

УДК 629.114.2

К ВОПРОСУ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПОДЪЕМНО-НАВЕСНОГО УСТРОЙСТВА МОБИЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СРЕДСТВА НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В. Б. ПОПОВ

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

Введение

Широкое применение в полеводстве серийных энергонасыщенных тракторов и универсальных энергетических средств в агрегате с навесными уборочными комбайнами и орудиями предъявляет повышенные требования к подъемно-навесным устройствам (ПНУ) мобильных энергетических средств (МЭС). Анализ работы ПНУ УЭС 290/450 в режиме перевода навесной машины в транспортное положение показал недостаточный запас его грузоподъемности [1], которая была улучшена одновременно с другими критериями оптимальности ПНУ [2]. Однако исследования [3], [4] утверждают важность учета в процессе проектирования и других выходных параметров ПНУ, характерных для соответствующих режимов его эксплуатации

Цель работы – повышение эффективности методики расчета и выбора оптимальных параметров подъемно-навесного устройства (рис. 1, а) МЭС, агрегируемого с навесной машиной при его эксплуатации в различных режимах.

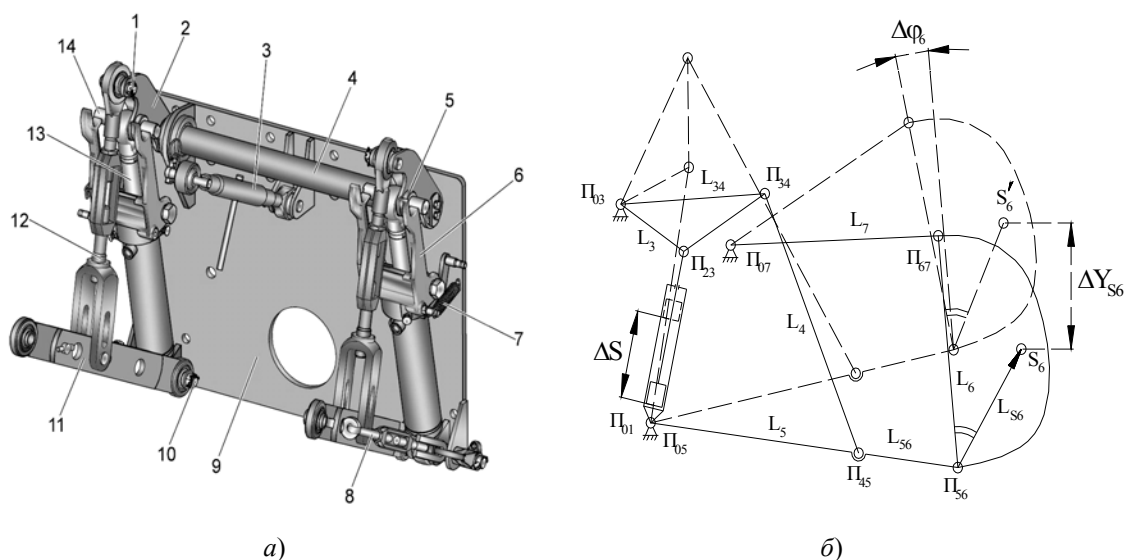


Рис. 1. Подъемно-навесное устройство (а) и плоский аналог его механизма навески (б) в рабочем и транспортном положениях:

- 1, 14 – пальцы; 2 – рычаг поворотный; 3 – тяга верхняя; 4 – вал; 5 – подшипник;
6 – фиксатор; 7 – пружина; 8 – стяжка; 9 – рама МЭС; 10 – чека;
11 – тяга нижняя; 12 – раскос; 13 – гидроцилиндр

Постановка задачи

В состав ПНУ входят гидропривод (ГП) и механизм навески (МН), закрепленный (рис. 1, а) на раме МЭС и определяющий характер взаимодействия МЭС с навесной машиной (НМ) или орудием. Тяги МН связаны с НМ через присоединительный треугольник, образуемый шарнирами верхней и нижних тяг МН.

