УДК 621.85.052

А.Т. СКОЙБЕДА, д-р техн. наук; В.Н. ЖУКОВЕЦ; А.А. КАЛИНА, канд. техн. наук;
И.М. КОМЯК; В.С. ДАВЫДОВ
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕСНО-ШАГАЮЩЕГО ДВИЖИТЕЛЯ ДЛЯ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ТРАКТОРОВ

Проведено обоснование основных конструктивных параметров колесно-шагающего движителя для лесохозяйственных тракторов. На основании этих значений в дальнейшем следует вести детальную разработку конструкции движителя, проводить исследования кинематики и динамики, осуществлять расчеты на прочность.

Ключевые слова: *колесно-шагающий движитель, лесохозяйственный трактор, опорный башмак*

Одной из проблем, которой уделяется существенное внимание при проектировании мобильных шагающих аппаратов, является уменьшение необходимой мощности силовых установок и сокращение затрат энергии. Иначе говоря, необходимо повысить КПД многоногих механизмов, что выражается в уменьшении потребляемой мощности и повышении полезной развиваемой мощности [1, 2].

Для техники лесного хозяйства очень важна ее способность к преодолению препятствий при работе в условиях леса [2, 3]. При применении колесно-шагающего движителя наиболее целесообразно использование опорных башмаков круглого профиля, так как в этом случае обеспечивается более широкий шаг, больший просвет между корпусом движителя и опорной поверхностью (рисунок 1), чем при применении некруглого профиля [4].

Необходимо выбрать наиболее рациональные соотношения между основными размерами движителя при использовании опорных башмаков круглого профиля. Целью является минимизация колебаний вертикальной координаты центральной оси ступицы. Для этого применим ряд методов.

Применим первый вариант критерия. Задаемся выражением для вертикальной координаты центральной оси ступицы:

$$Y_{01} = (a+Y_1)\cdot\cos\varphi - b\cdot\cos 2\varphi + Y_2;$$
$$Y_{01_{\varphi=0}} = a - b + c; \quad Y_1 + Y_2 = c.$$

Тогда

$$Y_{01} = (a+Y_1)\cdot\cos\varphi - b\cdot\cos 2\varphi + c - Y_1;$$
$$\Delta Y_{01} = (a-b+c) - \big((a+Y_1)\cdot\cos\varphi - b\cdot\cos 2\varphi + c - Y_1\big) = \tag{1}$$
$$= (a+Y_1)\cdot(1-\cos\varphi) - b\cdot(1-\cos 2\varphi).$$

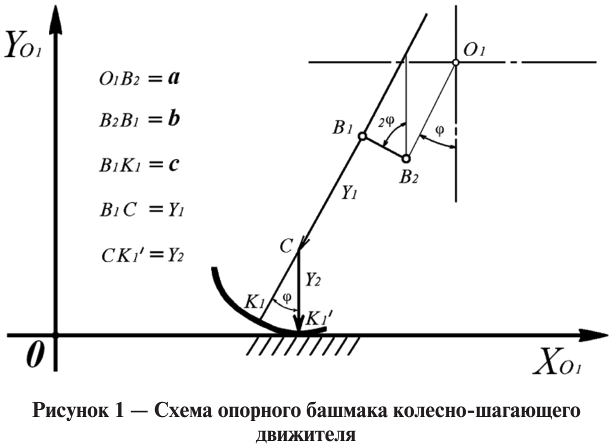

Рисунок 1 — Схема опорного башмака колесно-шагающего движителя

Функция $\Delta Y_{01}(\varphi)$ является четной, поэтому критерий можно записать в виде интеграла от квадратичной функции [5]:

$$F = \int_0^{\pi/4} \Delta Y_{01}^2 \cdot d\varphi \to \min, \tag{2}$$

где a, b, c, Y_1, Y_2 — постоянные величины относительно угла φ.

