

Рис. 5 – Начальные линии зубчатой передачи при положении $\theta = 0^\circ$

Таким образом, используя начальные линии, в дальнейшем следует приступать к профилированию зубчатых венцов. Применение данной конструкции зубчатого зацепления в приводе движителя позволит значительно повысить равномерность движения, снизить динамические нагрузки на транспортное средство, сохраняя при этом все преимущества по тяговому усилию. Ожидаемым недостатком конструкции будет неравномерность распределения нагрузки на различные зубья. Поэтому в дальнейшем следует разработать комплекс мероприятий по упрочнению зубчатых венцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скойбеда А.Т., Жуковец В.Н., Сонич О.А. Кинематика колесно-шагающего движителя при опоре на башмаки круглого профиля./Современные методы проектирования машин: Республиканский межведомственный сборник научных трудов. Вып.2. В 7 томах. – Т. 3. Проектирование приводов машин / Под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск, 2004. – с. 102–106.
2. 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.
3. Скойбеда А.Т., Комяк И.М., Жуковец В.Н. Колесно-шагающий движитель и его динамические преимущества по сравнению с колесом / Механика-2011: сб. науч. тр. V Белорусского конгресса по теорет. и прикладной механике, Минск, 26 – 28 окт. 2011 г.: в 2 т. – Минск, 2011. – Том 1. – Стр. 138-144.
4. Воднев В.Т., Наумович А.Ф., Наумович Н.Ф. Основные математические формулы: Справочник. Под ред. Богданова Ю.С. – Мн.: Выш. шк. 1995. – 380 с.

УДК 621.85.052

Скойбеда А.Т., Комяк И.М., Жуковец В.Н.

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИЖЕНИЯ КОЛЕСНО-ШАГАЮЩЕГО ДВИЖИТЕЛЯ ПРИ СМЕНЕ ОПОРНЫХ БАШМАКОВ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Представлен метод улучшения характеристик движения колесно-шагающего движителя при помощи резиновых гусениц.

Созданный в БНТУ образец колесно-шагающего движителя имеет преимущества в тяге и проходимости по сравнению с обычным колесом. Вместе с тем, проведенный в работе [1] анализ кинематики колесно-шагающего движителя показал, что круглый профиль опорного башмака имеет ряд недостатков. Поэтому возникла потребность в нахождении такой формы наружной поверхности башмака, отличной от круглого профиля, которая смогла бы улучшить кинематику и динамику движения.

Воспользуемся приведенной в работах [2, 3] методикой.

На основании значений Y_1 , Y_2 можно вычислить координаты X и Y точек профиля башмака (рис. 1). Координаты профиля можно выразить через радиус-вектор ρ и угол его поворота α , который отсчитывается от оси симметрии башмака:

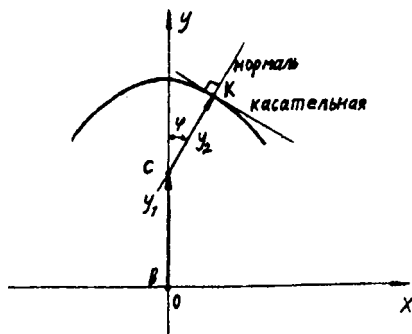


Рис. 1 – Схема расчета профиля башмака

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

$$\alpha = \arctg(X/Y); \quad (2)$$

$$\rho = \sqrt{X^2 + Y^2}. \quad (3)$$

Функции $Y_1(\varphi)$ и $Y_2(\varphi)$ связаны между собой зависимостью [2]:

$$\frac{dY_2}{d\varphi} = -\frac{dY_1}{d\varphi} \cdot \cos \varphi. \quad (4)$$

Применив методику анализа плоских кривых, изложенную в работах [2, 3], получили зависимости:

$$Y_1 = 4 \cdot b \cdot \cos \varphi - a; \quad (5)$$

$$Y_2 = a - 2 \cdot b \cdot (1 + \cos^2 \varphi) + c; \quad (6)$$

Используя их, получаем формулы кинематических характеристик [1].