В замкнутой кинематической цепи (рис. 1, б), состоящей из рамы МЭС, гидроцилиндра, звеньев МН и навесной машины, ход поршня (ΔS) принимается за изменение обобщенной координаты, а изменение положения центра тяжести НМ (ΔY_{S_6}) – за изменение выходной координаты.

В качестве управляемых параметров, определяющих конструктивный вариант ПНУ, предлагаются: расположенные на раме МЭС 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 максимальное значения передаточного числа МН [2] на оси его подвеса (рис. 1, б – П₅₆); \bar{I}_S, I_S^{\max} – среднее и максимальное значения передаточного числа МН, соответствующие расположению центра тяжести навесной машины; $\bar{R}_{07}, \bar{R}_{03}$ – 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 выполняется по методу Монте-Карло, с выбором начальной точки \vec{X}^0 , представляющей набор исходных данных и однозначно характеризующей базовый вариант ПНУ. Последовательно, с помощью датчика случайных чисел, построенного на основе ЛП_τ-последовательности [3], выбираются 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; ξ_{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 $\vec{X}_{\min} \leq \vec{X} \leq \vec{X}_{\max}$, и, как правило, их варьирование выполняется в диапазоне ± 5 – 10 % от номинала.

К функциональным ограничениям относятся: ход оси подвеса – $\Delta Y_{S_6}(S)$, угол наклона высоты присоединительного треугольника – $\Delta \varphi_6(S)$ (рис. 1, б), время подъ-

ема навесной машины – $t_{\text{под}}$ и координата мгновенного полюса вращения (рис. 2) навесной машины – X_p [4]:

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

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

$$t_{\text{под}} = \frac{(S_{\text{max}} - S_{\text{раб}}) F_C}{q n \eta_V} \leq t_{\text{под}}^{\text{доп}}; \quad (5)$$

$$X_p = \frac{(y_{56}(S)x_{05} - y_{05}x_{56}(S))(x_{07} - x_{67}(S)) - (x_{05} - x_{56}(S))(y_{67}(S)x_{07} - y_{07}x_{67}(S))}{(y_{07} - y_{67}(S))(x_{05} - x_{56}(S)) - (x_{07} - x_{67}(S))(y_{05} - y_{56}(S))} \leq X_p^{\text{доп}}, \quad (6)$$

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.