$$\Delta Y_{01}^2 = (a+Y_1)^2\cdot(1-\cos\varphi)^2 - 2\cdot(a+Y_1)\times$$
$$\times(1-\cos\varphi)\cdot b\cdot(1-\cos 2\varphi) + b^2\cdot(1-\cos 2\varphi)^2 =$$
$$= (a^2 + 2\cdot a\cdot Y_1 + Y_1^2)\cdot(1 - 2\cdot\cos\varphi + \cos^2\varphi) -$$
$$-2\cdot b\cdot(a+Y_1)\cdot(1-\cos 2\varphi - \cos\varphi + \cos\varphi\cdot\cos 2\varphi) +$$
$$+b^2\cdot(1 - 2\cdot\cos 2\varphi + \cos^2 2\varphi) = (a^2 + 2\cdot a\cdot Y_1 + Y_1^2)\times$$
$$\times(1 - 2\cdot\cos\varphi + \cos^2\varphi) - 2\cdot b\cdot(a+Y_1)\cdot(1-\cos 2\varphi -$$
$$-2\cdot\cos\varphi + 2\cdot\cos^3\varphi) + b^2\cdot(1 - 2\cdot\cos 2\varphi + \cos^2 2\varphi).$$

Интегральный критерий определяется согласно (1), (2) как

$$F = \int_0^{\pi/4} \Delta Y_{01}^2\cdot d\varphi = (a^2 + 2\cdot a\cdot Y_1 + Y_1^2)\times$$
$$\times\int_0^{\pi/4}(1 - 2\cdot\cos\varphi + \cos^2\varphi)\cdot d\varphi - 2\cdot b\cdot(a+Y_1)\times$$
$$\times\int_0^{\pi/4}(1 - \cos 2\varphi - 2\cdot\cos\varphi + 2\cdot\cos^3\varphi)\cdot d\varphi +$$
$$+b^2\cdot\int_0^{\pi/4}(1 - 2\cdot\cos 2\varphi + \cos^2 2\varphi)\cdot d\varphi =$$
$$= (a^2 + 2\cdot a\cdot Y_1 + Y_1^2)\cdot\left(\tfrac{3}{2}\cdot\varphi - 2\cdot\sin\varphi + \tfrac{1}{4}\cdot\sin 2\varphi\right)\Big|_0^{\pi/4} -$$
$$-2\cdot b\cdot(a+Y_1)\cdot\left(\varphi - \frac{1}{2}\cdot\sin 2\varphi - \frac{2}{3}\cdot\sin^3\varphi\right)\Big|_0^{\pi/4} +$$
$$+b^2\cdot\left(\frac{3}{2}\cdot\varphi - \sin 2\varphi + \frac{1}{8}\cdot\sin 4\varphi\right)\Big|_0^{\pi/4} =$$
$$= (a^2 + 2\cdot a\cdot Y_1 + Y_1^2)\cdot\left(\frac{3\cdot\pi}{8} - \sqrt{2} + \frac{1}{4}\right) -$$
$$-2\cdot b\cdot(a+Y_1)\cdot\left(\frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} - \frac{\sqrt{2}}{6}\right) + b^2\cdot\left(\frac{3\cdot\pi}{8} - 1\right).$$

Таким образом, получено выражение:

$$F = (a^2 + 2\cdot a\cdot Y_1 + Y_1^2)\cdot\left(\frac{3\cdot\pi}{8} - \sqrt{2} + \frac{1}{4}\right) -$$
$$-2\cdot b\cdot(a+Y_1)\cdot\left(\frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} - \frac{\sqrt{2}}{6}\right) + b^2\cdot\left(\frac{3\cdot\pi}{8} - 1\right).$$

Найдем частную производную и приравняем ее к нулю [5]:

$$\frac{\partial F}{\partial Y_1}=(2\cdot a+2\cdot Y_1)\cdot\left(\frac{3\cdot\pi}{8}-\sqrt{2}+\frac{1}{4}\right)-$$
$$-2\cdot b\cdot\left(\frac{\pi}{4}-\frac{1}{2}-\frac{\sqrt{2}}{6}\right)=0.$$

Далее получим:

$$(a+Y_1)\cdot\left(\frac{3\cdot\pi}{4}-2\cdot\sqrt{2}+\frac{1}{2}\right)=b\cdot\left(\frac{\pi}{2}-1-\frac{\sqrt{2}}{3}\right);$$
$$Y_1=b\cdot\left(\frac{6\cdot\pi-12-4\cdot\sqrt{2}}{9\cdot\pi-24\cdot\sqrt{2}+6}\right)-a. \quad (3)$$

Применим второй вариант критерия на основании выражения для вертикальной координаты центральной оси ступицы.

$$\Delta Y_{01}=(a-b+c)-((a+Y_1)\cdot\cos\varphi-b\cdot\cos 2\varphi+$$
$$+c-Y_1)=(a+Y_1)\cdot(1-\cos\varphi)-b\cdot(1-\cos 2\varphi).$$

Функция $\Delta Y_{01}(\varphi)$ является четной, поэтому интегральный критерий можно записать в виде:

$$F=\int_0^{\pi/4}\Delta Y_{01}\cdot d\varphi\to\min, \quad (4)$$

где a, b, c, Y_1, Y_2 — постоянные величины относительно угла φ.

