

УДК 631.363

ПРОВЕРКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АНАЛИЗА МЕХАНИЗМОВ НАВЕСКИ УНИВЕРСАЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СРЕДСТВА И ТРАКТОРА ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

В. П. БОЙКОВ

*Белорусский национальный технический университет,
г. Минск*

В. Б. ПОПОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Представлено формализованное описание проверки функциональной математической модели процесса перевода в транспортное положение косилки-плющилки прицепной КПП-4,2, агрегируемой с универсальным энергетическим средством УЭС-2-280А и трактором общего назначения БЕЛАРУС 2022. Расчет выходных параметров механизмов навески УЭС-2-280А и БЕЛАРУС 2022 выполнен с помощью различных аналитических выражений. Идентичность сравниваемых результатов расчета выходных параметров механизмов навески УЭС-2-280А и БЕЛАРУС 2022 позволяет сделать вывод о правильности разработанной функциональной математической модели механизма навески, эффективной для мобильных энергетических средств.

Ключевые слова: универсальное энергетическое средство, трактор общего назначения, механизм навески, координаты шарниров звеньев, передаточное число, реакция на штоке гидроцилиндра, полезная нагрузка.

TESTING OF THE FUNCTIONAL MATHEMATICAL MODEL OF ANALYSIS OF MECHANISMS OF LINKAGE OF UNIVERSAL ENERGY TOOLS AND GENERAL PURPOSE TRACTOR

V. P. BOYKOV

Belarusian National Technical University, Minsk

V. B. POPOV

*Educational Institution "Sukhoi State Technical University
of Gomel", the Republic of Belarus*

The article presents a formalized description of the checking of the functional mathematical model of the process of transferring to transport position of pull-type mower conditioners PTMC-4,2, aggregated with universal power tool UPT-2-280A and general-purpose tractor BELARUS 2022. Calculation of the output parameters of linkage mechanisms UPT-2-280A and BELARUS 2022 is performed using various analytical expressions. The identity of the compared results of calculating the output parameters of the linkage mechanisms UPT-2-280A and BELARUS 2022 allows to make a conclusion about the correctness of the developed functional mathematical model of the linkage mechanism, effective for mobile power equipment.

Keywords: universal power tool, general-purpose tractor, linkage mechanism, link hinge coordinates, gear ratio, response on the hydraulic cylinder rod, payload.

Введение

Известно, что использование в режиме автоматизированного проектирования механизма навески (МН) универсального энергетического средства (УЭС) функциональной математической модели (ФММ) анализа, предназначенной для расчета его выходных параметров, существенно облегчает работу конструктора [1]. Применение дополнительного варианта формулы для расчета одного и того же выходного параметра МН позволяет, с одной стороны, проверить расчет выходных параметров МН [2], а с другой – убедиться в работоспособности исходной ФММ анализа.

Цель работы – проверка ФММ с помощью аналитических выражений, связывающих внутренние параметры МН с изменением его выходных параметров.

Основная часть

Плоский аналог МН из его 3D модели получают проецированием характерных точек механизма (центров шарниров) на его продольную плоскость симметрии (рис. 1, а). Формальное сведение пространственного МН к плоскому аналогу обосновано в том случае, если технически обеспечивается движение всех их подвижных шарниров в параллельных плоскостях.

