

УДК 629.114.2

## РАСЧЕТ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ ПОДЪЕМНО-НАВЕСНОГО УСТРОЙСТВА УНИВЕРСАЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СРЕДСТВА ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ

**В. Б. ПОПОВ**

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

### Введение

В настоящее время сформировалась устойчивая тенденция к обоснованному росту производительности специализированных уборочных машин и орудий, агрегируемых с универсальным энергетическим средством (УЭС) «Полесье». Появление в шлейфе навесных машин тяжелых адаптеров – навесных кормо-, свекло- и зерноуборочных машин массой от 3400 до 4600 кг повышает требования к их агрегатированию с УЭС. Например, возрастают требования к грузоподъемности подъемно-навесного устройства (ПНУ) энергосредства третьего поколения УЭС 290/450 и к его основному компоненту – механизму навески (МН).

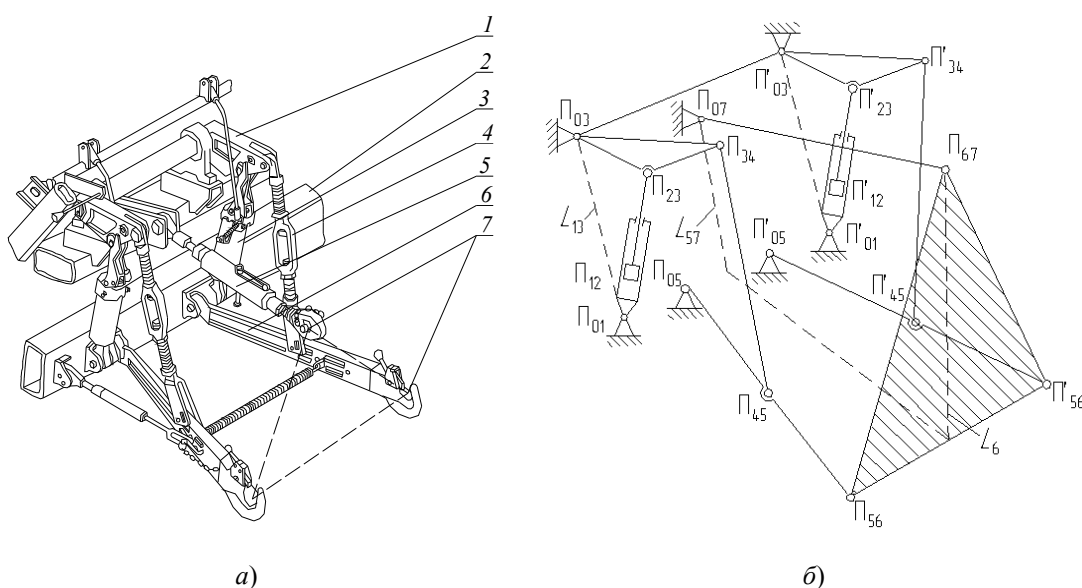


Рис. 1. Механизм навески универсального энергетического средства (а) и его структурная схема (б): 1 – рычаг поворотный; 2 – рама энергосредства; 3 – гидроцилиндр; 4 – раскос; 5 – центральная тяга; 6 – нижняя тяга; 7 – соединительный треугольник

### Постановка задачи

Структурная модель наиболее мощного, заднего МН УЭС сложилась (рис. 1), она остается неизменной и для большинства других мобильных энергетических средств (МЭС). Изыскание резерва грузоподъемности ПНУ обеспечивается в первую очередь за счет оптимизации внутренних параметров его МН.

Понятие грузоподъемности ПНУ МЭС и, в частности, колесного трактора приводится в [1] и определяется массой (весом) груза, переводимого из рабочего в транспортное положение (рис. 2), при максимально развиваемой величине усилия ( $F_{шт}^{max}$ ) на штоке гидроцилиндра (гидроцилиндров) (ГЦ) МН:

$$m = \frac{F_{шт}^{max} \cdot \eta_{МН}}{I_{S_6}(S)g}, \quad (1)$$

где  $I_{S_6}(S)$  – передаточное число МН;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\eta_{МН}$  – КПД МН.

