицы с учетом (8), (10) составит

$$\begin{aligned} X_{01} &= X_I + X_{II} = (a + Y_1) \sin \varphi + \\ &+ b \sin 2\varphi + \int_0^\varphi \left(Y_2 - \frac{dY_1}{d\varphi} \sin \varphi \right) d\varphi. \end{aligned} \quad (11)$$

Выполним дифференцирование выражения (11)

$$\frac{dX_{01}}{d\varphi} = \frac{dY_1}{d\varphi} \sin \varphi + (a + Y_1) \cos \varphi + 2b \cos 2\varphi + Y_2 - \frac{dY_1}{d\varphi} \sin \varphi. \quad \frac{d^2 Y_{01}}{d\varphi^2} = 0. \quad (19)$$

Окончательно получаем выражение для аналога скорости

$$\frac{dX_{01}}{d\varphi} = (a + Y_1) \cos \varphi + 2b \cos 2\varphi + Y_2. \quad (12)$$

При исследовании горизонтального перемещения оси ступицы для диапазона $-\pi/4 \leq \varphi \leq 0$ также получается выражение (12), которое является четной функцией.

Таким образом, горизонтальное перемещение оси ступицы для текущего угла φ , начиная от момента вступления опорного башмака в контакт с опорной поверхностью при угле $\varphi = -45^\circ = -\pi/4$ рад., следует определять как

$$X_{01} = \int_{-\pi/4}^{\varphi} (a + Y_1) \cos \varphi + 2b \cos 2\varphi + Y_2 \, d\varphi. \quad (13)$$

Используя формулы (6), (7), выполним интегрирование согласно (13) и получим

$$X_{01} = a - b + c \frac{\pi}{4} + \frac{3}{2}b + a - b + c \varphi + \frac{3}{2}b \sin 2\varphi. \quad (14)$$

Тогда аналоги скорости и ускорения горизонтального перемещения будут равны:

$$\frac{dX_{01}}{d\varphi} = a - b + c + 3b \cos 2\varphi; \quad (15)$$

$$\frac{d^2 X_{01}}{d\varphi^2} = -6b \sin 2\varphi. \quad (16)$$

Вертикальное положение центральной оси ступицы

$$Y_{01} = a - b + c. \quad (17)$$

Отсюда аналоги скорости и ускорения вертикальной координаты оси ступицы:

$$\frac{dY_{01}}{d\varphi} = 0; \quad (18)$$

Согласно формуле (14), полное горизонтальное перемещение движителя за время поворота ступицы от угла $\varphi = -\pi/4$ рад. до угла $\varphi = \pi/4$ рад. будет равно

$$X_{01} = (a - b + c) \frac{\pi}{2} + 3b. \quad (20)$$

При этом перемещение движителя за счет прокатывания башмака по опорной поверхности определяется криволинейным интегралом согласно формуле (10). Используя выражения (6), (7), преобразуем (10), и для значений $-\pi/4 \leq \varphi \leq \pi/4$ получим:

$$X_{II} = \int_{-\pi/4}^{\pi/4} (a + c - b(6 \cos^2 \varphi - 2)) d\varphi = (a - b + c)\varphi - \frac{3}{2}b \sin 2\varphi \Big|_{-\pi/4}^{\pi/4} = (a - b + c) \frac{\pi}{2} - 3b.$$

Таким образом, перемещение движителя за счет прокатывания башмака

$$X_{II} = (a - b + c) \frac{\pi}{2} - 3b. \quad (21)$$

Полное горизонтальное перемещение оси ступицы, согласно (11), включает в себя две составляющие: $X_{01} = X_I + X_{II}$. Поэтому составляющая перемещения за счет поворота ноги и кривошипов с учетом выражений (20), (21) будет равна

$$X_I = X_{01} - X_{II} = \left((a - b + c) \frac{\pi}{2} + 3b \right) - \left((a - b + c) \frac{\pi}{2} - 3b \right) = 6b. \quad (22)$$

Определим длину стойки ноги c , при которой обеспечивается равенство $X_I = X_{II}$. Используя формулы (21), (22), после преобразований получим

$$c = \left(\frac{18}{\pi} + 1 \right) b - a. \quad (23)$$

При соблюдении в конструктивных размерах равенства (23) половина перемещения движителя будет осуществляться за счет поворота ноги и кривошипов, а другая половина – за счет прокатывания башмака. В отличие от обычного колеса, прокладывающего по рыхлой опорной поверхности сплошную колею, колесно-шагающий движитель образует отдельные следы, как при ходьбе человека. Таким образом, в два раза сокращаются затраты энергии на смятие грунта.