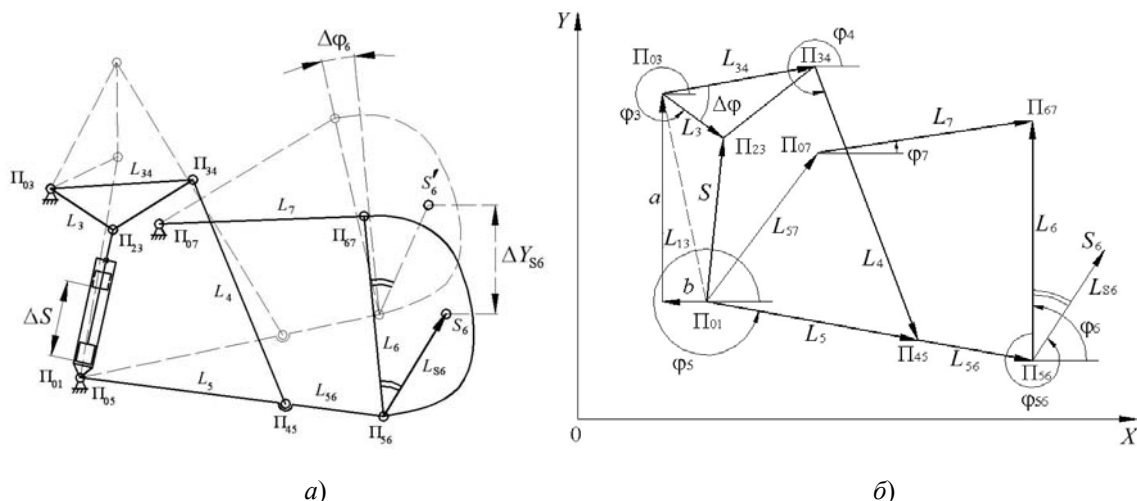


Рис. 1. Кинематическая цепь, состоящая из плоского аналога механизма навески УЭС-2-280А «Полесье» и аналога навесной машины ПКК-3000 – L₆ (а); векторная интерпретация кинематической цепи (б)

Анализ МН большинства мобильных энергоносителей показывает, что на плоскости все многообразие их реализаций представляет собой комбинацию, состоящую из двух базовых структур: четырехзвенного механизма с качающимся гидроцилиндром и группы Ассур 2-го класса, 2-го порядка, 1-го вида [3]. Дальнейшему анализу предлагается самый распространенный в мобильных сельскохозяйственных машинах и структурно наиболее сложный вариант МН, состоящий из четырехзвенного механизма со средней поступательной парой, к которому последовательно присоединяются две вышеперечисленные группы Ассур. Такова структура МН УЭС «Полесье-2-280А», а также тракторов общего назначения «БЕЛАРУС» (рис. 1, а).

Геометрический анализ замкнутой кинематической цепи (рис. 1, б) выполняется по методу замкнутых векторных контуров [3]. В результате определяются углы, образуемые проекциями звеньев, координаты подвижных шарниров МН и характерных точек кинематической цепи. Проверка процедуры геометрического анализа заключается в правильности определения углов, образуемых звеньями МН и оценивается сравнением координат шарнира П₆₇, рассчитываемых из центров неподвижных шарниров П₀₇ и П₀₅.

Координаты центра шарнира Π_{67} могут определяться по выражениям:

$$\begin{cases} X_{67}(S) = X_{07} + L_7 \cdot \cos \varphi_7(S), \\ Y_{67}(S) = Y_{07} + L_7 \cdot \sin \varphi_7(S); \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} X'_{67}(S) = X_{05} + L_{56} \cdot \cos \varphi_5(S) + L_6 \cdot \cos \varphi_6(S), \\ Y'_{67}(S) = Y_{05} + L_{56} \cdot \sin \varphi_5(S) + L_6 \cdot \sin \varphi_6(S), \end{cases} \quad (2)$$

где X_{05} , Y_{05} , $X_{05}Y_{05}$ – координаты неподвижных шарниров Π_{05} , Π_{07} на раме УЭС; φ_5 , φ_6 , φ_7 – углы, образуемые проекциями нижней (L_{56}) и верхней (L_7) тяг, а также высотой присоединительного треугольника (L_6) в правой декартовой системе координат.

Аналитические выражения (1) и (2) представляют собой функции положения для рассматриваемого МН, необходимые для формирования процедур его кинематического и силового анализа.

Передаточное число МН [4], [5] представляет собой аналог вертикальной скорости центра тяжести навесной машины (ПКК-3000), зависящий от внутренних параметров МН и координаты центра тяжести навесной машины. Проверка процедуры кинематического анализа МН заключается в совпадении результатов расчета передаточных чисел МН по двум различным выражениям:

$$I_{S6} = \varphi'_3 \cdot U_{53} [L_{56} \cdot \cos \varphi_5 + U_{65} L_{S6} \cdot \cos(\varphi_6 + \varphi_{S6})]; \quad (3)$$

$$I'_{S6} = \varphi'_3 \cdot U_{63} [X_{S6} - X_P], \quad (4)$$

где φ'_3 – аналог угловой скорости поворотного рычага (L_3); L_{S6} и φ_{S6} – характеристики вектора, проведенного от оси подвеса в центр тяжести ПКК-3000 (рис. 1, б); X_P – мгновенный центр вращения (МЦВ) выходного звена замкнутой кинематической цепи (L_6).

