

УДК 629.114.2-182.8

ПОДЪЕМНО-НАВЕСНЫЕ УСТРОЙСТВА УНИВЕРСАЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

В. Б. ПОПОВ

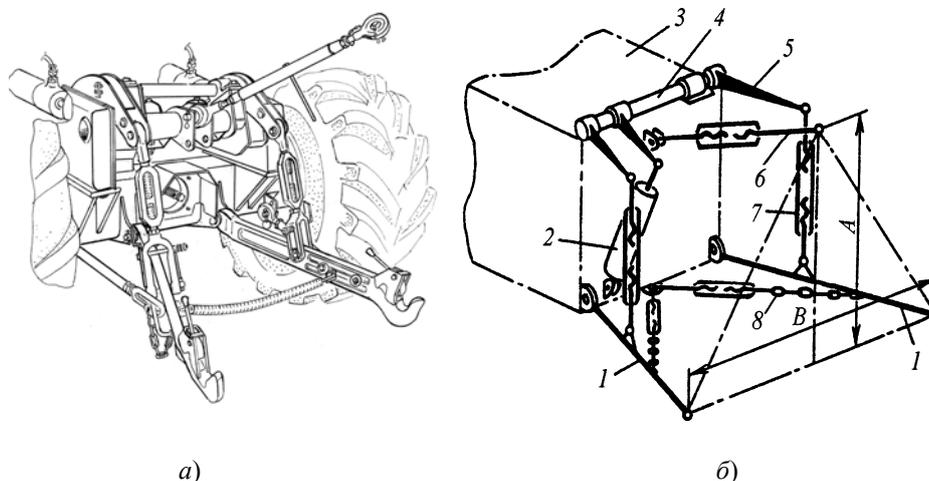
*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

С 1987 г. ОАО «Гомсельмаш» – крупный производитель сельскохозяйственной техники в Республике Беларусь часть специализированных уборочных машин заменяет комплексами, сформированными на базе универсального энергетического средства (УЭС), что технически прогрессивно и экономически целесообразно.

Агрегатирование всех УЭС с навесными машинами (НМ) осуществляется при помощи подъемно-навесных устройств (ПНУ) (рис. 1, а), состоящих из гидропривода и механизма навески (МН), определяющего характер взаимодействия базового модуля с навешиваемыми адаптерами [1].

Цель работы – проанализировать направления развития подъемно-навесных устройств УЭС разных поколений и попытаться сформировать облик ПНУ на ближайшую перспективу.



*Рис. 1. Подъемно-навесное устройство УЭС-350 «Полесье»:
а – внешний вид ПНУ; б – схема трехточечного механизма навески:
1 – нижняя тяга; 2 – гидроцилиндр; 3 – рама УЭС; 4 – вал поворотный;
5 – рычаг поворотный; 6 – верхняя тяга; 7 – раскос; 8 – стяжки;
А, В – размеры присоединительного треугольника*

Основная часть

Существуют несколько режимов работы УЭС и соответствующих режимов работы ПНУ. В данной работе коснемся трех из них – рабочего, транспортного переезда и перевода НМ из рабочего положения в транспортное. Большая часть выходных параметров функциональной математической модели (ФММ), описывающей последний режим, одновременно присутствует в расчетах выходных параметров двух

первых режимов. Поэтому в дальнейшем ограничимся знакомством с ФММ перевода НМ из рабочего положения в транспортное.

Функционирование структурной 3D-модели МН УЭС (рис. 1, б) процесса подъема довольно сложно формализовать, поэтому, как правило, используется ее плоский аналог (рис. 2, б). Однако следует отметить, что при подъеме НМ выполняет относительно энергоносителя сложное движение, что должно учитываться при выполнении динамического анализа, для которого необходимо подробное описание кинематики механизма навески ПНУ.

