

УДК 62-82:681.581.5

## ПРЕДПРОЕКТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МАНИПУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ МОБИЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

Лагерев И.А.

Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского, Брянск, Россия

Разработана оптимизационная математическая модель и методика выбора оптимальных параметров манипуляционных систем мобильных транспортно-технологических машин, позволяющие повысить их эксплуатационные свойства и конкурентоспособность. Также разработана оригинальная структура комплексной целевой функции, аддитивно учитывающая влияние любого числа значимых показателей качества на формирование оптимального варианта проектируемой конструкции. Установлена целесообразность использования оптимизационных подходов к определению основных конструктивных размеров кинематической схемы и параметров привода гидрофицированной манипуляционной системы на предпроектной стадии – стадии разработки технического предложения на проектирование манипуляционной системы мобильной машины. При указанном подходе появляется возможность исходно заложить в подлежащую дальнейшему проектированию конструкцию оптимальные значения ее наиболее значимых количественных характеристик, определяющих реализацию максимально высоких значений показателей качества спроектированной манипуляционной системы. Для гидрофицированной манипуляционной системы мобильной машины целесообразно использовать такие показатели качества, как ее собственная масса и мощность насосной установки. Предпроектная оптимизация позволяет комплексно определить оптимальное сочетание достаточно большого числа базовых проектных параметров – характерных конструктивных размеров металлоконструкции манипуляционной системы (длин и габаритных размеров поперечных сечений звеньев, присоединительных размеров для гидродвигателей) и характеристик гидрпривода (рабочего давления и расхода рабочей жидкости).

**Ключевые слова:** мобильная транспортно-технологическая машина, манипуляционная система, многокритериальная оптимизация, целевая функция, ограничение, вес, давление, напряжение.

**DOI:** 10.22281/2413-9920-2017-03-01-26-45

Развитие подходов инженерной оптимизации применительно к процессу проектирования манипуляционных систем мобильных машин, их использование в качестве базового подхода при разработке новых и усовершенствовании имеющихся методик конструирования и расчета деталей, узлов, механизмов и металлоконструкций является в настоящее время одним из наиболее перспективных направлений существенного повышения качества данного вида подъемно-транспортной техники и эффективным инструментом выявления резервов уже известных конструкций [1-3].

При этом важно учитывать, что для большинства подлежащих расчету конструктивных элементов манипуляционных систем мобильных машин значащими являются несколько (два и более) показателей качества, как правило, выражающих массогабаритные и энергетические характеристики оптимизируемых конструкций и систем. Результаты расчетов показывают [4], что проведение однокритериальной оптимизации конструкций манипуляционных систем мобильных машин при одинаковых исходных данных последовательно для различных показателей качества приводит к получению не совпадающих между собой оптимальных значений искомых управляемых параметров оптимизации. Поэтому задача оптимального проектирования конструктивных элементов манипуляционных систем мобильных транспортно-технологических машин должна ставиться и решаться как задача многокритериальной оптимизации на основе учета всех значимых показателей качества и степени их приоритетности для их надежного и энергоэффективного функционирования.

Для построения комплексных целевых функций в задачах многокритериальной оптимизации использовалась разработанная в [4] аддитивная функция

$$C(\{x\}, \{z\}) = \left\langle \sum_k w_k \left\{ 1 - \left[ \frac{C_k(\{x\}_k^{opt}, \{z\}_k^{opt})}{C_k(\{x\}, \{z\})} \right]^{S_{extr,k}} \right\}^2 \right\rangle^{0,5} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $\{x\}, \{z\}$  – векторы управляемых и неуправляемых параметров задачи многокритериальной оптимизации;  $\{x\}_k^{opt}, \{z\}_k^{opt}$  – векторы управляемых и неуправляемых параметров в точке оптимума  $k$ -й целевой функции  $\Pi_k$  ( $k$ -го показателя качества) при однокритериальной оптимизации;  $\Pi_k(\{x\}_k^{opt}, \{z\}_k^{opt})$  – значение  $k$ -й целевой функции в оптимальной точке при однокритериальной оптимизации;  $s_{extr,k}$  – индикатор экстремальности  $k$ -го показателя качества (при поиске минимума показателя  $s_{extr,k} = 1$ , максимума –  $s_{extr,k} = -1$ ).

