

УДК 629.114.2-182.8

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПОДЪЕМНО-НАВЕСНОГО УСТРОЙСТВА УНИВЕРСАЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СРЕДСТВА УЭС 290/450 «ПОЛЕСЬЕ», АГРЕГАТИРУЕМОГО С НАВЕСНЫМ КОРМОУБОРОЧНЫМ КОМБАЙНОМ КНК-500

**В. Б. ПОПОВ**

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

### Введение

Расширение области использования и повышение энергонасыщенности серийно выпускаемых ПО «Гомсельмаш» универсальных энергетических средств (УЭС-2-280А), включающее работу в агрегате с навесными кормоуборочными комбайнами (КНК), потребовало разработки УЭС 290/450 «ПОЛЕСЬЕ». УЭС снабжено подъемно-навесными устройствами (ПНУ), предназначенными для связи с навесной машиной или рабочим орудием. Анализ возможности перевода КНК-500 в транспортное положение [1], оцениваемое грузоподъемностью ПНУ УЭС 290/450, показал, что запас грузоподъемности ПНУ составляет 0,77 % от веса КНК-500 [1].

Цель работы – разработка методики расчета и выбора оптимальных внутренних параметров заднего подъемно-навесного устройства (рис. 1, а) УЭС 290/450, агрегируемого с навесным кормоуборочным комбайном КНК-500, обеспечивающих улучшение выходных параметров ПНУ.

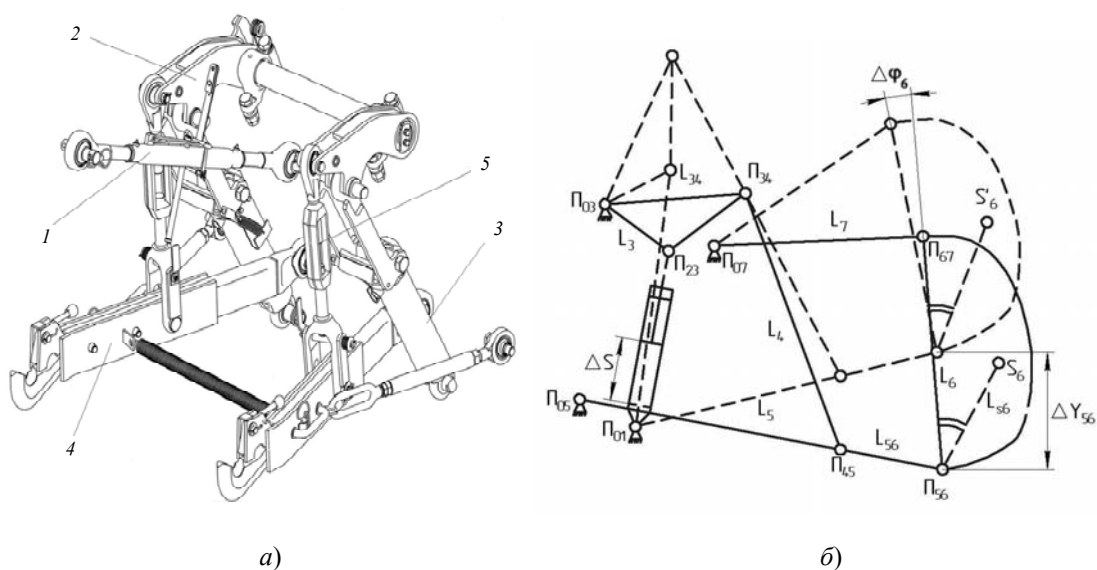


Рис. 1. Заднее подъемно-навесное устройство (а) и плоский аналог его механизма навески (б) в рабочем и транспортном положениях:

1 – тяга верхняя; 2 – рычаг поворотный; 3 – гидроцилиндр;  
4 – тяга нижняя; 5 – раскос

### Постановка задачи

Подъемно-навесное устройство состоит из гидропривода (ГП) и механизма навески (МН) – основного компонента ПНУ (рис. 1, а), закрепленного на раме УЭС-290/450 и определяющего характер взаимодействия УЭС с КНК-500. Тяги МН связаны с КНК-500 через присоединительный треугольник, образуемый шарнирами верхней и нижних тяг МН.