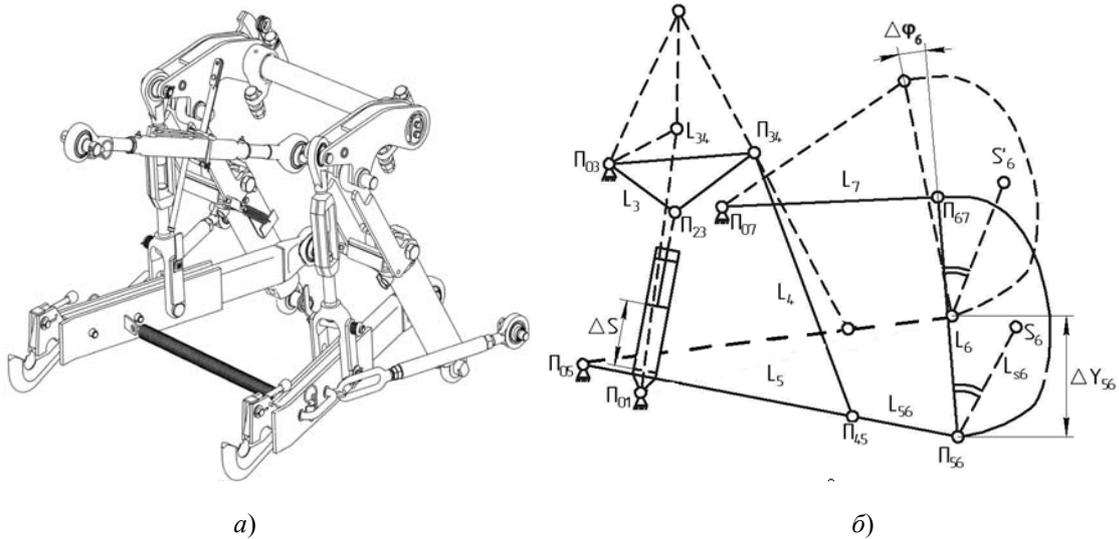


Рис. 2. Подъемно-навесное устройство УЭС:

а – заднее подъемно-навесное устройство УЭС-290/450; б – плоский аналог кинематической цепи, включающий механизм навески УЭС-290/450 и КНК-500

Выполнение расчетов по вышеупомянутой ФММ начинается с определения положения подвижных шарниров, аналогов угловых скоростей звеньев и линейных скоростей характерных точек, т. е. последовательно выполняются процедуры геометрического и кинематического анализа представленной на рис. 2, б кинематической цепи. В его основе лежит метод замкнутого векторного контура, предложенный Зиновьевым [2].

В базовой системе координат, связанной с УЭС, определяются координаты подвижных шарниров МН и характерных точек замкнутой кинематической цепи. В частности, координаты оси подвеса МН – Π_{56} определяются по выражениям:

$$X_{56}(S) = X_{05} + L_{56} \cdot \cos \varphi_5(S); \quad Y_{56}(S) = Y_{05} + L_{56} \cdot \sin \varphi_5(S), \quad (1)$$

где X_{05} , Y_{05} – координаты неподвижного шарнира Π_{05} на раме трактора; φ_i – угол, образуемый соответствующим звеном, в правой декартовой системе координат.

Координаты характерной точки – центра тяжести НМ – определяются в соответствии с выражениями:

$$X_{S6}(S) = X_{56}(S) + L_{S6} \cdot \cos[\varphi_6(S) + \varphi_{S6}]; \quad (2)$$

$$Y_{S6}(S) = Y_{56}(S) + L_{S6} \cdot \sin[\varphi_6(S) + \varphi_{S6}], \quad (3)$$

где L_{S6} и φ_{S6} – характеристики вектора, проведенного от оси подвеса в центр тяжести рабочего орудия.

Аналитические выражения (2)–(3) представляют собой функции положения центра тяжести НМ, необходимые одновременно для формирования процедур кинематического, а затем и силового анализа.

В результате кинематического анализа определяются аналитические выражения для передаточных чисел МН на оси подвеса – $I_m(S)$, для конкретной НМ – $I_{S_6}(S)$, а также аналог ее угловой скорости – $\varphi'_6(S)$:

$$I_m(S) = \varphi'_3(S) \cdot U_{53}(S) \cdot L_{56} \cdot \cos[\varphi_5(S)], \quad (4)$$

где $\varphi'_3(S)$ – аналог угловой скорости звена поворотного рычага; $U_{53}(S)$ – передаточное отношение; L_{56} , $\varphi_5(S)$ – длина нижней тяги и угол, образуемый ею в правой декартовой системе координат.