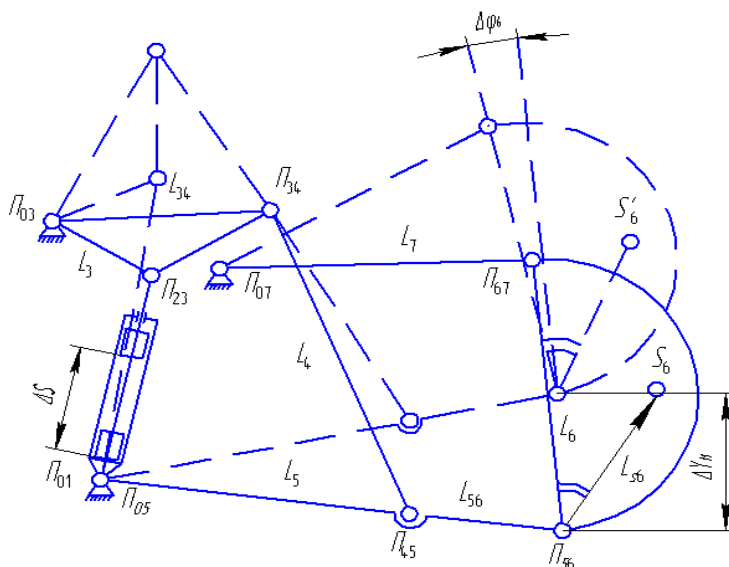


Рис. 2. Схема перевода навесной машины из рабочего в транспортное положение

Следует отметить, что в вышеприведенном аналитическом выражении потери на трение определяются по результатам испытаний и в процессе движения штока ГЦ МН (изменения обобщенной координаты  $\Delta S$ ) принимаются постоянными; влияние приведенной к штоку ГЦ силы инерции навесной машины (НМ) не учитывается; передаточное число МН определяется из плана скоростей как отношение скорости центра тяжести НМ или орудия к скорости поршня ГЦ. В результате расчет грузоподъемности ПНУ МЭС по предложенной методике на этапах его проектирования или модернизации в современных условиях не может быть признан удовлетворительным.

В то же время расширение шлейфа агрегируемых с УЭС рабочих машин и орудий, сопровождающееся ростом их массово-геометрических характеристик, конфликтует с ограниченной мощностью гидропривода ПНУ. Поэтому для модернизации ПНУ в режиме автоматизированного проектирования необходимо более точное описание его грузоподъемности. С этой целью предлагается уточнить выражение (1).

В работе [2] было предложено аналитическое выражение для грузоподъемности ПНУ:

$$G_S = \frac{p_{шт}^{max} F_c - [F_{тр}^{np}(S^*) + F_{ин}^{np}(S^*)]}{I_{S_6}(S^*)}, \quad (2)$$

где  $S^*$  – значение обобщенной координаты, соответствующее максимальному значению основного передаточного числа МН –  $I_{S_6}(S)$ ;  $p_{шт}^{max}$  – максимально возможное давление в ГЦ МН;  $F_c$  – площадь поршня ГЦ со стороны рабочей гидромагистрали;

$F_{\text{тр}}^{\text{пр}}(S)$  – приведенная к штоку поршня сила трения;  $F_{\text{ин}}^{\text{пр}}(S)$  – приведенная к штоку поршня ГЦ сила инерции.

В данном выражении грузоподъемность представляет собой вес НМ, переводимой из рабочего в транспортное положение, измеряемый в ньютонах. Коэффициент полезного действия МН в процессе подъема НМ не остается постоянным, причем переменными оказываются как его средняя величина, так и экстремальные значения. Методика расчета  $F_{\text{тр}}^{\text{пр}}(S)$ , позволяющая адекватно оценить потери на трение для механизмов навески МЭС, изложена в работе [2].

Целью настоящей работы является аналитическое определение приведенной силы инерции –  $F_{\text{ин}}^{\text{пр}}(S)$  и влияния на грузоподъемность ПНУ УЭС 290/450 приведенных сил инерции и трения. Как следует из выражения (2), грузоподъемность ПНУ обратно пропорциональна его основному передаточному числу –  $I_{S_6}(S)$ , аналитическое выражение для которого получено в работе [3] и представлено ниже:

$$I_{S_6}(S) = \varphi'_3(S)U_{53}(S)[L_{56} \cdot \cos \varphi_5(S) + U_{65}(S)L_{S_6} \cos(\varphi_6(S) + \varphi_{S_6})], \quad (3)$$

где  $\varphi'_3(S)$  – аналог угловой скорости поворотного рычага;  $U_{53}(S)$ ,  $U_{65}(S)$  – передаточные отношения;  $L_{56}$ ,  $L_{S_6}$  – длины звеньев МН;  $\varphi_5(S)$ ,  $\varphi_6(S)$ ,  $\varphi_{S_6}$  – углы, образуемые соответствующими звеньями в правой декартовой системе координат.