Горизонтальное перемещение оси ступицы, начиная от момента вступления опорного башмака в контакт с поверхностью при угле $\varphi = -45^\circ = -\pi/4$ радиан:

$$X_{01} = (a - b + c) \cdot \frac{\pi}{4} + \frac{3}{2} \cdot b + (a - b + c) \cdot \varphi + \frac{3}{2} \cdot b \cdot \sin 2\varphi. \quad (7)$$

Аналог скорости по горизонтали:

$$\frac{dX_{01}}{d\varphi} = a - b + c + 3 \cdot b \cdot \cos 2\varphi. \quad (8)$$

Аналог ускорения по горизонтали:

$$\frac{d^2 X_{01}}{d\varphi^2} = -6 \cdot b \cdot \sin 2\varphi. \quad (9)$$

Вертикальное перемещение оси ступицы составит:

$$Y_{01} = a - b + c = \text{const}. \quad (10)$$

Аналог скорости по вертикали:

$$\frac{dY_{01}}{d\varphi} = 0. \quad (11)$$

Аналог ускорения по вертикали:

$$\frac{d^2 Y_{01}}{d\varphi^2} = 0. \quad (12)$$

Таким образом, рациональный профиль опорного башмака, заданный формулами (5-6), в целом значительно улучшает кинематические характеристики колесно-шагающего движителя: устраняются вертикальные колебания оси ступицы, уменьшаются колебания аналога скорости перемещения движителя. Следует отметить, что к серьезным недостаткам колесно-шагающего движителя относятся значительные скачки значений моментов сопротивления вращению кривошипов при смене опорных башмаков. Применение рационального профиля опорного башмака вместо круглого позволяет снизить указанные скачки значений моментов сопротивления. Это приводит к снижению ударных нагрузок на кривошипы движителя, что улучшает динамические характеристики его работы. Ниже приведены значения момента сопротивления вращению одного кривошипа за полный оборот ступицы для двух вариантов опорных башмаков.

Таблица 1 – Изменение момента сопротивления вращению кривошипа $M_{С.В}$ за полный оборот ступицы

Угол поворота ступицы, градусы	Величина $M_{С.В}$ при круглых башмаках, Н·м	Величина $M_{С.В}$ при рациональных башмаках, Н·м	Угол поворота ступицы, градусы	Величина $M_{С.В}$ при круглых башмаках, Н·м	Величина $M_{С.В}$ при рациональных башмаках, Н·м
1.	2.	3.	4.	5.	6.
-45,0	-61,64	-55,45	135,0	34,14	27,95
-40,0	-49,90	-46,46	140,0	25,42	21,98
-35,0	-36,28	-34,92	145,0	15,57	14,21
-30,0	-21,73	-21,73	150,0	5,41	5,41
-25,0	-7,20	-7,93	155,0	-4,22	-3,50
-20,0	6,43	5,47	160,0	-12,62	-11,66
-15,0	18,46	17,59	165,0	-19,22	-18,35
-10,0	28,37	27,79	170,0	-23,69	-23,10
-5,0	35,89	35,70	175,0	-25,89	-25,71
0,0	40,95	41,23	180,0	-25,95	-26,23
5,0	43,72	44,50	185,0	-24,17	-24,95
10,0	44,51	45,79	190,0	-21,01	-22,28
15,0	43,75	45,40	195,0	-17,01	-18,66
20,0	41,91	43,65	200,0	-12,74	-14,48
25,0	39,45	40,72	205,0	-8,74	-10,01
30,0	36,73	36,73	210,0	-5,41	-5,41
35,0	34,02	31,70	215,0	-3,05	-0,72
40,0	31,44	25,62	220,0	-1,75	4,06
45,0	28,98	18,56	225,0	-1,48	8,94
45,0	-5,63	-5,63	225,0	-4,38	-4,38
50,0	-5,33	-5,33	230,0	-4,52	-4,52
55,0	-4,88	-4,88	235,0	-4,51	-4,51
60,0	-4,33	-4,33	240,0	-4,33	-4,33
65,0	-3,69	-3,69	245,0	-3,97	-3,97
70,0	-3,00	-3,00	250,0	-3,43	-3,43
75,0	-2,27	-2,27	255,0	-2,73	-2,73
80,0	-1,52	-1,52	260,0	-1,90	-1,90
85,0	-0,76	-0,76	265,0	-0,97	-0,97
90,0	0,00	0,00	270,0	0,00	0,00
95,0	0,76	0,76	275,0	0,97	0,97
100,0	1,52	1,52	280,0	1,90	1,90
105,0	2,27	2,27	285,0	2,73	2,73
110,0	3,00	3,00	290,0	3,43	3,43
115,0	3,69	3,69	295,0	3,97	3,97
120,0	4,33	4,33	300,0	4,33	4,33