$$I_{S_6}(S) = \varphi'_3(S) \cdot U_{53}(S) \cdot \{L_{56} \cdot \cos[\varphi_5(S)] + U_{65}(S) \cdot L_{S_6} \cdot \cos[\varphi_6(S) + \varphi_{S_6}]\}, \quad (5)$$

где L_{S_6} , φ_{S_6} – вектор, равный расстоянию от оси подвеса до центра тяжести НМ, и угол между ним и НМ, представленной звеном L_6 .

$$\varphi'_6(S) = \varphi'_3(S) \cdot U_{63}(S) = \varphi'_3(S) \cdot U_{53}(S) \cdot U_{65}(S), \quad (6)$$

где $U_{65}(S)$ – передаточное отношение, характеризующее соотношение угловых скоростей звеньев L_{56} и L_6 .

Зная $I_{S_6}(S)$, можно, не выполняя силовой анализ МН, определить полезную нагрузку – $F(S)$, приведенную к рабочим гидроцилиндрам МН:

$$F(S) = P_6 \cdot I_{S_6}(S). \quad (7)$$

Результаты расчета выходных параметров ПНУ УЭС-250 (первое поколение) и УЭС-290/450 (третье поколение), агрегируемых, соответственно, с кормоуборочными комбайнами ПКК-3000 и КНК-500, выполненные при помощи ФММ, представлены на рис. 3, 4 и в табл. 1, 2.

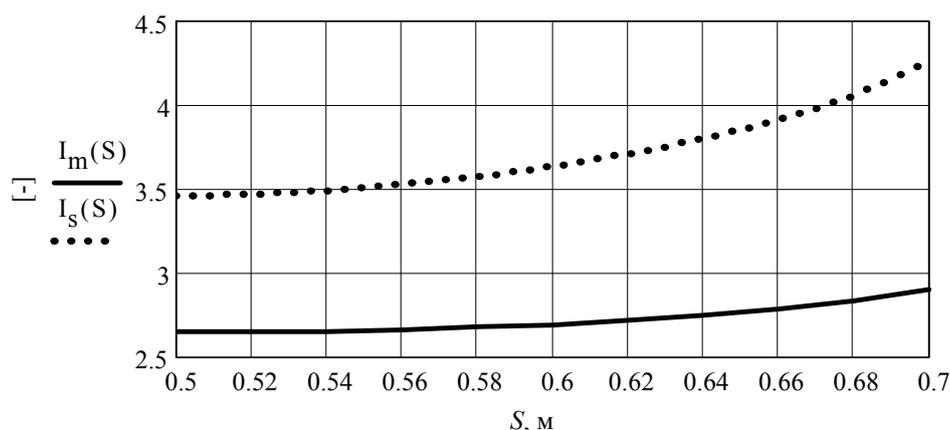


Рис. 3. Передаточные числа МН УЭС-250 на оси подвеса и в центре тяжести НМ (при агрегировании с ПКК-3000) в диапазоне изменения обобщенной координаты S

Передаточные числа МН являются одними из критериев качества ПНУ, и сравнение характера их изменения для МН УЭС-250 и УЭС-290/450, безусловно, в пользу последнего. Передаточное число на оси подвеса для МН УЭС-250 в диапазоне из-

менения обобщенной координаты плавно растет (с 2,653 до 2,903) на 9,4 % (рис. 3). В то же время соответствующее ПЧ для МН УЭС-290/450 плавно уменьшается (с 2,671 до 2,461) на 8,5 % (рис. 4). Максимальные значения ПЧ, полученные для центров тяжести НМ, близки, но в случае УЭС-290/450 характер изменения ПЧ более стабилен и разность между его максимумом и минимумом составляет не более 7,4 %, а для УЭС-250, соответственно, 22,6 %.

Еще одним из критериев качества МН и ПНУ в целом является численное значение мгновенного центра вращения навесной машины – X_p , определяемое положением внешнего четырехзвенника МН, которое в соответствии с требованиями [4] лучше при агрегатировании УЭС-290/450 с КНК-500.