Передаточные отношения $U_{53}(S)$ и $U_{65}(S)$ [3], связывающие между собой угловые скорости (или аналоги этих скоростей) звеньев L_{56} и L_3 , а также L_{56} и L_6 , определяются в результате последовательного кинематического анализа замкнутых контуров $\Pi_{03}\Pi_{34}\Pi_{45}\Pi_{05}$ и $\Pi_{07}\Pi_{67}\Pi_{56}\Pi_{05}$ (рис. 1, б):

$$U_{53}(S) = \frac{L_{34} \cdot \sin[\varphi_{34}(S) - \varphi_4(S)]}{L_5 \cdot \sin[\varphi_5(S) - \varphi_4(S)]}, \quad U_{65}(S) = \frac{L_{56} \cdot \sin[\varphi_5(S) - \varphi_7(S)]}{L_6 \cdot \sin[\varphi_7(S) - \varphi_6(S)]}. \quad (5)$$

Передаточное отношение $U_{63}(S)$ связывает между собой угловые скорости (или аналоги этих скоростей) звеньев L_6 и L_3 :

$$U_{63}(S) = U_{53}(S) \cdot U_{65}(S). \quad (6)$$

Аналог угловой скорости поворотного рычага (L_3) может быть определен по одному из двух выражений:

$$\varphi'_3(S) = \frac{2S}{\sqrt{4L_{13}^2 L_3^2 - [S^2 - (L_{13}^2 + L_3^2)]^2}}; \quad \varphi'_{31}(S) = \frac{1}{L_3 \cdot \sin[\varphi_{12}(S) - \varphi_3(S)]}, \quad (7)$$

где L_{13} – расстояние между центрами неподвижных шарниров Π_{01} и Π_{03} .

Кроме того, для данной структурной схемы МН справедливы следующие соотношения [3]:

$$\varphi'_5(S) = \varphi'_3(S) \cdot U_{53}(S); \quad \varphi'_6(S) = \varphi'_3(S) \cdot U_{63}(S), \quad (8)$$

где $\varphi'_5(S)$ и $\varphi'_6(S)$ – аналоги угловых скоростей звеньев L_{56} и L_6 .

Для построения МЦВ навесной машины в системе координат, связанной с задним колесом мобильного энергетического средства (МЭС), проведем лучи через верхнюю (L_7) и нижнюю (L_{56}) тяги МН (рис. 2). Чтобы определить координаты МЦВ, используем уравнения прямых, проходящих через верхнюю и нижние тяги внешнего четырехзвенника МН:

$$\frac{(X_P - X_{07})}{(X_{67} - X_{07})} = \frac{(Y_P - Y_{07})}{(Y_{67} - Y_{07})}; \quad \frac{(X_P - X_{05})}{(X_{56} - X_{05})} = \frac{(Y_P - Y_{05})}{(Y_{567} - Y_{05})}.$$

Совместное решение этих уравнений однозначно определяет координаты МЦВ в зависимости от положения неподвижных и подвижных шарниров внешнего четырехзвенника $\Pi_{07}\Pi_{67}\Pi_{56}\Pi_{05}$ МН:

$$X_P = \frac{(Y_{56}X_{05} - Y_{05}X_{56})(X_{07} - X_{67}) - (X_{05} - X_{56})(Y_{67}X_{07} - Y_{07}X_{67})}{(Y_{07} - X_{67})(X_{05} - X_{56}) - (X_{07} - X_{67})(Y_{05} - Y_{56})}, \quad (9)$$

$$Y_P = X_P \frac{Y_{56} - Y_{05}}{X_{56} - X_{05}} + \frac{Y_{05}X_{56} - X_{05}Y_{56}}{X_{56} - X_{05}}.$$