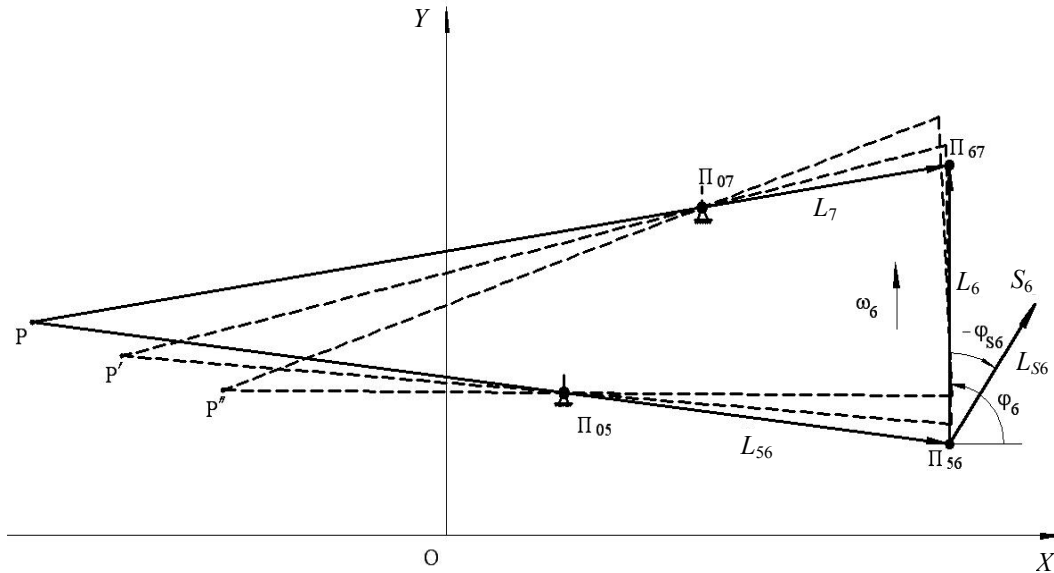


Рис. 2. Положения полюса мгновенного центра вращения при качании оси подвеса МН

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

Помимо этого к функциональным ограничениям относится максимально допустимый вес НМ, влияющий на управляемость МТА с НМ, находящейся в транспортном положении (рис. 3). В практике эксплуатации МТА принято, что для управления его движением нагрузка, приходящаяся на мост управляемых колес МЭС, должна составлять не менее 20 % от веса всего агрегата.

В этом случае для МТА, расположенного горизонтально, условие управляемости [5], ограничивающее вес НМ, переводимой в транспортное положение, имеет вид:

$$P_6 = \frac{P_{\text{МЭС}}(b - 0,2L) + P_{\text{гр}}(0,8L + a)}{X_{S_6}^{\text{max}} + 0,2L} \leq P_6^{\text{доп}}, \quad (7)$$

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

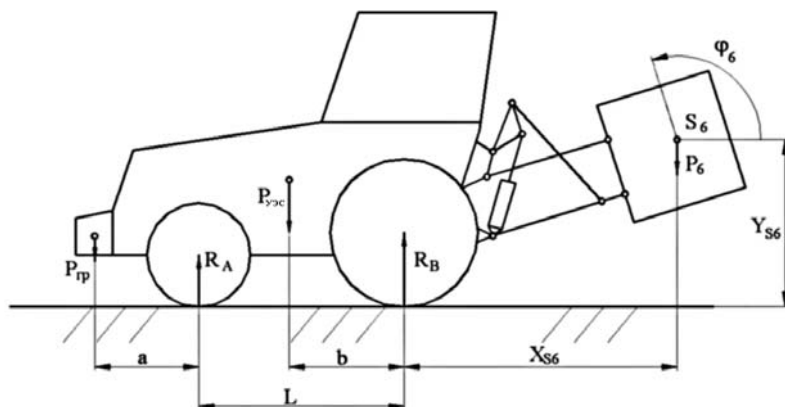


Рис. 3. Схема сил, действующих на опорную поверхность со стороны машинно-тракторного агрегата при поднятой навесной машине

В рабочем режиме, например при пахоте, давление на опорную поверхность со стороны движителей перераспределяется в соответствии с расчетной схемой статической устойчивости МЭС (рис. 4). Она учитывает вес МЭС $P_{\text{МЭС}}$, силу сопротивления P , приложенную на крюке или навеске МЭС под углом α к горизонту, и опорные реакции колес Z'_A и Z''_A [6].

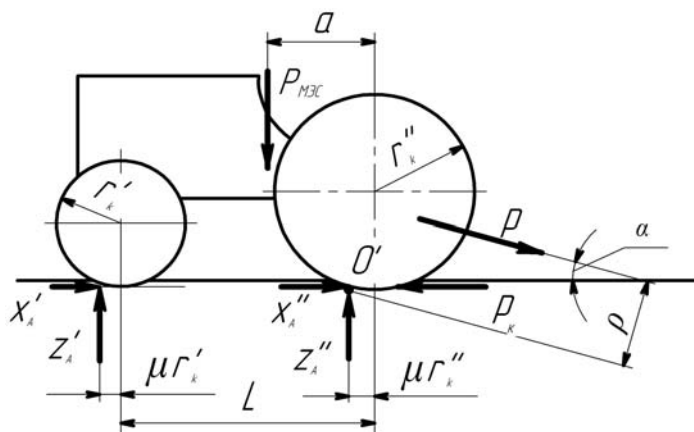


Рис. 4. Схема нагрузок МТА с работающим плугом:
 r' , r'' – радиусы колес МЭС переднего и заднего, соответственно;
 $X'_A = \mu Z'_A$ и $X''_A = \mu Z''_A$ – сопротивление перекачиванию передних и задних колес МЭС; α – угол наклона к горизонту силы P