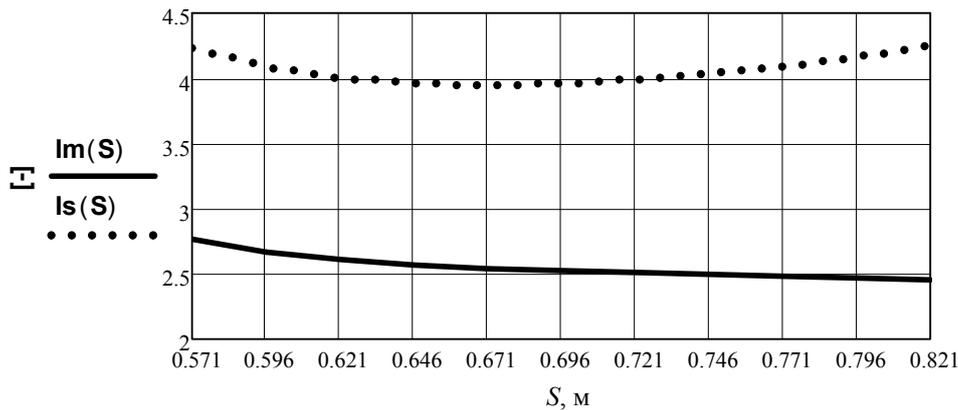


Рис. 4. Диаграммы изменения передаточных чисел УЭС-290/450

Грузоподъемность на оси подвеса МН и в центре тяжести НМ равна весу навесной машины, переводимой из рабочего в транспортное положение:

$$G_m(S) = \frac{p_{\text{гц}}^{\text{max}} F_c - [F_{\text{ин}}^{\text{пр}}(S^*) + F_{\text{тр}}^{\text{пр}}(S^*)]}{I_m(S^*)_{\text{max}}}; \quad G_{S_6}(S) = \frac{p_{\text{гц}}^{\text{max}} F_c - [F_{\text{ин}}^{\text{пр}}(S^*) + F_{\text{тр}}^{\text{пр}}(S^*)]}{I_{S_6}(S^*)_{\text{max}}}, \quad (8)$$

где $p_{\text{гц}}^{\text{max}}$ – максимальное давление в гидроцилиндре; F_c – площадь поршня гидроцилиндра; $F_{\text{ин}}^{\text{пр}}(S^*)$ – приведенная сила инерции и $F_{\text{тр}}^{\text{пр}}(S^*)$ – приведенная сила трения, определенные для значения обобщенной координаты S^* , соответствующей максимуму передаточных чисел – $I_m(S)$, $I_{S_6}(S)$.

Грузоподъемность – это обобщенный критерий качества ПНУ, зависящий от параметров гидропривода, механизма навески и массово-геометрических характеристик НМ.

Практика проектирования УЭС показывает, что вес навесной техники и удаление ее центра тяжести от оси подвеса МН имеют тенденцию к росту, а заданная траектория подъема НМ может быть воспроизведена, если только обеспечена достаточная грузоподъемность ПНУ.

Как следует из табл. 1 и 2, грузоподъемность ПНУ на оси подвеса для УЭС-250 и УЭС-290/450 выросла, соответственно, с 41,56 до 80,27 кН. Это следует из выражения (8) и объясняется ростом максимально возможного давления и диаметром поршня гидроцилиндра, с одной стороны, и уменьшением максимума $I_m(S)$, с другой. Что касается грузоподъемности, связанной с подъемом ПКК-3000 и КНК-500, то в обоих случаях она на пределе: для ПКК-3000 весом в 28 кН она составляет 28,35 кН; для КНК-500 весом в 48 кН она составляет 49,39 кН.