В замкнутой кинематической цепи (рис. 1, б), состоящей из рамы УЭС, гидроцилиндра, звеньев МН и навесной машины, ход поршня ( $\Delta S$ ) принимается за изменение обобщенной координаты, а изменение положения центра тяжести КНК-500 ( $S_6$ ) – за изменение выходной координаты.

В качестве управляемых параметров, определяющих конструктивный вариант ПНУ, предлагаются: расположенные на раме УЭС координаты центров шарниров основания гидроцилиндра и поворотного рычага –  $X_{01}, Y_{01}, X_{03}, Y_{03}$ , верхней и нижних тяг –  $X_{07}, Y_{07}, X_{05}, Y_{05}$ , а также длины звеньев поворотного рычага и части нижней тяги –  $L_3, L_{34}, L_5$  (рис. 1, б).

Каждому фиксированному набору вектора управляемых параметров задачи оптимизации  $\vec{X} = \{X_{01}, Y_{01}, X_{03}, Y_{03}, X_{05}, Y_{05}, X_{07}, Y_{07}, L_3, L_{34}, L_5\}$  соответствуют определенные значения вектора критериев оптимальности  $Y_i(X)$ :

$$\vec{Y} = \{I_m^{\max}, \bar{I}_m I_S^{\max}, \bar{I}_S, \bar{R}_{07}, R_{07}^{\max}, \bar{R}_{03}, R_{03}^{\max}\}, \quad (1)$$

где  $\bar{I}_m, I_m^{\max}$  – среднее и максимальные значения передаточного числа МН [2] на оси его подвеса (рис. 1, б – П<sub>56</sub>);  $\bar{I}_S, I_S^{\max}$  – среднее и максимальные значения передаточного числа МН, соответствующие расположению центра тяжести навесной машины (КНК-500);  $\bar{R}_{07}, \bar{R}_{03}$  – средние значения сил реакции в шарнирах оснований центральной тяги и поворотного рычага;  $R_{07}^{\max}, R_{03}^{\max}$  – максимальные значения сил реакции в шарнирах оснований центральной тяги и поворотного рычага. Все критерии определяются на интервале изменения обобщенной координаты  $S$ .

Для всех перечисленных критериев поиск экстремума (минимума) выполнялся по методу Монте-Карло, с выбором начальной точки  $\vec{X}^0$ , представляющей набор исходных данных и характеризующих базовый вариант ПНУ. Последовательно, с помощью датчика случайных чисел с повышенной равномерностью, построенного на основе ЛП<sub>т</sub>-последовательности [3], выбирались  $N$  пробных точек –  $X_1, X_2, \dots, X_N$ , расположенных равномерно в области поиска, ограниченной параметрическими ограничениями. Координаты каждой точки определялись по формуле

$$x_{ij} = x_{i \min} + \xi_{ij}(x_{i \max} - x_{i \min}), \quad i = 1 \dots n, \quad j = 1 \dots N, \quad (2)$$

где  $n$  – число параметров;  $\xi_{ij}$  – случайное число в диапазоне [0,1];  $N$  – число испытаний;  $x_{i \min}/x_{i \max}$  – минимальные/максимальные значения варьируемых параметров.

Искомые значения оптимизируемых параметров должны удовлетворять ряду ограничений, которые делятся на прямые и функциональные [3]. Прямые ограничения касаются предельных значений управляемых параметров  $\vec{X}_{\min} \leq \vec{X} \leq \vec{X}_{\max}$ , в решаемой задаче их варьирование выполнялось в диапазоне  $\pm 5\%$  от их номинального значения.