Подставляя в уравнение Лагранжа выражение для кинетической энергии движущейся НМ, считая при этом, что обобщенная сила равна разности между силой, движущей поршень ГЦ МН, и силами сопротивления движению, после некоторых преобразований получим:

$$m(S)\ddot{S} + \frac{1}{2}m'(S)\dot{S}^2 = F_{\text{дв}} - [F(S) + F_{\text{тр}}^{\text{пр}}(S)], \quad (4)$$

где  $m(S)$  – приведенная масса;  $m'(S)$  – производная от приведенной массы по обобщенной координате;  $F_{\text{дв}}$  – движущая сила, равная произведению давления в ГЦ на площадь его поршня.

Величина приведенной массы определяется по закону сохранения энергии, интерпретированному для замкнутой кинематической цепи (рис. 2). Если весом звеньев механизма навески по сравнению с весом навесной машины пренебречь, то получим выражение вида:

$$m(S) = m_6 I_v^2(S) + J_6 \varphi_6'^2(S), \quad (5)$$

где  $m_6$ ,  $J_6$  – соответственно масса и момент инерции НМ;  $I_v(S)$  – аналог линейной скорости центра тяжести НМ;  $\varphi_6'(S)$  – аналог угловой скорости НМ.

Аналитическое выражение для аналога линейной скорости центра масс НМ получим последовательным преобразованием выражений для координат центра тяжести  $S_6$  навесной машины, отнесенным к скорости движения поршня ГЦ  $\dot{S}$ :

$$I_v(S) = \varphi'_3(S) \cdot U_{53}(S) \sqrt{L_{56}^2 + U_{65}^2(S)L_{S_6}^2 + 2U_{65}(S)L_{56}L_{S_6} \cos[\varphi_5(S) - (\varphi_6(S) + \varphi_{S_6})]}. \quad (6)$$

Аналитическое выражение для аналога угловой скорости НМ получим из аналога угловой скорости поворотного рычага и передаточного отношения, характеризующего соотношение угловых скоростей между поворотным рычагом и НМ:

$$\varphi'_6 = \varphi'_3 U_{63}. \quad (7)$$

В свою очередь  $U_{63}$  определяется из произведения передаточных отношений  $U_{53}(S)$  и  $U_{65}(S)$ .

Приведенная сила инерции определяется суммой выражений, представленных в левой части уравнения (4), учет каждого из которых для мобильных агрегатов указанного типа необходим:

$$m(S)\ddot{S} + \frac{1}{2}m'(S)\dot{S}^2 = F_{\text{ин}}^{\text{пр}}(S). \quad (8)$$

В частности, производная от приведенной массы по обобщенной координате определяется по выражению

$$m'(S) = 2[(m_6 I_v(S) I_v'(S) + J_6 \varphi_6'(S) \varphi_6''(S))], \quad (9)$$

где  $I_v'(S)$  - производная от  $I_v(S)$  по обобщенной координате;  $\varphi_6''(S)$  - аналог углового ускорения НМ, получаемый дифференцированием по обобщенной координате аналога ее угловой скорости.

$$\varphi_6''(S) = \varphi_3''(S)U_{63}(S) + \varphi_3'(S)[U'_{53}(S)U_{65}(S) + U_{53}(S)U'_{65}(S)], \quad (10)$$

где  $\varphi_3''(S)$  – аналог углового ускорения поворотного рычага, определяемый путем дифференцирования  $\varphi_3'(S)$  по обобщенной координате по выражению

$$\varphi_3''(S) = \frac{2[S^4 - (L_3^2 - L_0^2)^2]}{\sqrt{[4L_0^2L_3^2 - [S^2 - (L_3^2 + L_0^2)]^2]^3}}. \quad (11)$$

Инерционная нагрузка включает составляющую, выраженную изменением скорости поршня ГЦ –  $\dot{S}$  по времени, и составляющую, связанную с изменением приведенной массы  $m(S)$  в зависимости от положения механизма навески (следствие переменности передаточных отношений). Соотношение влияния этих составляющих  $k$  определяется в [4] по выражению

$$k = \frac{\frac{1}{2} \frac{dm(S)}{dS} \dot{S}^2}{m(S)\ddot{S}} = \frac{1}{2} \frac{\frac{m'(S)}{m(S)} dt}{\frac{d\lambda}{\lambda dt}} = \frac{1}{2} \frac{d \ln m(S)}{d \ln \lambda}, \text{ где } \lambda = \dot{S}. \quad (12)$$

Значение  $k$  зависит как от переменности приведенной массы  $m(S)$ , так и от переменности скорости. Поэтому небольшое изменение  $m(S)$  еще не свидетельствует о малости его влияния. При  $k \ll 1$  допустимо игнорирование влияния члена  $\frac{1}{2} \frac{dm(S)}{dS} \dot{S}^2$ , а при  $k \gg 1$  – члена  $m(S) \cdot \ddot{S}$ .