Таблица 1

Выходные параметры ПНУ УЭС-250

Геометрические параметры				Кинематические параметры			Силовые параметры			
$S, м$	$Y_{56}(S), м$	$X_P(S), м$	$\Phi_6(S), град$	$\Phi_3'(S), 1/м$	$U_{63}(S), -^{**}$	$\Phi_6'(S), 1/м$	$G_m(S), кН$	$G_{S6}(S), кН$	$F_{np}(S), кН$	$p_2(S), МПа$
0,50	—	—*	—	—	—	—	—	—	—	—
0,52	0,354	-2,290	89,195	4,734	0,167	0,791	45,473	34,778	97,13	12,077
0,54	0,407	-2,141	90,112	4,717	0,172	0,810	45,430	34,565	97,73	12,151
0,56	0,460	-2,039	91,056	4,743	0,177	0,837	45,282	34,222	98,70	12,273
0,58	0,513	-1,924	92,034	4,807	0,181	0,872	45,049	33,767	100,04	12,438
0,60	0,567	-1,798	93,058	4,912	0,186	0,915	44,739	33,203	101,73	12,649
0,62	0,621	-1,661	94,136	5,062	0,191	0,969	44,353	32,531	103,83	12,911
0,64	0,676	-1,516	95,282	5,266	0,196	1,034	43,879	31,739	106,43	13,233
0,66	0,731	-1,364	96,513	5,538	0,201	1,116	43,292	30,807	109,65	13,633
0,68	0,787	-1,205	97,848	5,904	0,206	1,218	42,547	29,698	113,74	14,142
0,70	0,845	-1,040	99,316	6,411	0,211	1,352	41,559	28,352	119,14	14,814

*Подсоединение полунавесного кормоуборочного комбайна ПКК-3000 выполняется, когда высота оси подвеса (Y_{56}) составляет 0,4 м.

**Безразмерная величина.

Таблица 2

Выходные параметры ПНУ УЭС-290/450

Геометрические параметры				Кинематические параметры			Силовые параметры			
$S, м$	$Y_{56}(S), м$	$X_P(S), м$	$\Phi_6(S), град$	$\Phi_3'(S), 1/м$	$U_{63}(S), -^{**}$	$\Phi_6'(S), 1/м$	$G_m(S), кН$	$G_{S6}(S), кН$	$F(S), кН$	$p_2(S), МПа$
0,571	—	—*	—	—	—	—	—	—	—	—
0,596	0,297	-1,253	89,184	4,844	0,233	1,129	78,451	51,271	196,11	17,770
0,621	0,363	-1,208	90,791	4,425	0,252	1,117	80,268	52,339	192,10	17,407
0,646	0,428	-1,148	92,394	4,175	0,269	1,124	81,514	52,879	190,14	17,229
0,671	0,492	-1,075	94,017	4,023	0,285	1,145	82,397	53,038	189,57	17,178
0,696	0,555	-0,992	95,68	3,935	0,301	1,179	83,047	52,907	190,04	17,220
0,721	0,618	-0,899	97,401	3,896	0,315	1,226	83,553	52,545	191,35	17,339
0,746	0,68	-0,799	99,198	3,896	0,330	1,286	83,978	51,992	193,38	17,523
0,771	0,743	-0,694	101,09	3,932	0,346	1,36	84,365	51,273	196,09	17,769
0,796	0,804	-0,585	103,10	4,003	0,363	1,451	84,747	50,403	199,48	18,076
0,821	0,866	-0,473	105,26	4,112	0,380	1,563	85,145	49,391	203,56	18,446

*Подсоединение навесного кормоуборочного комбайна КНК-500 выполняется, когда высота оси подвеса (Y_{56}) составляет 0,33 м.

**Безразмерная величина.

Одним из способов обеспечения требуемого запаса грузоподъемности ПНУ является снижение потерь энергии на трение как в гидроприводе, так и в шарнирах МН, которое в среднем составляет 16–21 % от величины ее полезных затрат, а также приведенной силы инерции.

Приведенная к штоку ГЦ сила инерции может быть определена по выражению

$$F_{\text{ин}}^{\text{пр}}(S) = m_6 \cdot a_{S6}(S) \cdot I_{S6}(S) + J_6 \cdot \varepsilon_6(S) \cdot \varphi'_6(S), \quad (9)$$

где $a_{S6}(S)$, $\varepsilon_6(S)$ – соответственно, линейное и угловое ускорение НМ; m_6 , J_6 – соответственно, масса и момент инерции НМ.

Силовой анализ МН выполняется по группам Ассур по известной методике, причем определенная в результате реакция в кинематической паре $\Pi_{23} - R_{23}(S)$ равна полезной нагрузке – $F(S)$ на штоке поршня гидроцилиндра.