К функциональным ограничениям были отнесены: ход оси подвеса –  $\Delta Y_{56}(S)$  (рис. 1, б), угол наклона высоты присоединительного треугольника –  $\Delta \varphi_6(S)$  и координата мгновенного полюса вращения навесной машины –  $X_p$  [4]:

$$\Delta Y_{56}(S) = Y_{56}(S_{\max}) - Y_{56}(S_{\text{раб}}) \geq \Delta Y_{56}^{\text{доп}}(S); \quad (3)$$

$$\Delta \varphi_6(S) = \varphi_6(S_{\max}) - \varphi_6(S_{\text{раб}}) \leq \varphi_6^{\text{доп}}(S); \quad (4)$$

$$X_P = \frac{(y_{56}(S)x_{05} - y_{05}x_{56}(S))(x_{07} - x_{67}(S)) - (x_{05} - x_{56}(S))(y_{67}(S)x_{07} - y_{07}x_{67}(S))}{(y_{07} - y_{67}(S))(x_{05} - x_{56}(S)) - (x_{07} - x_{67}(S))(y_{05} - y_{56}(S))} \leq X_P^{\text{доп}}, \quad (5)$$

где  $S_{\text{раб}}$ ,  $S_{\max}$  – значение обобщенной координаты, соответствующее рабочему и транспортному положению оси подвеса МН;  $x_{0i}$ ,  $y_{0i}$  – координаты центров неподвижных шарниров МН;  $x_{ij}(S)$ ,  $y_{ij}(S)$  – координаты центров подвижных шарниров МН.

Общим функциональным ограничением для большинства синтезируемых механизмов является соблюдение правила «существования треугольников» (одна сторона треугольника всегда меньше двух других), формирующихся из четырехзвенников замкнутой кинематической цепи.

К функциональным ограничениям, кроме того, был отнесен максимально допустимый вес КНК-500, влияющий на управляемость мобильного сельскохозяйственного агрегата. В практике эксплуатации мобильных сельскохозяйственных агрегатов, сформированных на базе УЭС принято, что для управления его движением нагрузка, приходящаяся на мост управляемых колес, должна составлять не менее 16 % от веса всего агрегата.

В этом случае условие управляемости мобильного сельскохозяйственного агрегата [5], ограничивающее вес КНК-500, переводимого в транспортное положение, имеет вид:

$$P_6 = \frac{P_{\text{УЭС}}(b - 0,16L) + P_{\text{гр}}(0,84L + a)}{X_{S_6}^{\max} + 0,16L} \leq P_6^{\text{доп}}, \quad (6)$$

где  $P_{\text{УЭС}}$  – вес УЭС 290/450;  $P_6$  – вес навесной машины;  $P_{\text{гр}}$  – вес грузов (противовеса);  $L$  – база УЭС;  $b$  – расстояние по горизонтали от центра тяжести УЭС до оси моста ведущих колес;  $a$  – расстояние по горизонтали от центра тяжести грузов до оси моста управляемых колес;  $X_{S_6}^{\max}$  – максимальное удаление центра тяжести навесной машины от оси моста ведущих колес.

Допустимые значения вышеупомянутых функциональных ограничений:  $\Delta Y_{56}^{\text{доп}}(S)$ ,  $\Delta \varphi_6^{\text{доп}}(S)$  и т. д., были рассчитаны по исходным данным для базового варианта ПНУ УЭС-290/450, агрегируемого с КНК-500.

Алгоритм многокритериальной оптимизации был реализован в форме диалога между пользователем и ПЭВМ (рис. 2). Для каждой из точек (2) проверялись функциональные ограничения и вычислялись значения критериев оптимальности. В случае невыполнения хотя бы одного из функциональных ограничений данная точка отмечалась как неактивная и в поиске окончательного решения не участвовала.

Далее по каждому критерию составлялась таблица испытаний, в которой значения  $Y_1(x_1), \dots, Y_k(x_N)$  располагались в порядке возрастания с указанием номеров соответствующих  $N$  пробных точек (своих для каждого  $Y_k$ ). Построение упорядоченных таблиц испытаний по каждому критерию выполнялось автоматически на основании информации о типе каждого критерия. При этом конечная таблица содержит допустимое множество упорядоченных по каждому из критериев оптимальности испытаний, причем лучшее по данному критерию испытание располагается сверху таблицы, а худшее – внизу. На основе полученного допустимого множества программный

комплекс *Opt* определяет паретовское множество неулучшаемых вариантов [3]. Критериальные ограничения назначались для ввода номера граничных по каждому из критериев опытов. Граничной точкой считалась та, в которой критерий принял предельное (минимальное) значение. В программе построение паретовского множества происходит автоматически. Сначала определяются все точки, удовлетворяющие всем критериальным ограничениям. При этом возможна ситуация, что в силу назначения проектировщиком жестких критериальных ограничений такие точки не обнаружатся. В этом случае необходимо вернуться назад, изменить исходные данные и решить задачу повторно. Паретооптимальные варианты остаются проектировщику для анализа и выбора окончательного решения.