Искомые силами являются вертикальные нагрузки на колеса МЭС Z'_A и Z''_A , а также касательная сила тяги P_k :

$$P_k = X'_A + X''_A + P \cos \alpha.$$

Нагрузку Z'_A , действующую на передние колеса МЭС, определяют из уравнения моментов сил, действующих на МЭС, относительно точки O' :

$$Z'_A = \frac{P_{\text{МЭС}}(a - \mu r''_k) - P\rho}{L + \mu(r'_k - r''_k)}, \quad (8)$$

где r'_k и r''_k – радиусы качения колес трактора; ρ – плечо силы P относительно точки O' ; μ – коэффициент сопротивления перекатыванию колес МЭС.

Затем по этой же формуле (8) определяют нагрузку Z'_{A0} на передние колеса МЭС при отсутствии плуга, т. е. при $P = 0$.

Условие устойчивости МТА требует [7], чтобы при работе с плугом значение нагрузки на передние колеса МЭС сохранялось не менее допустимого значения, необходимого для обеспечения управляемости – $Z'_{A0} / Z'_A \geq \eta_{\min}$.

Значение η_{\min} определяет завод-производитель МЭС. Обычно значение 0,4–0,6 в зависимости от конструкции МЭС и вида работ.

Для определения силы Z''_A может быть использовано условие $\sum Z = 0$, согласно которому:

$$Z''_A = P_{\text{МЭС}} + P \sin \alpha - Z'_A. \quad (9)$$

Составляя уравнение $\sum Z = 0$ и решая его относительно P_k , определяют:

$$P_k = \mu(Z'_A + Z''_A) + P \cos \alpha. \quad (10)$$

На примере разработанной математической модели транспортного переезда МТА [8], состоящего из универсального энергетического средства УЭС 290/450 и косилки-плющилки ротационной КПП-9, было установлено, что с/х фон оказывает существенное влияние на параметры колебательных процессов, индуцируемых колесными движителями. В частности, была определена связь вертикального ускорения КПП-9 и нагрузки, возникающей в звеньях МН УЭС 290/450, и его же влияние на перераспределение веса МТА на движителях энергосредства, что также расширяет список функциональных ограничений.

Допустимые значения представленных функциональных ограничений: $\Delta Y_{56}^{\text{доп}}(S)$, $\Delta \varphi_6^{\text{доп}}(S)$ и т. д. – рассчитываются по исходным данным для базового варианта ПНУ МЭС, агрегируемого с НМ.

Алгоритм многокритериальной оптимизации реализуется в форме диалога между конструктором и ПЭВМ (рис. 5). Для каждой из точек (2) проверяются функциональные ограничения и вычисляются значения критериев оптимальности. В случае невыполнения хотя бы одного из функциональных ограничений данная точка отмечалась как неактивная и в дальнейшем поиске решения не участвует.

По каждому критерию оптимальности составляется таблица испытаний, в которой значения $Y_1(x_1), \dots, Y_k(x_N)$ располагаются в порядке возрастания с указанием номеров, соответствующих N пробных точек (своих для каждого Y_k). Построение упорядоченных таблиц испытаний по каждому критерию выполняется автоматически на основании информации о каждом критерии. При этом конечная таблица содержит допустимое множество упорядоченных по каждому из критериев оптимальности испытаний. На основе полученного допустимого множества программный комплекс определяет паретовское множество неулучшаемых вариантов [3]. Критериальные

ограничения назначаются 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, когда в силу назначения конструктором жестких критериальных ограничений такие точки не обнаружатся. В этом случае необходимо вернуться назад, изменить исходные данные и решить задачу повторно. Паретооптимальные варианты остаются конструктору для анализа и выбора окончательного решения.