Приведенная сила трения определяется по результатам кинематического и силового анализа:

$$F_{\text{тр}}^{\text{пр}}(S) = F_{\text{тр.ц}} + r f_{\text{тр}} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^7 R_{0i}(S) \cdot \varphi'_i(S) + \sum R_{ij}(S) \cdot [\varphi'_i(S) \pm \varphi'_{i+1}(S)] \right\}, \quad (10)$$

где r – радиус шарниров; $f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения; $R_{0i}(S)$, $R_{ij}(S)$ – силы реакций, соответственно, в неподвижных и подвижных шарнирах МН; φ'_i , φ'_{i+1} – аналоги угловых скоростей звеньев МН; $F_{\text{тр.ц}}$ – сила трения манжеты ГЦ.

Рост энергонасыщенности УЭС и появление в шлейфе НМ тяжелых адаптеров – навесных кормо-, свекло- и зерноуборочных машин весом от 34 до 48 кН внесли изменения в характер их агрегатирования с УЭС. Поэтому возросли требования к грузоподъемности как переднего, так и заднего ПНУ, к возможностям их ГП и МН. Количественно и качественно расширение шлейфа агрегируемых машин и задач, решаемых УЭС, отразилось на структуре и параметрах их ПНУ (табл. 3).

Таблица 3

Структура и параметры ПНУ для разных типов УЭС

Тип УЭС	Эксплуатационный вес УЭС, кН	Мощность двигателя, л. с.	Тип гидронасоса	Гидроцилиндр с односторонним штоком			Гидрошлангов-аккумулятор, количество	Давление предохранительного клапана, МПа	Вес балласта, кН	Грузоподъемность ПНУ на оси подвеса G_m , кН	
				Количество	Диаметр ГЦ, мм	Ход поршня ΔS , мм				Задний МН	Передний МН
УЭС-250	78	250	НШ-32	2	80	200	–	16	4,88	45	12
УЭС-2-250А	82	270	НШ-32	2	90	250	2	18	5,36	52/70*	20
УЭС-2-280А	88	290	НШ-32	2	90	250	2	18	5,36	52/70	20
УЭС-350	106	290	НШ-32	2	90	250	–	16	10,8	52/70	20
УЭС-290/450	138	350	АП**	2	90	250	2	20	14	85	40

* Грузоподъемность зерноуборочного варианта ПНУ для зерноуборочной приставки в составе комплекса зерноуборочного роторного (КЗР-10).

** Аксиально-поршневой насос с переменной подачей (0–90 л/мин).

Одним из недостатков работы мобильных сельскохозяйственных агрегатов (МСХА), сформированных на базе мобильных энергосредств, являются неудовлетворительные сцепные свойства ходовой системы, особенно при выполнении тяговых операций. Это явление обусловлено передачей реакции почвы с рабочих органов и веса навесной машины через механизм навески на корпус и ходовую систему энергосредства. При этом одновременно уменьшается нормальная реакция почвы на его передние колеса с ухудшением их сцепных свойств, а значит, и управляемости МСХА. Применение в качестве гидроусилителя сцепного веса (ГСВ) гидропневмоаккумулятора (ГПА) позволило создать дополнительную нормальную нагрузку на задние колеса УЭС, что и определяет эффективность работы ГСВ.

Задние ПНУ серийных УЭС могут работать в режиме гидроувеличения сцепного веса – при агрегатировании с комбайном КСН-6-2, зерноуборочным комплексом КЗР-10 или в плавающем режиме – при агрегатировании с комбайном КПК-3000 и косилкой КПН-6-Ф. Режимы ГСВ и пневмовывешивания адаптеров обеспечивают ГПА, подключенные к гидросхеме ПНУ.

Для улучшения управляемости УЭС разных типов в передней части их рам устанавливают грузы-противовесы – балласт (рис. 5). Вес и координаты балласта определяются в конкретном случае характеристиками НМ и условиями режима эксплуатации МСХА. Так, при агрегатировании с комбайном КНК-500 на переднем МН УЭС-290/450 монтируется балласт весом в 14 кН.