С целью выбора окончательного варианта решения многокритериальной задачи [6] в программном комплексе *Opt* реализована возможность учета мнения проектировщика для построения аддитивного критерия с использованием функции полезности и следующие формальные методы:

- поиск точки с максимальной мощностью, оцениваемой количеством вариантов, худших по отношению к рассматриваемому одновременно по всем критериям;
- метод бинарных отношений между паретовскими решениями;
- поиск точки, ближайшей к идеальной;
- метод главного критерия.

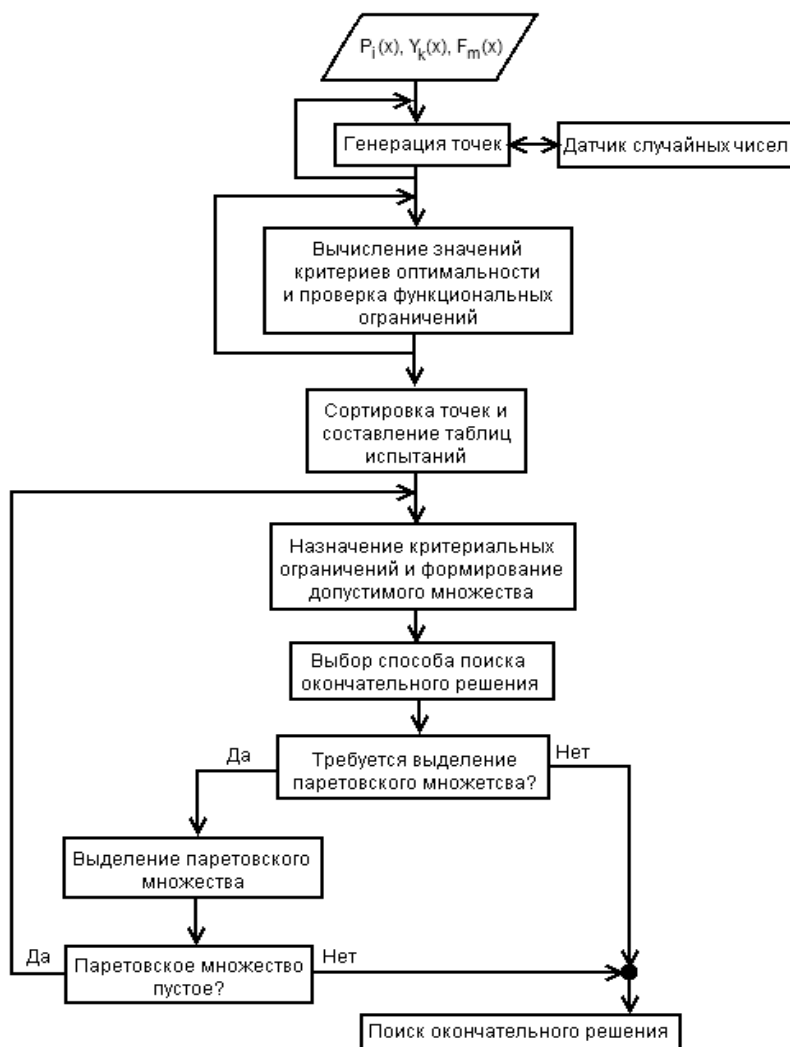


Рис. 2. Схема алгоритма диалогового метода многокритериальной оптимизации

Наилучшие результаты проведенного вычислительного эксперимента представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты поиска окончательного решения