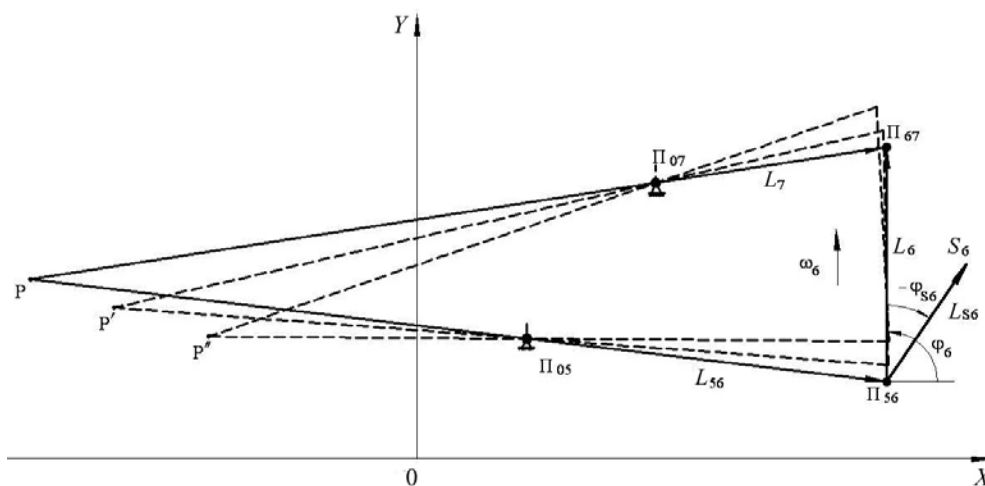


Рис. 2. Мгновенный центр вращения (P) выходного звена (L_6) и его колебания относительно оси подвеса (Π_{56}) механизма навески

Проверка процедуры силового анализа МН заключается в совпадении результатов расчета полезной нагрузки (R_{23}), приложенной к штоку гидроцилиндра МН со стороны поворотного рычага, и противоположно ей направленной, приложенной к поршню гидроцилиндра движущей силой [2]:

$$F = P_6 I_{S_6}, \quad (10)$$

где P_6 – вес ПКК-3000.

Расчет полезной нагрузки (R_{23}) выполняется по группам Ассура по известной методике [2], [3].

Результаты расчета приведенных выше выходных параметров МН трактора «БЕЛАРУС 2022» и универсального энергетического средства УЭС-2-280А, агрегируемых с полунавесным кормоуборочным комбайном ПКК-3000 «Полесье», выполненные при помощи ФММ [6], представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

**Выходные параметры механизма навески трактора «БЕЛАРУС 2022»
при агрегатировании с ПКК-3000 «Полесье» ($P_6 = 28$ кН)'**

S , м	X_{67} , м	X'_{67} , м	Y_{67} , м	Y'_{67} , м	X_p , м	U_{63}	Φ'_3 , 1/м	Φ'_{31} , 1/м	I_{S6}	I'_{S6}	R_{23} , кН	F , кН
0,440	*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,465	1,192	1,192	0,974	0,974	-3,039	0,163	4,526	4,526	3,888	3,888	108,9	108,9
0,490	1,180	1,180	1,051	1,051	-2,330	0,195	4,403	4,403	3,919	3,919	109,7	109,7
0,515	1,162	1,162	1,125	1,125	-1,781	0,228	4,352	4,352	3,976	3,976	111,3	111,3
0,540	1,162	1,162	1,197	1,197	-1,338	0,263	4,357	4,357	4,053	4,053	113,5	113,5
0,565	1,135	1,135	1,266	1,266	-0,972	0,298	4,410	4,410	4,145	4,145	116,1	116,1
0,590	1,062	1,062	1,333	1,333	-0,667	0,335	4,511	4,511	4,248	4,248	118,9	118,9
0,615	1,014	1,014	1,397	1,397	-0,412	0,371	4,655	4,655	4,358	4,358	122,0	122,0
0,640	0,958	0,958	1,456	1,456	-0,199	0,405	4,882	4,882	4,466	4,466	125,1	125,1
0,665	0,896	0,896	1,511	1,511	-0,027	0,434	5,183	5,183	4,560	4,560	127,7	127,7
0,690	0,826	0,826	1,560	1,560	0,112	0,453	5,606	5,606	4,618	4,618	129,3	129,3

*Подсоединение ПКК-3000 к трактору «БЕЛАРУС 2022» выполняется, когда высота оси подвеса его МН (Y_{56}) составляет 0,4 м.

Примечание. S – обобщенная координата, отражающая ход поршня гидроцилиндра (ΔS); X_{67} , Y_{67} – координаты центра подвижного шарнира (P_{67}); Φ'_3 – аналог угловой скорости поворотного рычага (L_3, L_{34}); I_{S6} – передаточное число МН в центре тяжести рабочей машины; U_{63} – передаточное отношение угловых скоростей звеньев (L_6, L_3); F – приведенная к гидроцилиндру полезная нагрузка.