Приведенная к ГЦ нагрузка определяется по выражению

$$F_{\text{гц}}(S) = F(S) + F_{\text{ин}}^{\text{пр}}(S) + F_{\text{тр}}^{\text{пр}}(S), \quad (13)$$

где  $F(S)$  – составляющая полезной нагрузки, определяемая как произведение веса НМ на основное передаточное число механизма навески:

$$F(S) = P_6 I_{S_6}(S). \quad (14)$$

Влияние других составляющих приведенной нагрузки по отношению к полезной ее части, определяется для каждой компоненты ( $n_1$  и  $n_2$ ) отдельно и в сумме  $n$ :

$$n_1(S) = \frac{F_{ин}^{np}(S)}{F(S)} 100 \%, \quad n_2(S) = \frac{F_{тр}^{np}(S)}{F(S)} 100 \%, \quad n(S) = \frac{F_{ин}^{np}(S) + F_{тр}^{np}(S)}{F(S)} 100 \%. \quad (15)$$

Приведенная к штоку гидроцилиндра нагрузка определяет возникающее в напорной полости гидроцилиндра МН давление:

$$p_{гц}(S) = \frac{F_{гц}(S)}{F_c}, \quad (16)$$

где  $F_c$  – площадь поршня гидроцилиндра со стороны напорной магистрали.

Результаты расчета выходных параметров ПНУ по уточненным аналитическим выражениям (в том числе и грузоподъемности) для универсального энергосредства «УЭС-290/450», агрегируемого с косилкой-плющилкой ротационной КПП-9, представлены в таблице.

Выходные параметры ПНУ УЭС-290/450\*

| $S$   | $Y_{s6}(S)$ | $\varphi_6(S)$ | $\varphi'_6(S)$ | $\varphi''_6(S)$    | $I_s(S)$ | $I_v(S)$ | $I'_v(S)$ | $m(S)$             | $m'(S)$            |
|-------|-------------|----------------|-----------------|---------------------|----------|----------|-----------|--------------------|--------------------|
| [м]   | [м]         | [град]         | [1/м]           | [1/м <sup>2</sup> ] | [–]      | [–]      | [1/м]     | [кг]               | [кг/м]             |
| 0,571 | –           | –              | –               | –                   | –        | –        | –         | –                  | –                  |
| 0,596 | –           | –              | –               | –                   | –        | –        | –         | –                  | –                  |
| 0,621 | 0,605       | 90,13          | 0,632           | 1,846               | 2,805    | 2,943    | 4,343     | $3,506 \cdot 10^4$ | $1,072 \cdot 10^5$ |
| 0,646 | 0,660       | 91,07          | 0,678           | 1,909               | 2,885    | 3,043    | 3,757     | $3,757 \cdot 10^4$ | $9,745 \cdot 10^4$ |
| 0,671 | 0,715       | 92,08          | 0,728           | 2,123               | 2,952    | 3,136    | 3,785     | $4,010 \cdot 10^4$ | $1,025 \cdot 10^5$ |
| 0,696 | 0,771       | 93,16          | 0,785           | 2,441               | 3,015    | 3,234    | 4,121     | $4,277 \cdot 10^4$ | $1,162 \cdot 10^5$ |
| 0,721 | 0,827       | 94,33          | 0,851           | 2,857               | 3,079    | 3,344    | 4,663     | $4,592 \cdot 10^4$ | $1,372 \cdot 10^5$ |
| 0,746 | 0,883       | 95,60          | 0,929           | 3,384               | 3,147    | 3,469    | 5,385     | $4,969 \cdot 10^4$ | $1,658 \cdot 10^5$ |
| 0,771 | 0,940       | 97,00          | 1,022           | 4,049               | 3,222    | 3,615    | 6,303     | $5,429 \cdot 10^4$ | $2,042 \cdot 10^5$ |
| 0,796 | 0,995       | 98,54          | 1,133           | 4,896               | 3,305    | 3,786    | 7,463     | $6,001 \cdot 10^4$ | $2,559 \cdot 10^5$ |
| 0,821 | 1,051       | 100,26         | 1,268           | 5,986               | 3,401    | 3,990    | 8,944     | $6,725 \cdot 10^4$ | $3,270 \cdot 10^5$ |