Метод поиска окончательного решения	Номер лучшей точки	$\bar{I}_s$ , [-]	$I_s^{\max}$ , [-]	$\bar{R}_{03}$ , [кН]	$R_{03}^{\max}$ , [кН]	$\bar{R}_{07}$ , [кН]	$R_{07}^{\max}$ , [кН]
Поиск точки, ближайшей к идеальной	125	3,344	3,659	219,558	229,558	86,274	88,249
Бинарных отношений	125	3,344	3,659	219,558	229,558	86,274	88,249
Поиск точки с макс. мощностью	144	3,811	4,219	214,372	223,504	86,153	88,125
Аддитивного критерия	125	3,344	3,659	219,558	229,558	86,274	88,249
Минимакс	125	3,344	3,659	219,558	229,558	86,274	88,249
Главного критерия	111	3,523	3,987	217,178	227,512	88,486	89,187
Последовательных уступок	125	3,344	3,659	219,558	229,558	86,274	88,249

Результаты расчета выходных параметров модернизированного ПНУ

Результаты многокритериальной оптимизации позволяют сделать следующие выводы: наилучший результат в процессе вычислительного эксперимента при использовании метода исследования пространства внутренних параметров [2] и различных схем компромисса был установлен под номером 125, имеющий улучшение показателей как по большинству (5 из 7) критериев оптимальности, так и по другим выходным параметрам.

Результаты расчета выходных параметров оптимизированного ПНУ УЭС 290/450, агрегируемого с КНК-500, представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Выходные параметры модернизированного МН заднего ПНУ

Геометрические параметры					Кинематические параметры				
$S$	$Y_{S6}(S)$	$X_{S6}(S)$	$Y_{S6}(S)$	$\phi_6(S)$	$\phi_3'(S)$	$U_{53}(S)$	$\phi_6'(S)$	$I_m(S)$	$I_S(S)$
[м]	[м]	[м]	[м]	[град]	[1/м]	[-]**	[1/м]	[-]	[-]
0,571	-	-*	-*	-	-	-	-	-	-
0,596	0,292	2,360	0,532	89,145	7,658	0,293	0,653	2,138	2,956
0,621	0,348	2,368	0,610	90,139	5,813	0,412	0,721	2,316	3,215
0,646	0,407	2,373	0,691	91,194	5,030	0,478	0,751	2,351	3,284
0,671	0,465	2,374	0,774	92,291	4,604	0,520	0,780	2,357	3,322
0,696	0,524	2,370	0,857	93,431	4,350	0,549	0,813	2,357	3,358
0,721	0,583	2,363	0,942	94,623	4,198	0,569	0,853	2,355	3,399
0,746	0,642	2,350	1,027	95,880	4,114	0,582	0,902	2,352	3,448
0,771	0,701	2,330	1,114	97,213	4,083	0,590	0,961	2,348	3,507
0,796	0,760	2,301	1,203	98,639	4,095	0,594	1,032	2,343	3,577
0,821	0,818	2,284	1,293	100,177	4,148	0,594	1,118	2,337	3,659

\*Подсоединение навесного кормоуборочного комбайна КНК-500 выполняется, когда высота оси подвеса ( $Y_{S6}$ ) составляет 0,33 м.

\*\*Безразмерная величина.

Силовые параметры модернизированного ПНУ

$S$	$G_m(S)$	$G_{S6}(S)$	$R_{03}(S)$	$R_{05}(S)$	$R_{07}(S)$	$F_{np}(S)$	$p_2(S)$
[м]	[кН]	[кН]	[кН]	[кН]	[кН]	[кН]	[МПа]
0,571	–	–	–	–	–	–	–
0,596	98,06	70,93	213,69	97,82	85,90	166,93	12,86
0,621	90,54	65,22	220,21	89,66	85,56	181,56	13,98
0,646	89,20	63,84	219,89	84,22	85,38	185,46	14,29
0,671	88,94	63,11	219,19	80,09	85,36	187,61	14,45
0,696	88,95	62,44	219,06	76,74	85,50	189,62	14,61
0,721	88,04	61,69	219,67	73,88	85,79	191,94	14,78
0,746	89,17	60,81	221,01	71,35	86,21	194,71	15,00
0,771	89,31	59,79	223,10	69,04	86,77	198,03	15,25
0,796	89,49	58,63	225,98	66,86	87,45	201,97	15,56
0,821	89,72	57,30	229,56	64,76	88,25	206,64	15,92

Результаты сравнения выходных параметров (в том числе критериев оптимальности) базового и оптимизированного варианта ПНУ УЭС 290/450, агрегируемого с КНК-500, приведены ниже на рис. 3–7 и в табл. 4.