Вычислим значения кинематических характеристик колесно-шагающего движителя для величин угла поворота ступицы $-45^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ$. Воспользуемся расчетными формулами (6), (7), (14)–(19) при следующих значениях конструктивных параметров движителя: расстояние между осями вращения ступицы и кривошипа $a = 0,10$ м, длина кривошипа $b = 0,05$ м. Вычисленная по формуле (23) длина стойки башмака $c = 0,2365$ м. Значения угла поворота ступицы φ в формулу (14) подставляли в радианах, во все остальные формулы – в градусах. Результаты вычислений занесены в табл. 1.

Очевидно, что рациональный профиль башмака улучшает кинематические характеристики движителя: обеспечивает постоянство верти-

кальной координаты оси ступицы и снижает колебания аналога ускорения горизонтального перемещения [5]. Далее на основании зависимостей (1), (6), (7) следует вычислить координаты X и Y точек рационального профиля башмака. Также важно, чтобы координаты профиля были выражены через радиус-вектор ρ с началом в точке B_1 и угол его поворота α , который отсчитывается от оси OY . Эти величины можно вычислить по следующим формулам:

$$\alpha = \arctg X/Y ; \quad (24)$$

$$\rho = \sqrt{X^2 + Y^2}. \quad (25)$$

Исходя из [3], находим радиус кривизны профиля башмака

$$R(\varphi) = Y_2 - \frac{dY_1}{d\varphi} \sin \varphi. \quad (26)$$

Используя выражения (6), (7), представим формулу (26) в следующем виде:

$$R(\varphi) = a + c - b(6 \cos^2 \varphi - 2). \quad (27)$$

Результаты вычислений по формулам (1), (6), (7), (24), (25), (27) занесены в табл. 2.

Таблица 1

Кинематические характеристики движителя при опоре на башмаки рационального профиля

φ , град.	Y_1 , м	Y_2 , м	X_{01} , м	$\frac{dX_{01}}{d\varphi}$, м	$\frac{d^2X_{01}}{d\varphi^2}$, м	Y_{01} , м	$\frac{dY_{01}}{d\varphi}$, м	$\frac{d^2Y_{01}}{d\varphi^2}$, м
-45	0,0414	0,1865	0,0000	0,2865	0,3000	0,2865	0	0
-40	0,0532	0,1778	0,0261	0,3125	0,2954	0,2865	0	0
-35	0,0638	0,1694	0,0545	0,3378	0,2819	0,2865	0	0
-30	0,0732	0,1615	0,0851	0,3615	0,2598	0,2865	0	0
-25	0,0813	0,1544	0,1176	0,3829	0,2298	0,2865	0	0
-20	0,0879	0,1482	0,1518	0,4014	0,1928	0,2865	0	0
-15	0,0932	0,1432	0,1875	0,4164	0,1500	0,2865	0	0
-10	0,0970	0,1395	0,2244	0,4275	0,1026	0,2865	0	0
-5	0,0992	0,1373	0,2620	0,4342	0,0521	0,2865	0	0
0	0,1000	0,1365	0,3000	0,4365	0,0000	0,2865	0	0
5	0,0992	0,1373	0,3380	0,4342	-0,0521	0,2865	0	0
10	0,0970	0,1395	0,3757	0,4275	-0,1026	0,2865	0	0
15	0,0932	0,1432	0,4125	0,4164	-0,1500	0,2865	0	0
20	0,0879	0,1482	0,4482	0,4014	-0,1928	0,2865	0	0
25	0,0813	0,1544	0,4825	0,3829	-0,2298	0,2865	0	0
30	0,0732	0,1615	0,5150	0,3615	-0,2598	0,2865	0	0
35	0,0638	0,1694	0,5455	0,3378	-0,2819	0,2865	0	0
40	0,0532	0,1778	0,5739	0,3125	-0,2954	0,2865	0	0
45	0,0414	0,1865	0,6000	0,2865	-0,3000	0,2865	0	0