Продолжение

| $S$   | $F(S)$ | $F_{ин}^{np}(S)$ | $n_1(S)$ | $F_{тр}^{np}(S)$ | $n_2(S)$ | $F_{гц}(S)$ | $n(S)$ | $p_{гц}(S)$ | $G_s(S)$ |
|-------|--------|------------------|----------|------------------|----------|-------------|--------|-------------|----------|
| [м]   | [кН]   | [Н]              | [%]      | [кН]             | [%]      | [кН]        | [%]    | [МПа]       | [кН]     |
| 0,571 | –      | –                | –        | –                | –        | –           | –      | –           | –        |
| 0,596 | –      | –                | –        | –                | –        | –           | –      | –           | –        |
| 0,621 | 109,4  | 535,82           | 0,499    | 17,88            | 16,35    | 127,80      | 16,85  | 10,045      | 70,51    |
| 0,646 | 112,5  | 487,23           | 0,442    | 16,53            | 14,69    | 129,55      | 15,13  | 10,182      | 69,02    |
| 0,671 | 115,1  | 512,36           | 0,454    | 15,59            | 13,54    | 131,26      | 14,00  | 10,316      | 67,76    |
| 0,696 | 117,6  | 581,14           | 0,504    | 14,95            | 12,72    | 133,14      | 13,22  | 10,465      | 66,53    |
| 0,721 | 120,1  | 685,82           | 0,583    | 14,54            | 12,10    | 135,33      | 12,69  | 10,636      | 65,25    |
| 0,746 | 122,7  | 829,04           | 0,689    | 14,48            | 11,80    | 138,07      | 12,49  | 10,851      | 63,82    |
| 0,771 | 125,6  | 1020,81          | 0,829    | 14,76            | 11,75    | 141,44      | 12,57  | 11,116      | 62,20    |
| 0,796 | 128,9  | 1279,36          | 1,013    | 15,18            | 11,77    | 145,38      | 12,79  | 11,426      | 60,42    |
| 0,821 | 132,6  | 1634,82          | 1,258    | 15,76            | 11,89    | 150,06      | 13,14  | 11,794      | 58,44    |

\* Начало рабочего хода поршня ГЦ навески (начало подъема КПП-9) соответствует значению обобщенной координаты  $S = 0,618$  м.

### Обсуждение результатов

Выполненный анализ функционирования ПНУ УЭС 290/450 показывает, что запас его грузоподъемности при агрегатировании УЭС с КПП-9, определенный с учетом всех потерь, составляет не менее 49,8 %. В рассматриваемой схеме МН и при заданных ее параметрах влияние приведенной силы инерции невелико и составляет не более 1,26 % от полезной нагрузки, а приведенная сила трения практически на порядок выше. Тем не менее, несмотря на хорошие показатели качества спроектированного МН, следует отметить, с одной стороны, стабилизацию приведенной силы трения на среднем уровне в 15,51 кН, а с другой – динамичный рост приведенной силы инерции (более чем в 3 раза).

### Заключение

Установленный в результате проведенного исследования уровень инерционных потерь, возникающих в процессе перевода НМ из рабочего в ее транспортное положение, позволил рассчитать запас грузоподъемности ПНУ УЭС 290/450 при его агрегатировании с КПП-9. Алгоритм решения поставленной задачи определения инерционных потерь может быть использован для тяжело нагруженных механизмов навески колесных тракторов, в том числе БЕЛАРУС модели «БЕЛАРУС 2522».

### Литература

1. Гуськов, В. В. Тракторы. Ч. III. Конструирование и расчет / В. В. Гуськов. – Мн. : Выш. шк., 1981. – С. 383.
2. Попов, В. Б. Снижение диссипативных потерь в механизмах навески мобильных энергетических средств / В. Б. Попов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2009. – № 1. – С. 41–48.
3. 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.
4. Машиностроительный гидропривод / Л. А. Кондаков [и др.] ; под ред. В. Н. Прокофьева. – М. : Машиностроение, 1978. – 495 с.

*Получено 20.09.2012 г.*