Оптимальный вариант МН (рис. 3) характеризуется, с одной стороны, большей стабильностью передаточного числа МН на оси подвеса, а с другой, тем, что максимальное значение передаточного числа у оптимального варианта на 5 % ниже, чем у базового. Параметрическая оптимизация способствует росту грузоподъемности ПНУ на оси подвеса.

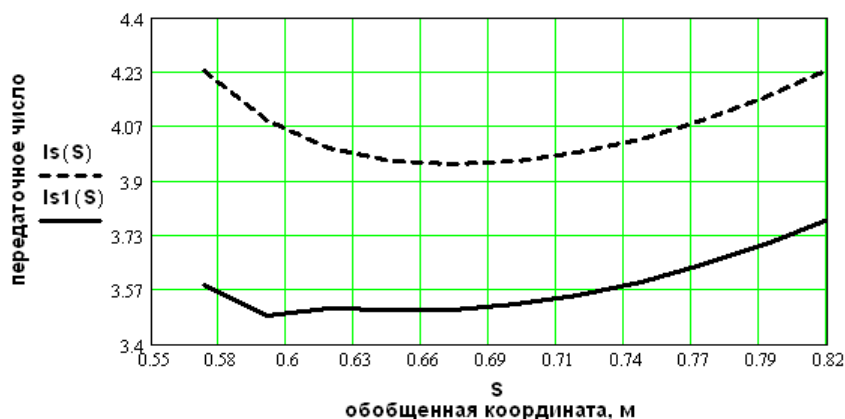


Рис. 3. Основное передаточное число МН

Передаточное число МН, характеризующее кинематическую связь между механизмом навески заднего ПНУ УЭС 290/450 и навесным кормоуборочным комбайном КНК-500, у оптимального варианта МН на 27,6–13,7 % ниже, чем у базового. При этом базовый вариант был получен в результате проработки геометрии и кинематики МН, выполненных опытным инженером, тем не менее параметрическая оптимизация позволила его уменьшить.

Грузоподъемность на оси подвеса (рис. 4) у оптимального варианта МН на 5,3 % выше (табл. 4), чем у базового, и составляет 88,04 кН. Кроме того, в момент начала подъема навесной машины она еще выше (98,08 кН), что может быть существенно для преодоления влияния сил трения покоя в кинематических парах (шарнирах) звеньев МН УЭС 290/450.

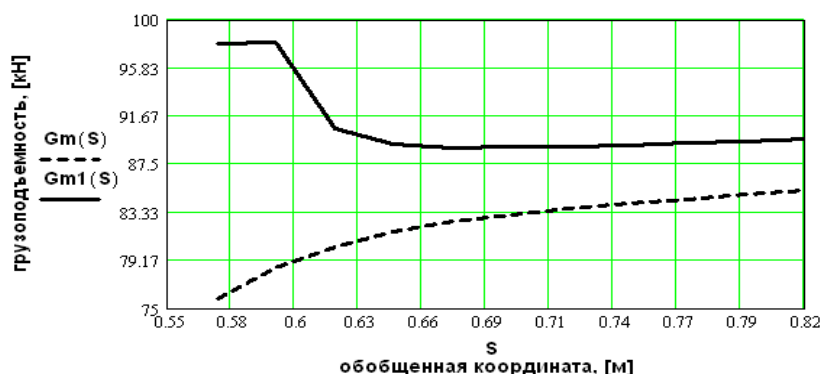


Рис. 4. Грузоподъемность ПНУ на оси подвеса

Грузоподъемность оптимального варианта ПНУ (рис. 5) при агрегатировании УЭС 290/450 с КНК-500 выше базового на 15,9 % (табл. 4). Это обеспечивает необходимый запас по грузоподъемности [1], что весьма важно, поскольку перевод навесной машины из рабочего положения в транспортное в течение рабочей смены выполняется многократно, а параметры ПНУ в процессе эксплуатации могут изменяться, снижая его расчетную грузоподъемность.