Геометрические параметры рационального профиля башмака

φ, град.	Y_1 , м	Y_2 , м	X , м	Y , м	Угол поворота α, град.	Радиус-вектор ρ, м	Радиус кривизны $R(\varphi)$, м
-45	0,0414	0,1865	-0,1319	0,1733	-37,27	0,2178	0,2865
-40	0,0532	0,1778	-0,1143	0,1894	-31,11	0,2212	0,2605
-35	0,0638	0,1694	-0,0972	0,2026	-25,62	0,2247	0,2352
-30	0,0732	0,1615	-0,0808	0,2131	-20,76	0,2279	0,2115
-25	0,0813	0,1544	-0,0652	0,2212	-16,43	0,2306	0,1901
-20	0,0879	0,1482	-0,0507	0,2272	-12,58	0,2328	0,1716
-15	0,0932	0,1432	-0,0371	0,2315	-9,10	0,2345	0,1566
-10	0,0970	0,1395	-0,0242	0,2344	-5,90	0,2356	0,1455
-5	0,0992	0,1373	-0,0120	0,2360	-2,90	0,2363	0,1388
0	0,1000	0,1365	0,0000	0,2365	0,00	0,2365	0,1365
5	0,0992	0,1373	0,0120	0,2360	2,90	0,2363	0,1388
10	0,0970	0,1395	0,0242	0,2344	5,90	0,2356	0,1455
15	0,0932	0,1432	0,0371	0,2315	9,10	0,2345	0,1566
20	0,0879	0,1482	0,0507	0,2272	12,58	0,2328	0,1716
25	0,0813	0,1544	0,0652	0,2212	16,43	0,2306	0,1901
30	0,0732	0,1615	0,0808	0,2131	20,76	0,2279	0,2115
35	0,0638	0,1694	0,0972	0,2026	25,62	0,2247	0,2352
40	0,0532	0,1778	0,1143	0,1894	31,11	0,2212	0,2605
45	0,0414	0,1865	0,1319	0,1733	37,27	0,2178	0,2865

ВЫВОД

В результате проведенных теоретических исследований была определена рациональная геометрическая форма опорных башмаков, позволяющая значительно улучшить кинематику колесно-шагающего движителя. Новизна методики расчета профиля башмаков заключается в способе задания плоских кривых двумя переменными радиус-векторами [3]. Этот способ позволяет упростить расчеты геометрических параметров плоских кривых, определить уравнение линии в полярных координатах по заданному закону ее кривизны [4]. Полученный рациональный профиль опорных башмаков является наименее габаритным среди всех ранее рассмотренных вариантов [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Беккер, М. Г. Введение в теорию систем «местность – машина» / М. Г. Беккер. – М.: Машиностроение, 1973. – 520 с.
2. Скойбеда, А. Т. Кинематика колесно-шагающего движителя при опоре на башмаки круглого профиля / А. Т. Скойбеда, В. Н. Жуковец, О. А. Сонич // Современные методы проектирования машин: республик. межведом. сб. науч. трудов. – Вып. 2: в 7 т. – Т. 3: Проектирование приводов машин / под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск, 2004. – С. 102–106.
3. Жуковец, В. Н. Профиль плоского кулачка в виде замкнутой кривой, описанной системой уравнений в параметрическом виде / В. Н. Жуковец // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2006. – № 1. – С. 76–86.
4. Скойбеда, А. Т. Колесно-шагающие движители для транспортного средства высокой проходимости / А. Т. Скойбеда, В. Н. Жуковец // Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб. – 2013. – Вып. 28. – С. 228–233.
5. Скойбеда, А. Т. Выбор формы опорных башмаков и их влияние на кинематику колесно-шагающего движителя / А. Т. Скойбеда, В. Н. Жуковец // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. трудов. – 2012. – Вып. 1. – С. 212–215.

Поступила 07.05.2013