В общем случае структура векторов  $\{x\}_k$  и  $\{z\}_k$  задач однокритериальной оптимизации по числу входящих в них параметров и их номенклатуре может не совпадать как между собой, так и соответственно с векторами  $\{x\}$  и  $\{z\}$  задачи многокритериальной оптимизации, тогда как векторы  $\{x\}$  и  $\{z\}$  являются композицией соответствующих векторов  $\{x\}_k$  и  $\{z\}_k$ .

При использовании комплексной целевой функции вида (1) процесс оптимального проектирования технического объекта протекает в два этапа:

- на первом этапе выполняется однокритериальная оптимизация на основе условной минимизации целевых функций  $\Pi_k$  по всем  $k$  учитываемым показателям качества с нахождением значений векторов управляемых  $\{x\}_k^{opt}$  и неуправляемых  $\{z\}_k^{opt}$  параметров в точке оптимума  $k$ -й целевой функции  $\Pi_k$ , а также значений целевых функций в оптимальной точке  $\Pi_k(\{x\}_k^{opt}, \{z\}_k^{opt})$ ;

- на втором этапе выполняется многокритериальная оптимизация на основе условной минимизации целевой функции (1) с нахождением оптимальных векторов  $\{x\}^{opt}$  и  $\{z\}^{opt}$ .

Как того требует теория многокритериальной оптимизации [5, 6], отдельные слагаемые в выражении (1) являются безразмерными и нормированными величинами, значения которых в допустимом пространстве искомых векторов  $\{x\}$  лежат в интервале  $[0;1]$ . Геометрическое представление о комплексной целевой функции вида (1) дает рис. 1, на котором она выражается сверткой двух показателей качества  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ , каждый из которых зависит от одного управляемого параметра  $x$ . Кривые 1 и 7 выражают собой функции  $\Pi_1(x)$  и  $\Pi_2(x)$  при однокритериальной оптимизации. При равных значениях весовых коэффициентов (в данном случае  $w_1 = w_2 = 0,5$ ), т.е. при равной проектной значимости показателей качества оптимум комплексной целевой функции оказывается расположенным приблизительно на равном расстоянии (по управляемому параметру  $x$ ) от оптимумов целевых функций  $\Pi_1(x)$  и  $\Pi_2(x)$  при однокритериальной оптимизации.

При этом значение  $\Pi(x)$  оказывается наибольшим. Если проектная значимость показателей качества неодинакова, то этот факт должен учитываться соответствующим отклонением весового коэффициента  $w_k$  в большую или меньшую сторону, однако всегда должно сохраняться соотношение  $\sum w_k = 1$ .

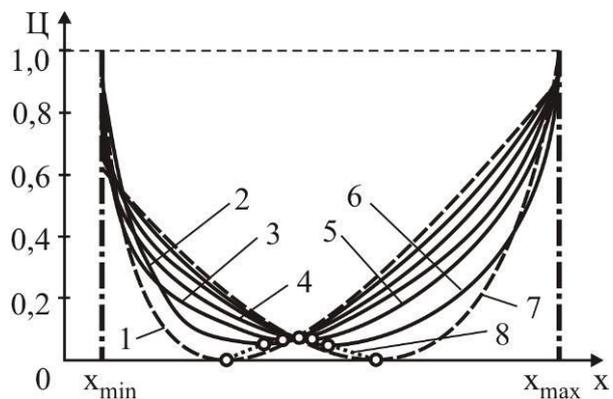


Рис. 1. Вид комплексной целевой функции (свертки двух показателей качества  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ ) при одном управляемом параметре  $x$  и разных сочетаниях весовых коэффициентов:  
 1 –  $w_1 = 1, w_2 = 0$ ; 2 –  $w_1 = 0,9, w_2 = 0,1$ ;  
 3 –  $w_1 = 0,7, w_2 = 0,3$ ; 4 –  $w_1 = 0,5, w_2 = 0,5$ ;  
 5 –  $w_1 = 0,3, w_2 = 0,7$ ; 6 –  $w_1 = 0,1, w_2 = 0,9$ ;  
 7 –  $w_1 = 0, w_2 = 1$ ; 8 – линия минимума  $\Pi$  при различных сочетаниях  $w_1$  и  $w_2$

По своему смыслу комплексная целевая функция вида (1) выражает меру близости расположения точки ее оптимума в пространстве переменных параметров  $\{x\}$  к расположению точек оптимума всех учитываемых однокритериальных целевых функций  $Ц_k$  в пространстве тех же параметров. Оптимальный вектор  $\{x\}^{opt}$  поэтому выражает собой такое расположение точки оптимума целевой функции (1), для которой характерна минимальная сумма расстояний до точек оптимума целевых функций  $Ц_k$ . Иными словами, содержащиеся в оптимальных векторах  $\{x\}^{opt}$  и  $\{z\}^{opt}$  параметры характеризуют такую конструкцию проектируемого технического объекта, которая в наибольшей степени отражает учитываемые его показатели качества и наилучшим образом обеспечивает их одновременное сочетание.

