

Литература

1. Машиностроение. Энциклопедия. Неметаллические конструкционные материалы. Т. II-4 / Ю. В. Антипов [и др.] ; под ред. А. А. Кулькова ; редкол.: К. В. Фролов (пред.) и др. – М. : Машиностроение, 2005. – 464 с. : ил.
2. Бобарикин, Ю. Л. Способ изготовления полосового антифрикционного металлофторопластового материала / Ю. Л. Бобарикин, С. В. Шишков // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2011. – № 3. – С. 3–9.
3. Шишков, С. В. Оценка адгезионных свойств металлофторопластового композита с регулируемой пористостью бронзовой матрицы / С. В. Шишков, А. Н. Швецов // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сб. тез. докл. 6-й Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 2022 г. / Науч.-техн. центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш». – Гомель, 2022. – С. 305–307.

УДК 631.3-52: 631.3

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ  
СИЛОВОГО АНАЛИЗА МЕХАНИЗМА НАВЕСКИ  
ПОДЪЕМНО-НАВЕСНОГО УСТРОЙСТВА УЭС-2-250А  
ПРИ ПОДЪЕМЕ КОРМОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА КНК-3000**

**А. В. Сусло**

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

Научный руководитель В. Б. Попов

*Представлена методика силового анализа механизма навески подъемно-навесного устройства УЭС-2-250А, обеспечивающая его агрегатирование с навесным оборудованием. При этом формируется функциональная математическая модель силового анализа механизма навески. Последняя может быть использована для функционального проектирования идентичных по структуре подъемных механизмов строительно-дорожных машин и самоходных шасси.*

**Ключевые слова:** силовой анализ, механизм навески, мобильные машины, плоский аналог механизма навески.

**MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCEDURE  
FOR FORCE ANALYSIS OF THE LINKAGE MECHANISM  
OF THE UES-2-250A LIFTING DEVICE WHEN LIFTING  
THE KNK-3000 FORAGE HARVESTER**

**A. V. Suslo**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, Republic of Belarus*

Science supervisor V. B. Popov

*A method of force analysis of the linkage mechanism of the UES-2-250A lifting-and-hinging device is presented, ensuring its aggregation with attachments. In this case, a functional mathematical model of force analysis of the linkage mechanism is formed. The latter can be used for the functional design of lifting mechanisms of road construction machines and self-propelled chassis that are identical in structure.*

**Keywords:** force analysis, linkage mechanism, mobile machines, flat analogue of the linkage mechanism.

Рассмотрим следующие этапы математического моделирования процедур силового анализа механизма навески подъемно-навесного устройства УЭС-2-250а при подъеме кормоуборочного комбайна КНК-3000:

1. Определение реакции  $R_{56}$  в подвижном шарнире  $\Pi_{56}$ .

В силовом анализе пренебрегаем силами инерции звеньев механизма навески и агрегатируемой с трактором навесной машины. Это связано с тем, что они относятся к тихоходным объектам, движущимся с весьма малыми ускорениями и скоростями. Запишем систему уравнений равновесия для группы Ассур 2-го порядка 1-го вида ( $L_6-L_7$ ) (рис. 1):

$$(2 \cdot R_{56x}(S) + R_{07x}(S)) = 0;$$

$$R_{07x}(S)(Y_{67}(S) - Y_{07}) + R_{07y}(X_{07} - X_{67}(S)) = 0;$$

$$2 \cdot R_{56y}(S) + R_{07y}(S) - P_6 = 0;$$

$$2 \cdot R_{56x}(S)(Y_{67}(S) - Y_{56}(S)) + 2 \cdot R_{56y}(S)(X_{56}(S) - X_{67}(S)) - M_6 = 0,$$

где  $M_6(S) = P_6(X_{56}(S) - X_{67}(S))$ .

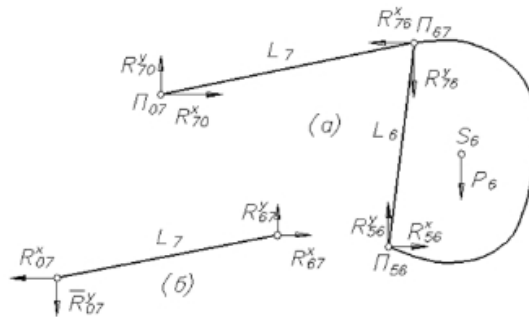


Рис. 1. Схема анализа двухповодковой группы 1-го вида, состоящей из звеньев  $L_7-L_6$