Согласно (4) получаем

$$F=(a+Y_1)\cdot\int_0^{\pi/4}(1-\cos\varphi)\cdot d\varphi-b\cdot\int_0^{\pi/4}(1-\cos 2\varphi)\cdot d\varphi=$$
$$=(a+Y_1)\cdot(\varphi-\sin\varphi)\Big|_0^{\pi/4}-b\cdot\left(\varphi-\frac{1}{2}\cdot\sin 2\varphi\right)\Big|_0^{\pi/4}=$$
$$=(a+Y_1)\cdot\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\sqrt{2}}{2}\right)-b\cdot\left(\frac{\pi}{4}-\frac{1}{2}\right).$$

Приравняем полученное выражение к нулю:

$$F=(a+Y_1)\cdot\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\sqrt{2}}{2}\right)-b\cdot\left(\frac{\pi}{4}-\frac{1}{2}\right)=0.$$

Отсюда получим:

$$Y_1=b\cdot\left(\frac{\pi-2}{\pi-2\cdot\sqrt{2}}\right)-a. \quad (5)$$

Применим третий вариант критерия, который должен минимизировать интегральное значение квадратичной функции от аналога ускорения вертикальной координаты центральной оси ступицы.

$$F=\int_0^{\pi/4}I\cdot d\varphi\to\min. \quad (6)$$

$$\frac{dY_{01}}{d\varphi}=-(a+Y_1)\cdot\sin\varphi+2\cdot b\cdot\sin 2\varphi;$$
$$\frac{d^2Y_{01}}{d\varphi^2}=-(a+Y_1)\cdot\cos\varphi+4\cdot b\cdot\cos 2\varphi;$$

$$I=\left(\frac{d^2Y_{01}}{d\varphi^2}\right)^2=16\cdot b^2\cdot\cos^2 2\varphi-8\cdot b\cdot(a+Y_1)\times$$
$$\times\cos\varphi\cdot\cos 2\varphi+(a^2+2\cdot a\cdot Y_1+Y_1^2)\cdot\cos^2\varphi. \quad (7)$$

Проинтегрируем [5] выражение, полученное согласно (6), (7):

$$F=16\cdot b^2\cdot\int_0^{\pi/4}\cos^2 2\varphi\cdot d\varphi-8\cdot b\cdot(a+Y_1)\times$$
$$\times\int_0^{\pi/4}\cos\varphi\cdot\cos 2\varphi\cdot d\varphi+(a^2+2\cdot a\cdot Y_1+Y_1^2)\times$$
$$\times\int_0^{\pi/4}\cos^2\varphi\cdot d\varphi=16\cdot b^2\cdot\left(\frac{\varphi}{2}+\frac{\sin 4\varphi}{8}\right)\Bigg|_0^{\pi/4}-$$
$$-8\cdot b\cdot(a+Y_1)\cdot\left(-\frac{2}{3}\cdot\sin^3\varphi+2\cdot\sin\varphi-\sin\varphi\right)\Bigg|_0^{\pi/4}+$$
$$+(a^2+2\cdot a\cdot Y_1+Y_1^2)\cdot\left(\frac{\varphi}{2}+\frac{\sin 2\varphi}{4}\right)\Bigg|_0^{\pi/4}=$$
$$=16\cdot b^2\cdot\left(\frac{\pi}{8}+\frac{0}{8}\right)-8\cdot b\cdot(a+Y_1)\cdot\left(-\frac{2}{3}\cdot\frac{2\sqrt{2}}{8}+\frac{\sqrt{2}}{2}\right)+$$
$$+(a^2+2\cdot a\cdot Y_1+Y_1^2)\cdot\left(\frac{\pi}{8}+\frac{1}{4}\right)=2\cdot b^2\cdot\pi-$$
$$-\frac{8\sqrt{2}}{3}\cdot b\cdot(a+Y_1)+(a^2+2\cdot a\cdot Y_1+Y_1^2)\cdot\left(\frac{\pi+2}{8}\right).$$