Вычислительная эффективность применения свертки нескольких показателей качества при многокритериальной оптимизации в виде комплексной целевой функции вида (1) обусловлена тем, что требуется проведения ряда однотипных расчетов для нескольких различных сочетаний весовых коэффициентов при неизменном вычислительном алгоритме. Это имеет существенное значение для разработки универсального программного обеспечения для автоматизации проектирования мобильных транспортно-технологических машин.

Как правило, задачи оптимизации конструктивных элементов подъемно-транспортной техники, включая и грузоподъемное манипуляционное оборудование, решаются на этапе разработки его технического, реже – эскизного проектов. Однако представляется целесообразным использование оптимизационных подходов уже на более ранней, предпроектной стадии – на стадии разработки технического предложения на проектирование манипуляционной системы мобильной транспортно-технологической машины. На этой стадии, исходя из технического задания, установлен достаточной ограниченный набор конструктивных требований, в частности, вид кинематической схемы манипуляционной системы, характерные размеры рабочей зоны манипуляционной системы (минимальный  $R_{min}$  и максимальный  $R_{max}$  вылет грузоподъемной стрелы, крайние верхнее  $Y_{max}$  и нижнее  $Y_{min}$  положения конечной точки стрелы), номинальная грузоподъемность на максимальном вылете  $G_n$ , угловые и линейные скорости перемещения звеньев стрелы и др.

При указанном подходе можно исходно заложить в подлежащую дальнейшему проектированию конструкцию оптимальные значения ее наиболее значимых количественных характеристик, определяющих реализацию максимально высоких значений показателей качества спроектированной манипуляционной системы.

Применительно к гидрофицированной манипуляционной системе мобильной транспортно-технологической машины целесообразно ориентироваться на такие показатели качества, как ее собственная масса  $M_{ms}$  и мощность насосной установки  $N_n$ , которые необходимо минимизировать в процессе предпроектной оптимизации. В этом случае решается двуединая технико-экономическая задача: для спроектированной манипуляционной системы обеспечиваются как низкие эксплуатационных расходы за счет энергоэффективности привода, так и низкие производственные расходы за счет материалоемкости металлоконструкции. Оптимизация позволяет комплексно определить оптимальное сочетание достаточно большого числа базовых проектных параметров - характерных конструктивных размеров металлоконструкции манипуляционной системы (длин и габаритных размеров поперечных сечений звеньев, присоединительных размеров для гидродвигателей) и характеристик гидропривода (рабочего давления и расхода рабочей жидкости).

Рассматриваемая оптимизационная задача является многокритериальной. Ее математическую постановку рассмотрим на примере трехзвенной манипуляционной системы с поворотными звеньями (рис. 2). Такую кинематическую схему имеют, в частности, манипуляционные системы мобильных машин АСТ-4-А [7], Varco 295ML [8] и др.

Рабочая зона трехзвенной манипуляционной системы (рис. 2) выражается полярной сферической системой координат. На рис. 3 показано сечение рабочей зоны вертикальной плоскостью. Конфигурация грузоподъемной стрелы, соответствующая крайнему нижнему