С целью принятия окончательного варианта решения многокритериальной задачи [9] в программном комплексе реализована возможность учета мнения разработчика ПНУ 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.

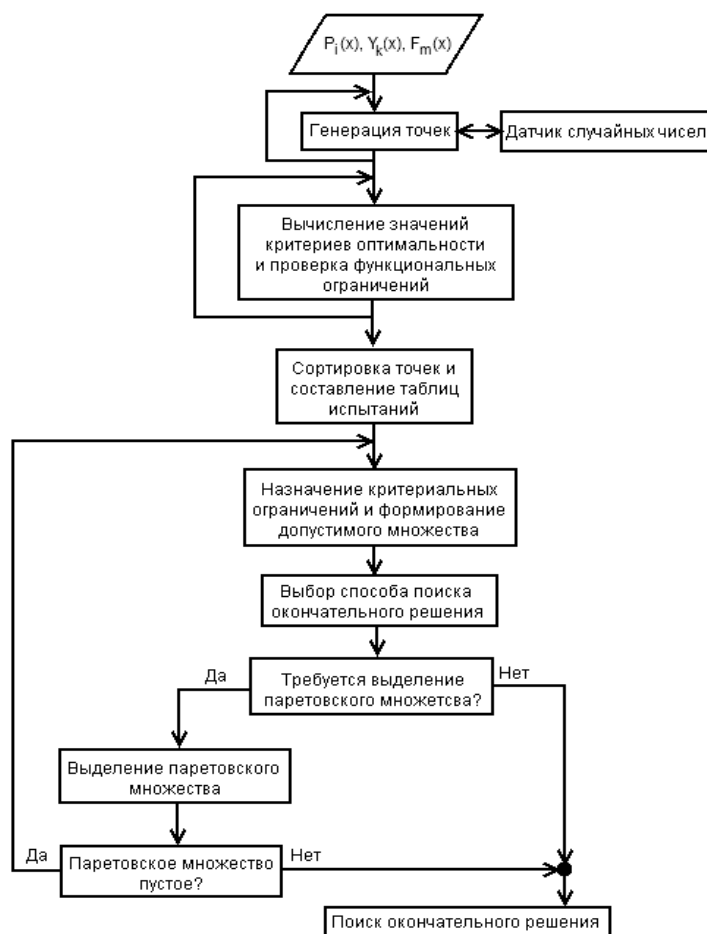


Рис. 5. Диалоговый алгоритм многокритериальной оптимизации

Результаты параметрической оптимизации модернизированного ПНУ

Пример наилучших результатов одного из проведенных вычислительных экспериментов по оптимизации ПНУ УЭС 290/450 представлен 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	247,316	260,170	84,274	88,249
Бинарных отношений	125	3,344	3,659	247,316	260,170	84,274	88,249
Поиск точки с максимальной мощностью	144	3,811	4,219	249,372	263,504	86,153	89,635
Аддитивного критерия	125	3,344	3,659	247,316	260,170	84,274	88,249
Минимакс	125	3,344	3,659	247,316	260,170	84,274	88,249
Главного критерия	111	3,523	3,987	260,178	273,512	88,486	91,187
Последовательных уступок	125	3,344	3,659	247,316	260,170	84,274	88,249

Результаты многокритериальной оптимизации [2] позволяют сделать следующее заключение: наилучший результат в процессе вычислительного эксперимента при использовании метода исследования пространства внутренних параметров [3] и различных схем компромисса был установлен под номером 125, как имеющий улучшение показателей по большинству (5 из 6) критериев оптимальности.