Найдем частную производную и приравняем ее к нулю [5]:

$$\frac{\partial F}{\partial Y_1}=-\frac{8\sqrt{2}}{3}\cdot b+(2\cdot a+2\cdot Y_1)\cdot\left(\frac{\pi+2}{8}\right)=0.$$

Далее получим:

$$(a+Y_1)\cdot\left(\frac{\pi+2}{4}\right)=\frac{8\sqrt{2}}{3}\cdot b;$$
$$Y_1=b\cdot\left(\frac{32\cdot\sqrt{2}}{3\cdot\pi+6}\right)-a. \quad (8)$$

Для минимизации колебаний вертикальной координаты оси ступицы применим четвертый метод. В нем находится локальный экстремум для двух значений угла поворота ступицы.

$$Y_{01}=(a+Y_1)\cdot\cos\varphi-b\cdot\cos 2\varphi+Y_2;$$
$$Y_{01_{\varphi=0}}=a+Y_1-b+Y_2;\ \ Y_{01_{\varphi=\pi/4}}=(a+Y_1)\cdot\frac{\sqrt{2}}{2}+Y_2;$$
$$Y_{01_{\varphi=\varphi_{\max}}}=(a+Y_1)\cdot\cos\varphi_{\max}-b\cdot\cos 2\varphi_{\max}+Y_2.$$

Тогда запишем равенство

$$((a+Y_1)\cdot\cos\varphi_{\max}-b\cdot\cos 2\varphi_{\max}+Y_2)-$$
$$-(a+Y_1-b+Y_2)=(a+Y_1-b+Y_2)-$$
$$-((a+Y_1)\cdot\frac{\sqrt{2}}{2}+Y_2). \quad (9)$$

Для определения значения $\varphi_{\max}$, исходя из выражения (9), зададимся следующим условием:

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

Отсюда:

$$(a+Y_1)\cdot\sin\varphi_{\max}=4\cdot b\cdot\sin\varphi_{\max}\cdot\cos\varphi_{\max}.$$

Данное уравнение имеет два решения:

$$\sin\varphi_{\max}=0; \quad (10)$$

$$\cos\varphi_{\max} = \frac{a+Y_1}{4\cdot b}. \quad (11)$$

Поскольку первое решение (10) является тривиальным, практический смысл имеет лишь второе решение (11):

$$\cos\varphi_{\max} = \frac{a+Y_1}{4\cdot b}.$$

Преобразуем выражение (9):

$$(a+Y_1)\cdot(2-\frac{\sqrt{2}}{2}-\cos\varphi_{\max})-b\cdot(2-\cos 2\varphi_{\max})=0. \quad (12)$$

Используя равенство (11), получим:

$$a+Y_1 = 4\cdot b\cdot\cos\varphi_{\max}. \quad (13)$$

Подставив (13) в (12), получим:

$$4\cdot b\cdot\cos\varphi_{\max}\cdot(2-\frac{\sqrt{2}}{2}-\cos\varphi_{\max})-b\cdot(2-\cos 2\varphi_{\max})=0.$$

Выполнив преобразования, получим уравнение:

$$2\cdot\cos^2\varphi_{\max}-\left(8-2\sqrt{2}\right)\cdot\cos\varphi_{\max}+3=0. \quad (14)$$

Введем обозначение переменной $\cos\varphi_{\max} = x$.

В итоге из выражения (14) получаем уравнение [5]:

$$2\cdot\cos^2\varphi_{\max}-\left(8-2\sqrt{2}\right)\cdot\cos\varphi_{\max}+3=0.$$

Дискриминант:

$$D = b^2-4\cdot a\cdot c = (-(8-2\sqrt{2}))^2-4\cdot 2\cdot 3 = 48-32\sqrt{2};$$

$$x_1 = \frac{-b+\sqrt{D}}{2\cdot a} = \frac{(8-2\sqrt{2})+\sqrt{48-32\sqrt{2}}}{2\cdot 2} =$$

$$= 2-\frac{\sqrt{2}}{2}+\sqrt{3-2\sqrt{2}} = 1{,}70711;\; x_2 = \frac{-b-\sqrt{D}}{2\cdot a} =$$

$$=\frac{(8-2\sqrt{2})-\sqrt{48-32\sqrt{2}}}{2\cdot 2}=2-\frac{\sqrt{2}}{2}-\sqrt{3-2\sqrt{2}}=0{,}87868.$$