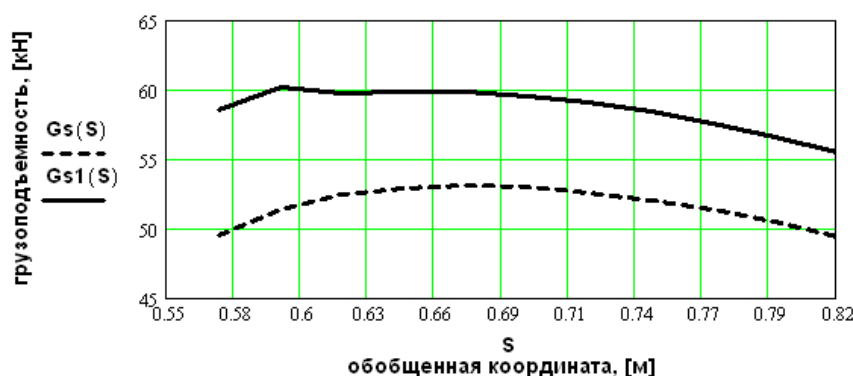


Рис. 5. Грузоподъемность ПНУ для КНК-500

Характер изменения реакции на поворотном рычаге оптимизированного МН при агрегатировании УЭС 290/450 с КНК-500 в целом соответствует базовому варианту (рис. 6), но в диапазоне изменения обобщенной координаты на 20,2–11,4 % ниже (табл. 4). Это способствует повышению эксплуатационной надежности как поворотного рычага в отдельности, так и МН в целом.

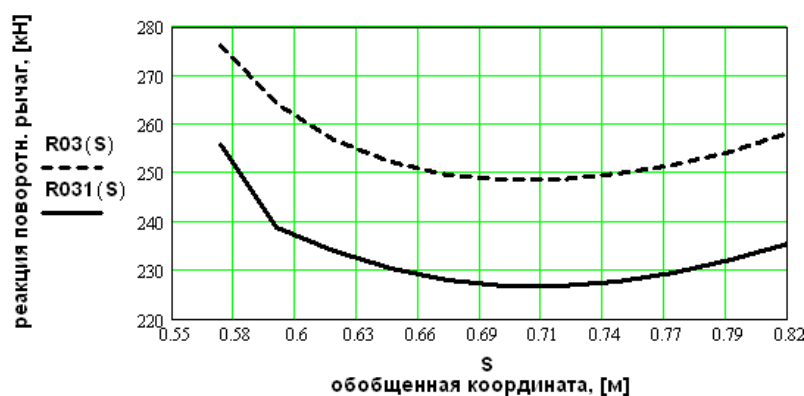


Рис. 6. Реакция на поворотном рычаге заднего МН

Характер изменения реакции на верхней тяге ( $R_{07}$ ) оптимизированного ПНУ при агрегатировании УЭС 290/450 с КНК-500 практически повторяет базовый вариант (рис. 7), а затем плавно возрастает на 2,3 % (табл. 4). Это «нормальная компенсация» за рост грузоподъемности заднего ПНУ.