В качестве примера можно привести сравнение соотношений критериев оптимальности и некоторых выходных параметров у оптимизированного и базового вариантов ПНУ УЭС 290/450, при их агрегатировании с навесным кормоуборочным комбайном КНК-500, которые представлены в табл. 2.

Таблица 2

Соотношения между оптимальными и базовыми выходными параметрами

$S, м$	$\frac{I_S^{opt}}{I_S}$	$\frac{I_M^{opt}}{I_M}$	$\frac{P_{c1}}{P_c}$	$\frac{G_S^{opt}}{G_S}$	$\frac{G_M^{opt}}{G_M}$	$\frac{R_{03}^{opt}}{R_{03}}$	$\frac{R_{07}^{opt}}{R_{07}}$
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

В ходе исследования было установлено, что аналитическое выражение для расчета положения МЦВ навесной машины, однозначно связанное с параметрами механизма навески и навесной машины, позволяет оперативно оценивать вариант МН МЭС на его соответствие техническим требованиям [5], [10] при агрегатировании с плугом и обеспечивать их выполнение в соответствующем рабочем режиме.

Выражения для расчета величины и направления силы сопротивления движению пахотного агрегата и расчет плеча ее действия позволяют осуществлять коррекцию нормальных реакций на движителях МЭС. Если полученные в результате расчета зна-

чения нормальных реакций не обеспечивают управляемости на передних колесах или требуемого сцепления с почвой задних колес МЭС, то изменяется точка приложения и направление действия силы, что достигается коррекцией: конфигурации внешнего четырехзвенника МН, в том числе стойки и положения опорного колеса плуга [6].

Представленная методика многокритериальной параметрической оптимизации ПНУ МЭС на основе учета дополнительных технических ограничений и развития потенциальных возможностей метода исследования пространства внутренних параметров позволяет одновременно обеспечить рост запаса грузоподъемности ПНУ, снижение нагрузки в тягах МН и давления в гидроцилиндрах, а также выполнение функциональных ограничений режимов эксплуатации. Это способствует снижению энергоемкости режимов работы ПНУ и повышению его эксплуатационной надежности.

Методика может быть использована на ранних стадиях проектирования ПНУ для улучшения показателей агрегатирования навесных машин и орудий с энергонасыщенными МЭС, в том числе и для ПНУ тракторов «Беларус», с идентичными по структуре ПНУ.

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. Параметрическая оптимизация подъемно-навесного устройства универсального энергетического средства УЭС 290/450 «Полесье», агрегируемого с навесным кормоуборочным комбайном КНК-500 / В. Б. Попов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2013. – № 1. – С. 35–43.
3. Соболев, И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями : учеб. пособие / 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.
5. ГОСТ 10677–2001. Устройство навесное заднее сельскохозяйственных тракторов классов 0,6–8. Типы, основные параметры и размеры (Межгосударственный стандарт). – Минск, 2002. – С. 8.
6. Попов, В. Б. Влияние параметров механизма навески и плуга на тягово-энергетические показатели пахотного агрегата / В. Б. Попов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2013. – № 4. – С. 58–64.
7. Чудаков, Д. А. Основы теории и расчета трактора и автомобиля : учеб. пособие / Д. А. Чудаков. – М. : Колос, 1975. – 384 с.
8. Попов, В. Б. Влияние параметров мобильного сельскохозяйственного агрегата на некоторые характеристики плавности его хода в режиме транспортного переезда / В. Б. Попов, С. Ф. Андреев // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2014. – № 1. – С. 39–44.
9. Черноруцкий, И. Г. Методы принятия решений / И. Г. Черноруцкий. – СПб. : БХВ-ПЕТЕРБУРГ, 2005. – 416 с.
10. ГОСТ 12.2.111–85. Система стандартов безопасности труда. Машины сельскохозяйственные навесные и прицепные. Общие требования безопасности (Межгосударственный стандарт). – Минск : 2006. – С. 10.

Получено 02.06.2014 г.