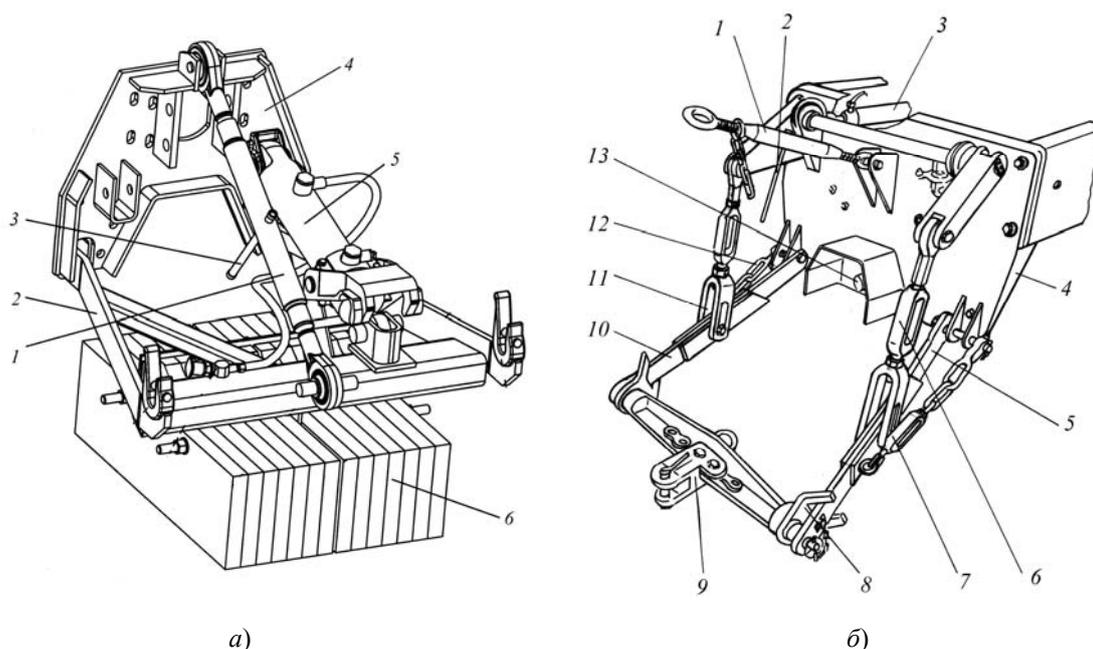


Рис. 5. Передние подъемно-навесные устройства:

- а – УЭС-2-250А: 1 – верхняя тяга; 2 – рычаги нижние; 3 – рукоятка; 4 – плита;
- 5 – гидроцилиндр; 6 – блок грузов противовесов; б – УЭС-290/450: 1 – верхняя тяга;
- 2 – рукоятка; 3 – гидроцилиндр; 4 – плита; 5, 10 – нижние рычаги; 6, 11 – раскосы;
- 7, 12 – стяжки; 8 – поперечина; 9 – вилка; 13 – ВОМ

Снижение уровня колебаний давления и расхода рабочей жидкости в ГП ПНУ во время переходных процессов может быть достигнуто регулированием скорости поршней гидроцилиндров в зависимости от нагрузки со стороны МН, что обеспечивается применением «чувствительного к нагрузке» (LS – *Load Sensing*) гидропривода. Например, в аксиально-поршневых насосах Bosch-Rexroth A4VSO с LS-регулятором (рис. 5) используется цилиндр, изменяющий наклон шайбы и регулирующий рас-

ход рабочей жидкости. Регулируемый ход и нагрузка возвратной пружины позволяет LS-регулятору работать в большом диапазоне давлений и изменять объемный расход насоса.

Подъем навесной техники, как правило, сопровождается колебаниями давления и потока рабочей жидкости в ГП ПНУ, возникающими из-за собственных колебаний нагруженных поршней гидроцилиндров [5]. При использовании насосов с регулируемой производительностью характер колебаний изменяется, улучшая показатели качества переходных процессов.