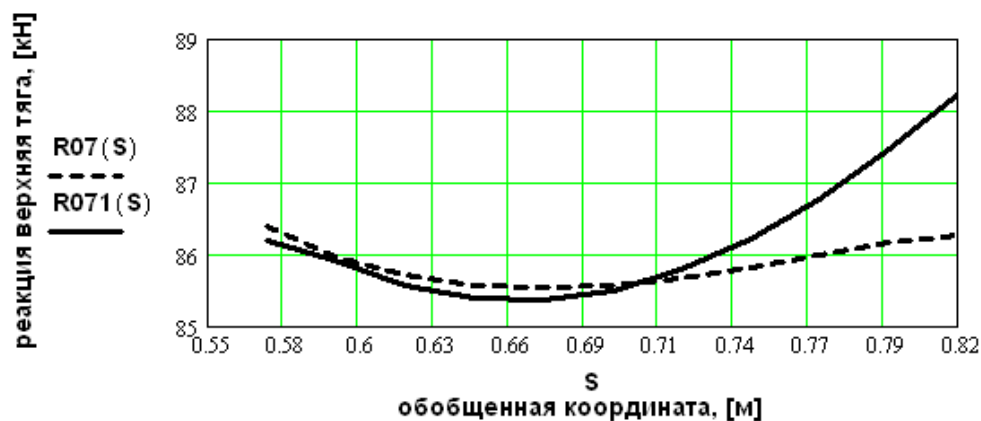


Рис. 7. Реакция на верхней тяге МН заднего ПНУ

Характер изменения давления ( $p_{g1}$ ) в гидроцилиндре оптимизированного ПНУ при агрегатировании УЭС 290/450 с КНК-500 в целом соответствует базовому варианту, но на 27,6–13,7 % ниже (табл. 4). Это способствует повышению эксплуатационной надежности как гидроцилиндра в отдельности, так и гидропривода ПНУ в целом.

Сравнение соотношений выходных параметров у оптимизированного и базового вариантов ПНУ при их агрегатировании с КНК-500 представлено в табл. 4.

Таблица 4

#### Соотношения между оптимальными и базовыми выходными параметрами

$S$ , [м]	$\frac{I_{s1}}{I_s}$	$\frac{I_{m1}}{I_m}$	$\frac{p_{g1}}{p_g}$	$\frac{G_{s1}}{G_s}$	$\frac{G_{m1}}{G_m}$	$\frac{R_{031}}{R_{03}}$	$\frac{R_{071}}{R_{07}}$
0,571	—	—	—	—	—	—	—
0,596	0,724	0,801	0,724	1,382	1,249	0,798	0,999
0,621	0,803	0,888	0,803	1,245	1,127	0,851	0,998
0,646	0,829	0,915	0,829	1,206	1,093	0,866	0,998
0,671	0,841	0,927	0,841	1,189	1,078	0,873	0,998
0,696	0,848	0,935	0,848	1,179	1,070	0,877	0,999
0,721	0,853	0,939	0,853	1,173	1,065	0,879	1,001
0,746	0,856	0,943	0,856	1,168	1,061	0,881	1,005
0,771	0,858	0,946	0,858	1,165	1,058	0,883	1,009
0,796	0,861	0,948	0,861	1,162	1,055	0,884	1,015
0,821	0,863	0,950	0,863	1,159	1,053	0,886	1,023

#### Заключение

Разработанная методика параметрической оптимизации подъемно-навесного устройства УЭС-290/450 позволила обеспечить 15,9%-й запас грузоподъемности ПНУ, снижение нагрузки в тягах МН и давления в гидроцилиндрах, что обеспечивает повышение эксплуатационной надежности ПНУ. Методика может быть использована на ранних стадиях проектирования ПНУ для улучшения показателей агрегати-



рования других навесных машин с УЭС-290/450, а также и других моделей УЭС, обладающих идентичными по структуре ПНУ.

Разработанная ФММ параметрической оптимизации может быть использована в качестве базы для разработки алгоритмов и методик параметрической оптимизации идентичных по структуре ПНУ колесных тракторов, в том числе марки «Беларус».

### 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. 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.
3. Соболев, И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями : учеб. пособие для вузов / И. М. Соболев, Р. Б. Статников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Дрофа, 2006. – 175 с.
4. Шуринов, В. А. Основы агрегатирования универсального мобильного энергетического средства с адаптерами различного назначения / В. А. Шуринов. – Гомель : Ин-т механики металлополимер. систем НАН Беларуси, 1999. – 392 с. : ил.
5. Попов, В. Б. Моделирование и многокритериальная оптимизация подъемно-навесного устройства универсального энергетического средства УЭС-290/450 «Полесье» / В. Б. Попов, В. Т. Придухо, Т. А. Мархель // Материалы МНТК «Инновации в машиностроении–2012», г. Минск, 17–19 окт. 2012 г.
6. Черноруцкий, И. Г. Методы принятия решений / И. Г. Черноруцкий. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.

*Получено 22.02.2013 г.*