Запишем матрицы, соответствующие системе линейных уравнений равновесия вышеупомянутой группы Ассур, а решение данной системы найдем по методу Крамера:

$$M(S) = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & Y_{67}(S) - Y_{07} & X_{07} - X_{67}(S) \\ (Y_{67}(S) - Y_{56}(S))2 & (X_{56}(S) - X_{67}(S))2 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$N(S) = \begin{bmatrix} 0 \\ P_6 \\ 0 \\ P_6(X_{56}(S) - X_{67}(S)) \end{bmatrix};$$

$$M_1(S) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ P_6 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & Y_{67}(S) - Y_{07} & X_{07} - X_{67}(S) \\ M_6(S) & (X_{56}(S) - X_{67}(S)) \cdot 2 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$M_2(S) = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & P_6 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & Y_{67}(S) - Y_{07} & X_{07} - X_{67}(S) \\ (Y_{67}(S) - Y_{56}(S)) \cdot 2 & M_6(S) & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$R_{56x}(S) = \frac{|M_1(S)|}{|M(S)|}; \quad R_{56y}(S) = \frac{|M_2(S)|}{|M(S)|}; \quad R_{56}(S) = E(R_{56x}(S), R_{56y}(S)).$$

2. Определение реакции  $R_{07}$  в шарнире  $\Pi_{07}$  на раме трактора:

$$M_3(S) = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & P_6 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & X_{07} - X_{67}(S) \\ (Y_{67}(S) - Y_{56}(S)) \cdot 2 & (X_{56}(S) - X_{67}(S)) \cdot 2 & M_6(S) & 0 \end{bmatrix};$$

$$M_4(S) = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & P_6 \\ 0 & 0 & Y_{67}(S) - Y_{07} & 0 \\ (Y_{67}(S) - Y_{56}(S)) \cdot 2 & (X_{56}(S) - X_{67}(S)) \cdot 2 & 0 & M_6(S) \end{bmatrix};$$

$$R_{07x}(S) = \frac{|M_3(S)|}{|M(S)|}; \quad R_{07y}(S) = \frac{|M_4(S)|}{|M(S)|}; \quad R_{07}(S) = E(R_{07x}(S), R_{07y}(S)).$$

**Проверка:**  $R_{07y}(S) + 2 \cdot R_{56y}(S) - P_6 = R_{07x}(S) + 2 \cdot R_{56x}(S)$ .

3. Определение реакции  $R_{76}$  в подвижном шарнире  $\Pi_{76}$ .

$R_{76}$  определим из уравнений равновесия звена  $L_6$ :

$$R_{76x}(S) = -2 \cdot R_{56x}(S); \quad R_{76y}(S) = -2 \cdot R_{56y}(S) + P_6; \quad R_{76}(S) = E(R_{76x}(S), R_{76y}(S)).$$

4. Определение реакций  $R_{65x}$  и  $R_{65y}$ :

$$R_{65x}(S) = -R_{56x}(S); \quad R_{65y}(S) = -R_{56y}(S).$$

**Проверка:**  $R_{76xp}(S) = -R_{07x}(S); \quad R_{76yp}(S) = -R_{07y}(S); \quad R_{76p}(S) = E(R_{76xp}(S), R_{76yp}(S)).$

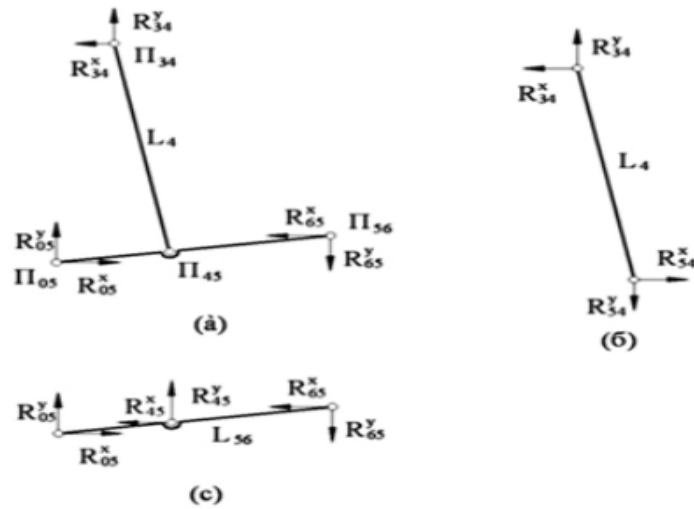
5. Определение реакции  $R_{34}$ .