Поскольку $-1 \le \cos\varphi_{\max} \le 1$, смысл имеет лишь решение

$$\cos\varphi_{\max} = x_2 = 0{,}87868.$$

Таким образом, решением уравнения (14) является:

$$\varphi_{\max} = 28{,}5165°;$$

$$Y_1 = 4\cdot b\cdot\cos\varphi_{\max}-a; \quad (15)$$

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

- перемещение за счет поворота ноги и кривошипов, равное:

$$X_{\text{I}} = (a+Y_1)\cdot\sin\varphi + b\cdot\sin 2\varphi; \quad (16)$$

- перемещение за счет прокатывания башмака по поверхности, равное длине линии профиля башмака (см. рисунок 1). Длина линии определяется криволинейным интегралом [5]:

$$X_{\text{II}} = \int_0^{\varphi}\sqrt{X'^2+Y'^2}\cdot d\varphi. \quad (17)$$

Согласно [4] в выражении (17):

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

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

Следовательно, для формулы (17) получим:

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

$$X_{\text{II}} = \int_0^{\varphi}\sqrt{X'^2+Y'^2}\cdot d\varphi = \int_0^{\varphi}\left(Y_2-\frac{dY_1}{d\varphi}\cdot\sin\varphi\right)\cdot d\varphi. \quad (18)$$

Полное горизонтальное перемещение согласно (16), (17), (18) составит:

$$X_{01} = X_{\text{I}}+X_{\text{II}} = (a+Y_1)\cdot\sin\varphi + b\cdot\sin 2\varphi + \int_0^{\varphi}\left(Y_2-\frac{dY_1}{d\varphi}\cdot\sin\varphi\right)\cdot d\varphi. \quad (19)$$

С учетом того, что $Y_1 = const$, $Y_2 = const$, полное горизонтальное перемещение для диапазона $0 \le \varphi \le \pi/4$ согласно (19) составит:

$$X_{01} = (a+Y_1)\cdot\sin\varphi + b\cdot\sin 2\varphi + Y_2\cdot\varphi. \quad (20)$$

Горизонтальное перемещение оси ступицы колесно-шагающего движителя согласно (20) при угле $\varphi = 45° = \pi/4$ радиан:

$$X_{01} = (a+Y_1)\cdot\frac{\sqrt{2}}{2}+b+Y_2\cdot\frac{\pi}{4}.$$

Если рассматривать диапазон $-\pi/4 \le \varphi \le \pi/4$, то перемещение оси ступицы движителя согласно (20) составит:

$$X_{01} = (a+Y_1)\cdot\sqrt{2}+2\cdot b+Y_2\cdot\frac{\pi}{2}. \quad (21)$$

1. Перемещение за счет поворота ноги и кривошипов:

$$X_{\text{I}} = (a+Y_1)\cdot\sqrt{2}+2\cdot b. \quad (22)$$

2. Перемещение за счет прокатывания башмака по поверхности, равное длине линии профиля башмака:

$$X_{\text{II}} = Y_2\cdot\frac{\pi}{2}. \quad (23)$$

Согласно (21), (22), (23) найдем значение Y_2, исходя из условия $X_{\text{I}} = X_{\text{II}}$:

$$(a+Y_1)\cdot\sqrt{2}+2\cdot b = Y_2\cdot\frac{\pi}{2};\; Y_2 = \frac{(a+Y_1)\cdot 2\sqrt{2}+4\cdot b}{\pi}.$$

Значение Y_1 можно вычислить по формулам (3), (5), (8), (15). Наиболее рациональным является использование формулы (15), которая обеспечивает минимальную амплитуду колебаний вертикальной координаты оси ступицы:

$$Y_1 = 4\cdot b\cdot\cos\varphi_{\max}-a;\; \cos\varphi_{\max} = 0{,}87868;$$

$$\varphi_{\max} = 28{,}5165°.$$

Тогда:

$$Y_2 = \frac{4\cdot b\cdot 0{,}87868\cdot 2\sqrt{2}+4\cdot b}{\pi} = 4{,}4376\cdot b.$$