Окончание таблицы 1					
1.	2.	3.	4.	5.	6.
125,0	4,88	4,88	305,0	4,51	4,51
130,0	5,33	5,33	310,0	4,52	4,52
135,0	5,63	5,63	315,0	4,38	4,38

Когда момент сопротивления препятствует вращению кривошипа в заданном направлении, он принимает в таблице 1 положительные значения.

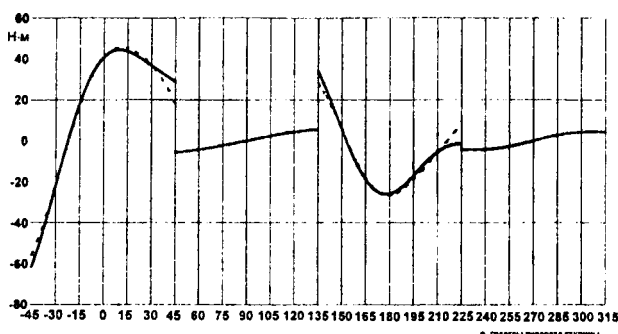


Рис. 2 – Момент сопротивления вращению кривошипа

- Момент сопротивления $M_{C,B}$ при опоре движителя на круглые башмаки;
- Момент сопротивления $M_{C,B}$ при опоре движителя на рациональные башмаки.

Одним из способов улучшения характеристик движения является применение резиногусеничных гусениц, которые должны обгибать сплошной лентой вокруг всех четырех башмаков каждый колесношагающий движитель транспортного средства. Резиногусеничные гусеницы являются сплошными резиновыми лентами в форме кольца, усиленные основой из корда или троса. Гусеницы можно изготавливать в виде ленты, которую затем соединяют в кольцо, либо сразу формировать в виде монолитного кольца. Чтобы вычислить длину одной гусеницы, определим величину промежутка между ближайшими друг к другу крайними точками соседних башмаков. Начало координат поместим на оси ступицы движителя. Башмак, который раньше вступает в контакт с опорной поверхностью, обозначается индексом 1, следующий за ним – индексом 2.

Итак, для башмаков рационального некруглого профиля получаем:

$$X_1 = -2\sqrt{2} \cdot b \cdot \sin \varphi - b \cdot \sin 2\varphi - (a - 3 \cdot b + c) \cdot \sin(\varphi - 45^\circ);$$

$$Y_1 = -2\sqrt{2} \cdot b \cdot \cos \varphi + b \cdot \cos 2\varphi - (a - 3 \cdot b + c) \cdot \cos(\varphi - 45^\circ);$$

$$X_2 = -2\sqrt{2} \cdot b \cdot \sin(\varphi - 90^\circ) - b \cdot \sin(2\varphi - 180^\circ) - (a - 3 \cdot b + c) \cdot \sin((\varphi - 90^\circ) + 45^\circ);$$

$$Y_2 = -2\sqrt{2} \cdot b \cdot \cos(\varphi - 90^\circ) + b \cdot \cos(2\varphi - 180^\circ) - (a - 3 \cdot b + c) \cdot \cos((\varphi - 90^\circ) + 45^\circ).$$