Рис. 2. Схема силового анализа двухповодковой группы 1-го вида, состоящей из звеньев  $L_{56}-L_4$

Запишем систему уравнений равновесия для группы ( $L_4-L_{56}$ ):

$$R_{05x}(S) + R_{34x}(S) + R_{65x} = 0;$$

$$R_{05y}(S) + R_{34y}(S) + R_{65y}(S) = 0;$$

$$R_{34x}(Y_{34}(S) - Y_{45}(S)) + R_{34y}(X_{45}(S) - X_{34}(S)) = 0;$$

$$R_{05x}(Y_{05} - Y_{45}(S)) + R_{05y}(X_{45}(S) - X_{05}) - M_{65}(S) = 0.$$

Запишем матрицы, соответствующие системе уравнений равновесия группы Ассура, а решение данной системы найдем по методу Крамера:

6. Определение реакции  $R_{05}$ .

$$M_3(S) = \begin{bmatrix} -R_{65x}(S) & 0 & 1 & 0 \\ -R_{65y}(S) & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & Y_{34}(S) - Y_{45}(S) & X_{45}(S) - X_{34}(S) \\ M_{65}(S) & X_{45}(S) - X_{05} & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$M_4(S) = \begin{bmatrix} 1 & -R_{65x}(S) & 1 & 0 \\ 0 & -R_{65y}(S) & 0 & 1 \\ 0 & 0 & Y_{34}(S) - Y_{45}(S) & X_{45}(S) - X_{34}(S) \\ Y_{05} - Y_{45}(S) & M_{65}(S) & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$R_{05x}(S) = \frac{|M_3(S)|}{|M(S)|}; \quad R_{05y}(S) = \frac{|M_4(S)|}{|M(S)|}; \quad R_{05}(S) = E(R_{05x}(S), R_{05y}(S)).$$

**Проверка:**  $R_{05x}(S) + R_{65x}(S) + R_{34x}(S); \quad R_{05y}(S) + R_{65y}(S) + R_{34y}(S).$

7. Определение реакции  $R_{45}$  в шарнире  $\Pi_{45}$  получим из уравнения равновесия звена  $L_{56}$ :

$$R_{45x}(S) = -R_{05x}(S) - R_{65x}(S); \quad R_{45y}(S) = -R_{05y}(S) - R_{65y}(S);$$

$$R_{45}(S) = E(R_{45x}(S), R_{45y}(S)).$$

8. Определение реакций  $R_{43x}$  и  $R_{43y}$ :

$$R_{43x}(S) = -R_{34x}(S); \quad R_{43y}(S) = -R_{34y}(S).$$

9. Определение реакции  $R_{23}$ :

$$M_{23}(S) = R_{23} \cdot \cos \varphi_{12}(S) (Y_{03} - Y_{23}(S)) + R_{23} \cdot \sin \varphi_{12}(S) \cdot (X_{23}(S) - X_{03});$$

$$R_{23x}(S) = R_{23}(S) \cdot \cos(\varphi_{12}(S)); \quad R_{23y}(S) = R_{23}(S) \cdot \sin(\varphi_{12}(S));$$

$$m(S) = \cos \varphi_{12}(S) (Y_{03} - Y_{23}(S)) + \sin \varphi_{12}(S) (X_{23}(S) - X_{03});$$

$$M_{43}(S) = [(R_{43y}(S)) (X_{34}(S) - X_{03}) + R_{43x}(S) (Y_{03} - Y_{34}(S))]2;$$

$$R_{23}(S) = \frac{-M_{43}(S)}{m(S)}.$$

**Проверка:**  $R_{23}(S) = F_g(S).$

Определение реакций  $R_{01}$ :

$$R_{01}(S) = R_{23}(S); \quad R_{03y}(S) = -R_{23y}(S) - 2 \cdot R_{43y}(S).$$

Определение реакций  $R_{03}$ :

$$R_{03x}(S) = -R_{23x}(S) - 2 \cdot R_{43x}(S); \quad R_{03}(S) = E(R_{03x}(S), R_{03y}(S)).$$

12. Результаты силового анализа механизма навески УЭС-2-250А при подъеме кормоуборочного комбайна КНК-3000 даны в таблице.