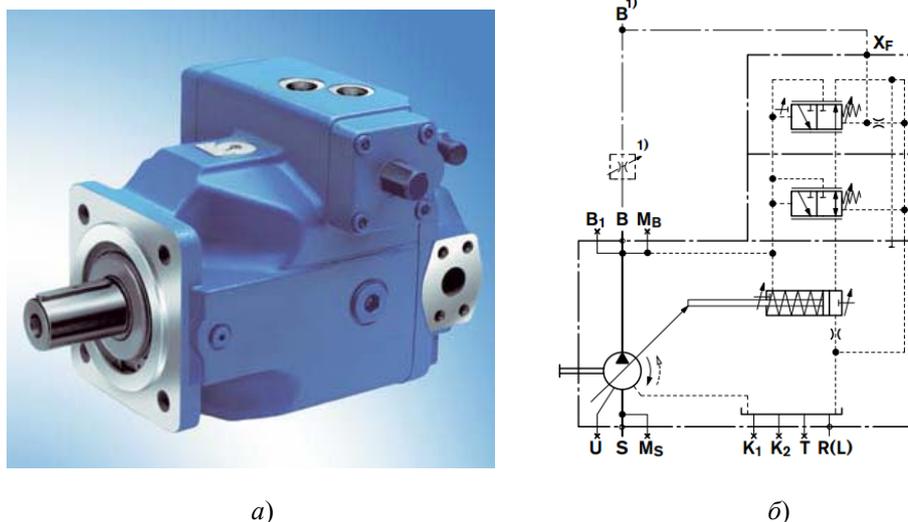


Рис. 5. Насос с LS-регулятором фирмы Bosch-Rexroth:
а – общий вид; б – принципиальная схема

Заключение

Проведенное исследование разработок ПНУ, охватывающее три поколения УЭС, и сравнение их выходных параметров позволяет экстраполировать достигнутое в энергетическом аспекте агрегатирования навесной техники с другими моделями УЭС, имеющими идентичные по структуре ПНУ.

Вес НМ и удаление ее центра тяжести от оси подвеса МН имеют тенденцию к росту, а заданная траектория подъема НМ может быть воспроизведена, если обеспечена достаточная грузоподъемность ПНУ, которая может быть обеспечена на основе адекватных ФММ.

Передаточное число МН УЭС, связанное с конкретной навесной машиной, изменяется по мере ее подъема, а его максимум ограничивает вес НМ, который можно перевести при помощи ПНУ в транспортное положение.

Следует также отметить использование ГПА, обеспечивающих щадящее воздействие адаптеров на опорную поверхность и насосов с регулируемой производительностью, повышающих показатели качества переходных процессов и улучшающих характеристики как ПНУ, так и МСХА в целом.

Поиск и учет резервов грузоподъемности ПНУ, перераспределение нагрузки со стороны МСХА по осям колес, снижение уровня и продолжительности гидромеханических колебаний в ПНУ и УЭС должно вестись с учетом соответствующих критериев качества и продолжаться при помощи методики параметрической оптимизации ПНУ [6].

Подъемно-навесные устройства современных мобильных энергетических средств должны иметь рекомендации для возможности гибкой переналадки их ком-

понт или автоматической регулировки отдельных звеньев механизма навески [7] и параметров гидропривода для надежной и экономичной работы в различных режимах и условиях эксплуатации МСХА.

Литература

1. Попов, В. Б. Анализ агрегатирования универсального энергетического средства УЭС 290/450 «Полесье» с навесным кормоуборочным комбайном КНК-500 / В. Б. Попов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2012. – № 4. – С. 29–36.
2. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин / И. И. Артоболевский. – М. : Машиностроение, 1988. – 640 с.
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. Устройство навесное заднее сельскохозяйственных тракторов классов 0,6–8. Типы, основные параметры и размеры : ГОСТ 10677–2001. – Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2002. – 8 с.
5. Усс, И. Н. Мониторинг технического состояния приводных систем тракторов «Беларус» / И. Н. Усс, В. Л. Басинюк, Е. И. Мардосевич. – Гомель : Ин-т механики металлополимер. систем НАН Беларуси, 2008. – 278 с. : ил.
6. Попов, В. Б. Совершенствование методики проектирования подъемно-навесных устройств универсальных энергетических средств / В. Б. Попов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2014. – № 4. – С. 29–36.
7. Навесное устройство мобильного энергетического средства : пат. 7496 Респ. Беларусь, МПК А 01 В 59/06 / В. Б. Попов ; заявитель Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – № U2101085 ; заявл. 31.12.2010 ; опубл. 2011 // Офиц. бюл. / Нац. центр интелект. собственности. – 2011. – № 4. – С. 154.

Получено 03.11.2015 г.