Таблица 2

**Выходные параметры механизма навески УЭС-2-280А «Полесье»
при агрегатировании с ПКК-3000**

S , м	X_{67} , м	X'_{67} , м	Y_{67} , м	Y'_{67} , м	X_p , м	U_{63}	Φ'_3 , 1/м	Φ'_{31} , 1/м	I_{S6}	I'_{S6}	R_{23} , кН	F , кН
0,571	*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,596	1,134	1,134	0,956	0,956	-2,218	0,151	4,844	4,844	3,227	3,227	90,35	90,35
0,621	1,134	1,134	1,017	1,017	-2,113	0,170	4,425	4,425	3,243	3,243	90,79	90,79
0,646	1,129	1,129	1,078	1,078	-1,99	0,186	4,175	4,175	3,263	3,263	91,37	91,37
0,671	1,121	1,121	1,139	1,139	-1,852	0,202	4,023	4,023	3,292	3,292	92,18	92,18
0,696	1,108	1,108	1,199	1,199	-1,702	0,217	3,935	3,935	3,33	3,33	93,24	93,24
0,721	1,09	1,09	1,259	1,259	-1,543	0,232	3,896	3,896	3,377	3,377	94,56	94,56
0,746	1,068	1,068	1,318	1,318	-1,376	0,248	3,896	3,896	3,434	3,434	96,15	96,15
0,771	1,041	1,041	1,377	1,377	-1,205	0,265	3,932	3,932	3,501	3,501	98,04	98,04
0,796	1,01	1,01	1,435	1,435	-1,031	0,282	4,003	4,003	3,581	3,581	100,3	100,3
0,821	0,972	0,972	1,462	1,462	-0,858	0,301	4,112	4,112	3,675	3,675	102,9	102,9

*Подсоединение ПКК-3000 к УЭС-2-280А выполняется в том случае, если высота оси подвеса МН (Y_{56}) составляет 0,4 м.

Результаты расчетов на ФММ пяти групп выходных параметров МН трактора общего назначения «БЕЛАРУС 2022» (табл. 1) и универсального энергетического средства УЭС-2-280А (табл. 2) с использованием других аналитических выражений подтвердили их идентичность и правильность разработанной ФММ.

Заключение

Проверочный расчет части выходных параметров МН мобильного энергетического средства (УЭС или трактора) в процедурах геометрического, кинематического и силового анализа позволяет оценить адекватность сформированной ФММ. Расчет выходных параметров механизмов навески УЭС-2-280А и БЕЛАРУС 2022 был выполнен с помощью различных аналитических выражений. Полученные результаты позволяют сделать вывод о правильности разработанной ФММ, отражающей изменение выходных параметров МН в процессе перевода ПКК-3000 из рабочего в транспортное положение.

Использованная ФММ эффективна и для других мобильных энергетических средств с МН идентичной структуры.

Литература

1. Попов, В. Б. Математическое моделирование подъемно-навесных устройств мобильных энергетических средств / В. Б. Попов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – 251 с. : ил.
2. Попов, В. Б. Математическое моделирование : практ. рук. к выполнению курсовых работ по одноим. дисциплине для студентов специальности 1-36 12 01 «Проектирование и производство сельскохозяйственной техники» днев. и заоч. форм обучения / В. Б. Попов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2005. – 79 с.
3. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин / И. И. Артоболевский. – М. : Машиностроение, 1988. – 640 с.
4. Попов, В. Б. Аналитические выражения кинематических передаточных функций механизмов навески энергоносителей / В. Б. Попов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2000. – № 2. – С. 25–29.
5. Гуськов, В. В. Тракторы. Ч. III. Конструирование и расчет / В. В. Гуськов. – Минск : Выш. шк., 1981. – 383 с.
6. Попов, В. Б. Функциональная математическая модель анализа подъемно-навесных устройств мобильных энергетических средств / В. Б. Попов // Механика – 2011 : сб. науч. тр. V Белорус. конгр. по теорет. и приклад. механике, Минск, 2011 г. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси ; редкол.: М. С. Высоцкий [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 169–176.

Получено 24.09.2020 г.