## Значения реакций в шарнирах звеньев механизма навески

$S_m$	$R_{56}(S),$ Н	$R_{07}(S),$ Н	$R_{76}(S),$ Н	$R_{45}(S),$ Н	$R_{05}(S),$ Н	$R_{03}(S),$ Н	$R_{23}(S),$ Н	$R_{01}(S),$ Н	$F_g(S),$ Н
0,571	$6,452 \cdot 10^4$	$5,507 \cdot 10^4$	$7,271 \cdot 10^4$	$9,901 \cdot 10^4$	$11,76 \cdot 10^4$	$6,244 \cdot 10^4$	$11,43 \cdot 10^4$	$11,43 \cdot 10^4$	$1,144 \cdot 10^5$
0,596	$6,641 \cdot 10^4$	$5,523 \cdot 10^4$	$7,519 \cdot 10^4$	$9,327 \cdot 10^4$	$10,99 \cdot 10^4$	$6,384 \cdot 10^4$	$11,43 \cdot 10^4$	$11,43 \cdot 10^4$	$1,143 \cdot 10^5$
0,621	$6,829 \cdot 10^4$	$5,546 \cdot 10^4$	$7,766 \cdot 10^4$	$8,936 \cdot 10^4$	$10,43 \cdot 10^4$	$6,511 \cdot 10^4$	$11,41 \cdot 10^4$	$11,41 \cdot 10^4$	$1,142 \cdot 10^5$
0,646	$7,016 \cdot 10^4$	$5,573 \cdot 10^4$	$8,014 \cdot 10^4$	$8,652 \cdot 10^4$	$9,984 \cdot 10^4$	$6,638 \cdot 10^4$	$11,13 \cdot 10^4$	$11,13 \cdot 10^4$	$1,144 \cdot 10^5$
0,671	$7,201 \cdot 10^4$	$5,605 \cdot 10^4$	$8,263 \cdot 10^4$	$8,440 \cdot 10^4$	$9,614 \cdot 10^4$	$6,771 \cdot 10^4$	$11,49 \cdot 10^4$	$11,49 \cdot 10^4$	$1,15 \cdot 10^5$
0,696	$7,386 \cdot 10^4$	$5,642 \cdot 10^4$	$8,513 \cdot 10^4$	$8,28 \cdot 10^4$	$9,294 \cdot 10^4$	$6,914 \cdot 10^4$	$11,60 \cdot 10^4$	$11,60 \cdot 10^4$	$1,16 \cdot 10^5$
0,721	$7,568 \cdot 10^4$	$5,682 \cdot 10^4$	$8,763 \cdot 10^4$	$8,159 \cdot 10^4$	$9,011 \cdot 10^4$	$7,068 \cdot 10^4$	$11,73 \cdot 10^4$	$11,73 \cdot 10^4$	$1,174 \cdot 10^5$
0,746	$7,749 \cdot 10^4$	$5,724 \cdot 10^4$	$9,012 \cdot 10^4$	$8,071 \cdot 10^4$	$8,752 \cdot 10^4$	$7,237 \cdot 10^4$	$11,91 \cdot 10^4$	$11,91 \cdot 10^4$	$1,191 \cdot 10^5$
0,771	$7,926 \cdot 10^4$	$5,768 \cdot 10^4$	$9,258 \cdot 10^4$	$8,011 \cdot 10^4$	$8,510 \cdot 10^4$	$7,424 \cdot 10^4$	$12,12 \cdot 10^4$	$12,12 \cdot 10^4$	$1,213 \cdot 10^5$
0,796	$8,096 \cdot 10^4$	$5,810 \cdot 10^4$	$9,497 \cdot 10^4$	$7,974 \cdot 10^4$	$8,278 \cdot 10^4$	$7,634 \cdot 10^4$	$12,37 \cdot 10^4$	$12,37 \cdot 10^4$	$1,238 \cdot 10^5$
0,821	$8,258 \cdot 10^4$	$5,849 \cdot 10^4$	$9,724 \cdot 10^4$	$7,958 \cdot 10^4$	$8,048 \cdot 10^4$	$7,874 \cdot 10^4$	$12,67 \cdot 10^4$	$12,67 \cdot 10^4$	$1,267 \cdot 10^5$

## Литература

1. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин : учеб. для вузов / И. И. Артоболевский. – М. : Наука, 1988. – 640 с.
2. Попов, В. Б. Математическое обеспечение автоматизированного проектирования подъемно-навесных устройств погрузчиков / В. Б. Попов, В. А. Довгяло, // Актуальные проблемы развития транспортных систем и строительного комплекса : тр. Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 2001 г. – Гомель, 2001. – С. 91–92.
3. Попов, В. Б. Математическое моделирование подъемно-навесных устройств мобильных энергетических средств / В. Б. Попов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – 251 с.

УДК 338.45 (476)

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ  
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ  
ПРОМЫШЛЕННО-ИНДУСТРИАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА  
КАК УСЛОВИЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ**

**Е. С. Ходор, П. А. Анцитович, В. А. Гриб**

*Учреждение образования «Белорусский государственный  
экономический университет», г. Минск*

Научный руководитель А. С. Сверлов

*Рассмотрена эволюция промышленного производства в период с 2018 по 2040 г. Основное внимание уделено внедрению цифровых технологий, концепции Индустрии 4.0 и интеллектуализации производства. Обсуждены ключевые направления развития, такие как индивидуализация производства, изменение географии размещения производств, снижение затрат ресурсов, применение сенсорных устройств, циркулярная экономика и конвергенция взаимодействий в системе «человек – природа – техника».*

**Ключевые слова:** промышленное производство, цифровые технологии, Индустрия 4.0, интеллектуализация, индивидуализация производства, циркулярная экономика, сенсорные устройства.