После тригонометрических преобразований получим:

$$X_2 = 2\sqrt{2} \cdot b \cdot \cos \varphi + b \cdot \sin 2\varphi - (a - 3 \cdot b + c) \cdot \sin(\varphi - 45^\circ);$$

$$Y_2 = -2\sqrt{2} \cdot b \cdot \sin \varphi - b \cdot \cos 2\varphi - (a - 3 \cdot b + c) \cdot \cos(\varphi - 45^\circ).$$

Следовательно:

$$\Delta X = X_2 - X_1 = 2\sqrt{2} \cdot b \cdot (\cos \varphi + \sin \varphi) + 2 \cdot b \cdot \sin 2\varphi;$$

$$\Delta Y = Y_2 - Y_1 = 2\sqrt{2} \cdot b \cdot (\cos \varphi - \sin \varphi) - 2 \cdot b \cdot \cos 2\varphi;$$

$$\Delta L = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} = b \cdot \sqrt{20 + 8\sqrt{2} \cdot (\sin 3\varphi - \cos 3\varphi)}.$$

Каждый башмак опережает предыдущий на угол поворота ступицы в 90° , поэтому формулы для вычисления всех четырех промежутков между башмаками имеют вид:

$$\Delta L_1 = b \cdot \sqrt{20 + 8\sqrt{2} \cdot (\sin 3\varphi - \cos 3\varphi)}; \quad (13)$$

$$\Delta L_2 = b \cdot \sqrt{20 + 8\sqrt{2} \cdot (\sin 3(\varphi + 90^\circ) - \cos 3(\varphi + 90^\circ))}; \quad (14)$$

$$\Delta L_3 = b \cdot \sqrt{20 + 8\sqrt{2} \cdot (\sin 3(\varphi + 180^\circ) - \cos 3(\varphi + 180^\circ))}; \quad (15)$$

$$\Delta L_4 = b \cdot \sqrt{20 + 8\sqrt{2} \cdot (\sin 3(\varphi + 270^\circ) - \cos 3(\varphi + 270^\circ))}. \quad (16)$$

Длина опорного профиля башмака определяется криволинейным интегралом [4]:

$$L_{OP} = \int_{-\pi/4}^{\pi/4} \sqrt{X'^2 + Y'^2} \cdot d\varphi; \quad (17)$$

где в данном выражении, согласно (1):

$$X' = \frac{dX}{d\varphi} = \frac{dY_2}{d\varphi} \cdot \sin \varphi + Y_2 \cdot \cos \varphi; \quad Y' = \frac{dY_1}{d\varphi} = \frac{dY_2}{d\varphi} \cdot \cos \varphi - Y_2 \cdot \sin \varphi.$$

Используя выражение (4), после преобразований получим:

$$\sqrt{X'^2 + Y'^2} = Y_2 - \frac{dY_1}{d\varphi} \cdot \sin \varphi.$$

Таким образом:

$$L_{OP} = \int_{-\pi/4}^{\pi/4} \sqrt{X'^2 + Y'^2} \cdot d\varphi = \int_{-\pi/4}^{\pi/4} \left(Y_2 - \frac{dY_1}{d\varphi} \cdot \sin \varphi \right) \cdot d\varphi. \quad (18)$$

С учетом формул (5-6) получаем:

$$Y_2 - \frac{dY_1}{d\varphi} \cdot \sin \varphi = a + c - b - 3 \cdot b \cdot \cos 2\varphi. \quad (19)$$

После подстановки находим определенный интеграл:

$$L_{OP} = \int_{-\pi/4}^{\pi/4} (a + c - b - 3 \cdot b \cdot \cos 2\varphi) \cdot d\varphi = (a + c - b) \cdot \frac{\pi}{2} - 3 \cdot b.$$