Окончательно принимаем:

$$Y_1 = 3{,}5147\cdot b-a; \quad (24)$$

$$Y_2 = 4{,}4376\cdot b. \quad (25)$$

Определим величину промежутка между ближайшими друг к другу крайними точками соседних башмаков для угла $\varphi = 45° = \pi/4$ радиан, когда один башмак выходит из контакта с опорной поверхностью, а следующий за ним башмак вступает в контакт.

$$\Delta L = (a+Y_1)\cdot\sqrt{2}+2\cdot b;$$

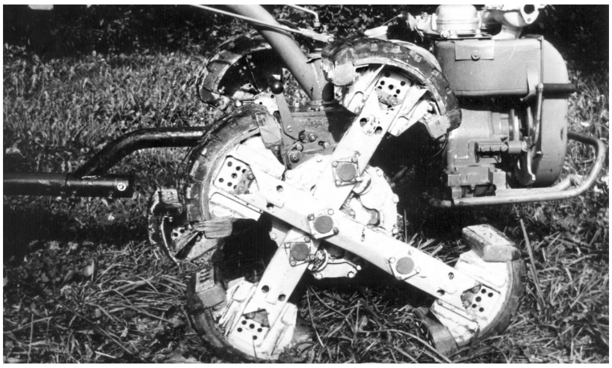

Рисунок 2 — Колесно-шагающий движитель

$$\Delta L = 6{,}97 \cdot b. \quad (26)$$

Вертикальная координата оси ступицы для угла $\varphi = 45°$:

$$Y_{01} = (a + Y_1) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + Y_2;$$

$$Y_{01} = 6{,}923 \cdot b. \quad (27)$$

Определим просвет между опорной поверхностью и нижним краем корпуса ступицы [3, 4], учитывая межосевое расстояние $a = 2 \cdot b$, радиус сателлита, приводящего во вращение кривошип, толщину стенки корпуса редуктора (рисунок 2). Тогда просвет будет равен:

$$\Delta H \approx 4 \cdot b.$$

Таким образом, для того, чтобы движитель лесной машины мог перешагнуть бревно или пень диаметром около 400–450 мм, требуется принять радиус кривошипа b = 120 мм (см. рисунок 1). Тогда основные параметры примут значения Y_1 = 182 мм, Y_2 = 533 мм, a = 240 мм, длина стойки башмака будет равна $c = Y_1 + Y_2$ = 715 мм. На основании этих значений в дальнейшем следует вести детальную разработку конструкции движителя, проводить исследования кинематики и динамики, осуществлять расчеты на прочность.

Выводы. Приведенная методика расчета позволяет обосновать основные конструктивные размеры колесно-шагающего движителя для лесохозяйственных тракторов. Для машин данного типа рационально использовать опорные башмаки круглого профиля, что облегчает передвижение в лесистой местности.

Список литературы

1. Котович, С.В. Движители специальных транспортных средств. Часть I: учеб. пособие / С.В. Котович. — М.: МАДИ (ГТУ), 2008. — 161 с.
2. Беккер, М.Г. Введение в теорию систем «местность — машина» / М.Г. Беккер. — М.: Машиностроение, 1973. — 520 с.
3. Скойбеда, А.Т. Колесно-шагающий движитель и его динамические преимущества по сравнению с колесом / А.Т. Скойбеда, И.М. Комяк, В.Н. Жуковец // Механика-2011: сб. науч. тр. V Белорусского конгресса по теорет. и прикладной механике: в 2 т. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: М.С. Высоцкий [и др.]. — Минск, 2011. — Т. 1. — С. 138–144.
4. Скойбеда, А.Т. Рациональный профиль опорных башмаков колесно-шагающего движителя / А.Т. Скойбеда, В.Н. Жуковец // Наука и техника. — 2013. — № 6. — С. 38–42.
5. Воднев, В.Т. Основные математические формулы: справочник / В.Т. Воднев, А.Ф. Наумович, Н.Ф. Наумович; под ред. Ю.С. Богданова. — Минск: Выш. шк., 1995. — 270 с.

Skoybeda A.T. , Zhukavets V.M., Kalina A.A., Kamyak I.M., Davydov V.S.

Rationale for the parameters of wheel-step mover for forestry tractors

The article provides rationale for the main design parameters of wheel-step mover for forestry tractors. On the basis of these values in the future we should lead the development of detailed design of mover, conduct research of kinematics and dynamics, carry out strength calculations.

Поступил в редакцию 05.10.2016.