

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).

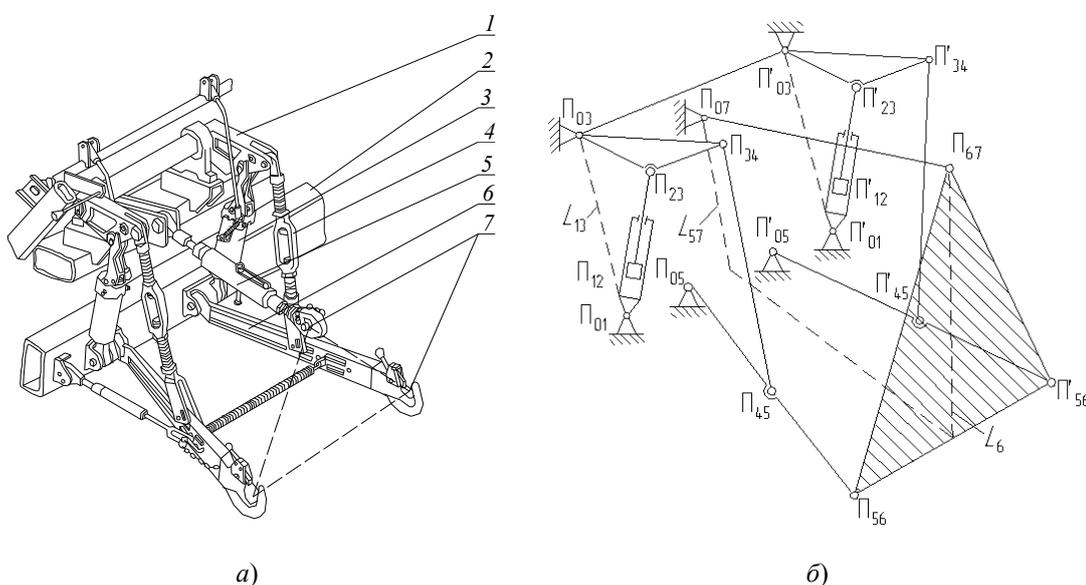


Рис. 1. Механизм навески универсального энергетического средства (а) и его структурная схема (б): 1 – рычаг поворотный; 2 – рама энергосредства; 3 – гидроцилиндр; 4 – раскос; 5 – центральная тяга; 6 – нижняя тяга; 7 – соединительный треугольник

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.

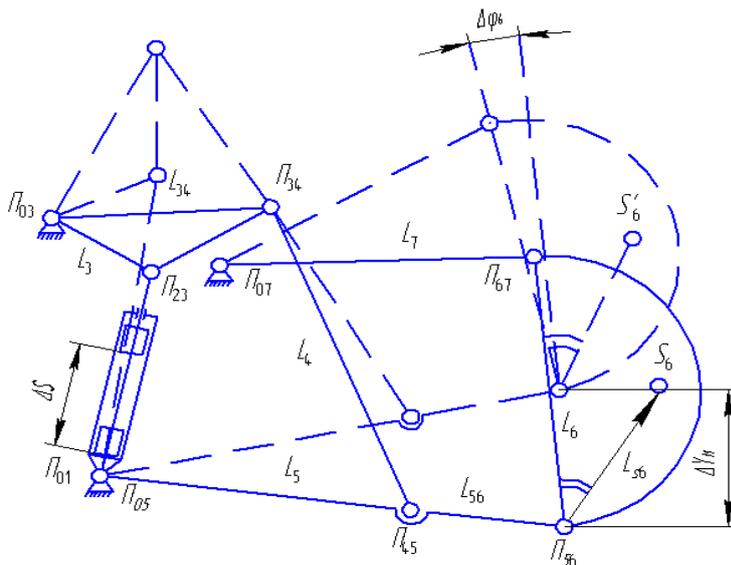


Рис. 2. Схема перевода навесной машины из рабочего в транспортное положение

Следует отметить, что в вышеприведенном аналитическом выражении потери на трение определяются по результатам испытаний и в процессе движения штока ГЦ МН (изменения обобщенной координаты ΔS) 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; $\varphi_5(S)$, $\varphi_6(S)$, φ_{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 ²] | [–] | [–] | [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.