Выполним расчеты при значениях расстояния между осями ступицы и кривошипа $a = 100$ мм, длины кривошипа $b = 50$ мм, длины стойки башмака $c = 322$ мм. Итак, длина опорного профиля башмака:

$$L_{OP} = (a + c - b) \cdot \frac{\pi}{2} - 3 \cdot b = 434,34 \text{ мм}. \quad (20)$$

Периметр огибающего контура движителя:

$$L_{\Sigma} = \Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3 + \Delta L_4 + 4 \cdot L_{OP}. \quad (21)$$

Выполним расчеты периметра огибающего контура в зависимости от угла поворота ступицы по формулам (13-16, 20-21) и сведем результаты в таблицу 2.

Таблица 2 – Геометрические характеристики огибающего контура движителя

φ, градусы	ΔL_1 , мм	ΔL_2 , м	ΔL_3 , м	ΔL_4 , мм	Периметр L_{Σ} , мм
1.	2.	3.	4.	5.	6.
-45	223,61	300,00	223,61	100,00	2584,56
-40	199,12	297,72	245,67	106,60	2586,45
-35	173,21	290,93	264,58	123,93	2589,99

Окончание таблицы 2					
1.	2.	3.	4.	5.	6.
-30	147,36	279,79	279,79	147,36	2591,66
-25	123,93	264,58	290,93	173,21	2589,99
-20	106,60	245,67	297,72	199,12	2586,45
-15	100,00	223,61	300,00	223,61	2584,56
-10	106,60	199,12	297,72	245,67	2586,45
-5	123,93	173,21	290,93	264,58	2589,99
0	147,36	147,36	279,79	279,79	2591,66
5	173,21	123,93	264,58	290,93	2589,99
10	199,12	106,60	245,67	297,72	2586,45
15	223,61	100,00	223,61	300,00	2584,56
20	245,67	106,60	199,12	297,72	2586,45
25	264,58	123,93	173,21	290,93	2589,99
30	279,79	147,36	147,36	279,79	2591,66
35	290,93	173,21	123,93	264,58	2589,99
40	297,72	199,12	106,60	245,67	2586,45
45	300,00	223,61	100,00	223,61	2584,56

По расчетам, величина периметра огибающего контура, что в первом приближении задает длину гусеницы, лежит в пределах $2584,56 \text{ мм} \leq L_{\Sigma} \leq 2591,66 \text{ мм}$. Величины промежутков между башмаками лежат в пределах $100 \text{ мм} \leq \Delta L_i \leq 300 \text{ мм}$. Такие большие колебания значений промежутков снижают долговечность гусениц, так как они будут подвергаться дополнительным напряжениям от процессов растяжения, сжатия и изгиба. С другой стороны, применение резиновых гусениц повысит проходимость движителя по грунту с низкой несущей способностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скойбеда А.Т., Жуковец В.Н., Сонич О.А. Кинематика колесно-шагающего движителя при опоре на башмаки круглого профиля./Современные методы проектирования машин: Республиканский межведомственный сборник научных трудов. Вып.2. В 7 томах. – Т. 3. Проектирование приводов машин / Под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск, 2004. – с. 102–106. 2. 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. 3. Скойбеда А.Т., Комяк И.М., Жуковец В.Н. Колесно-шагающий движитель и его динамические преимущества по сравнению с колесом / Механика-2011: сб. науч. тр. V Белорусского конгресса по теорет. и прикладной механике, Минск, 26 – 28 окт. 2011 г.: в 2 т. – Минск, 2011. – Том 1. – Стр. 138-144. 4. Воднев В.Т., Наумович А.Ф., Наумович Н.Ф. Основные математические формулы: Справочник. Под ред. Богданова Ю.С. – Мн.: Выш. шк. 1995. – 380 с.