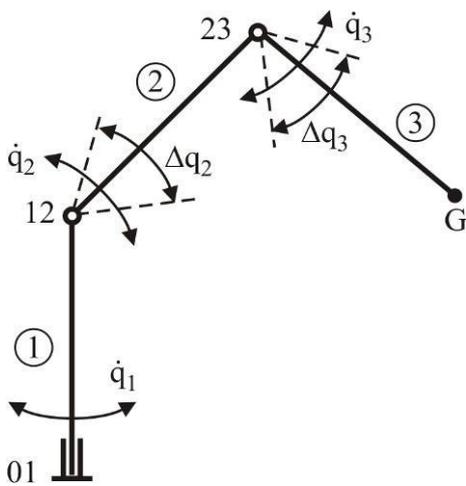


Рис. 2. Кинематическая схема трехзвенной манипуляционной системы

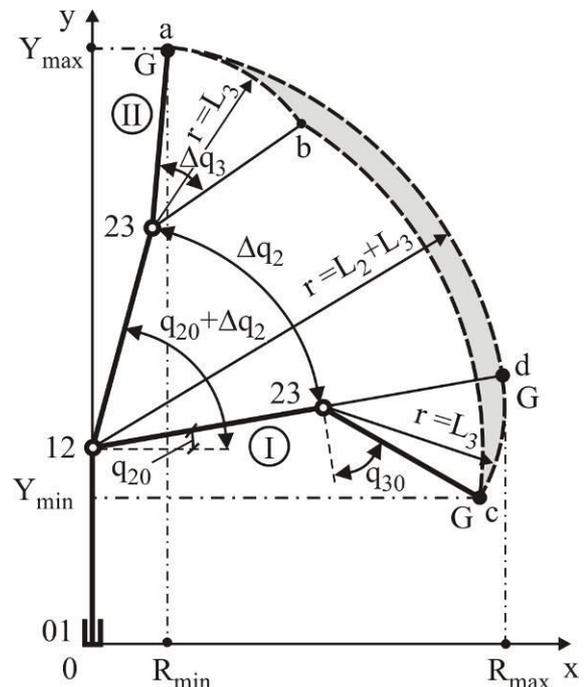


Рис. 3. Рабочая зона трехзвенной манипуляционной системы

положению характерной точки  $G$  манипуляционной системы (точки присоединения грузозахватного органа) характеризуется позицией I, а конфигурация, соответствующая крайнему верхнему положению – позицией II. Плоская фигура, ограниченная замкнутой кривой  $abcd$ , определяет геометрическое место нахождения точки  $G$  при любом возможном сочетании взаимного расположения смежных звеньев 2 и 3 грузоподъемной стрелы в процессе работы манипуляционной системы. Кривые  $ab$  и  $cd$  являются дугами окружности радиуса  $L_3$  с центром в шарнире 23, кривая  $bc$  - дугой окружности радиуса  $r_{bc} = \sqrt{L_2^2 + L_3^2 + L_2 L_3 \sin q_{30}}$  с центром в шарнире 12, кривая  $adc$  - дугой окружности радиуса  $r_{abc} = L_2 + L_3$  с центром в шарнире 12. Максимальный вылет характерной точки  $G$  стрелы составляет  $R_{\max} = (L_2 + L_3) \cos q_{20}$ , минимальный -  $R_{\min} = L_2 \cos(q_{20} + \Delta q_2) + L_3 \sin(q_{20} + q_{30} + \Delta q_2 + \Delta q_3)$ . Крайнее верхнее положение точки  $G$  относительно горизонтальной плоскости установки стрелы (шарнира 01) составляет  $Y_{\max} = L_1 + L_2 \sin(q_{20} + \Delta q_2) - \cos(q_{20} + q_{30} + \Delta q_2 + \Delta q_3)$ , крайнее нижнее положение -  $Y_{\min} = L_1 + L_2 \sin q_{20} - L_3 \cos(q_{20} + q_{30})$ . Анализ приведенных геометрических соотношений показывает, что обеспечение установленных в техническом задании на проектирование манипуляционной системы характерных размеров рабочей зоны грузоподъемной стрелы ( $R_{\max}, R_{\min}, Y_{\max}, Y_{\min}$ ) может быть выполнено при различных сочетаниях 7 конструктивных параметров – длин звеньев  $L_1, L_2, L_3$ , угловых координат начальных положений звеньев  $q_{20}, q_{30}$  и максимальных углов их поворота  $\Delta q_2, \Delta q_3$ .

Учитывая хорошо зарекомендовавшие себя на практике варианты конструктивного исполнения металлоконструкции поворотных звеньев гидрофицированных манипуляционных систем, приводящихся в движение с помощью силовых гидроцилиндров, имеется 4 возможных варианта компоновки грузоподъемной стрелы (рис. 4). Варьирование присоединительными размерами, определяющими места крепления гидроцилиндров к металлоконструкции звеньев, позволяет варьировать величиной внутренних силовых факторов в характерных сечениях звеньев (что оказывает влияние на размеры их поперечных сечений и суммарную массу  $M_{ms}$ ), а также необходимыми тяговыми усилиями и линейными скоростями движения гидроцилиндров (что оказывает влияние на величину рабочего давления  $p_n$ , расход рабочей

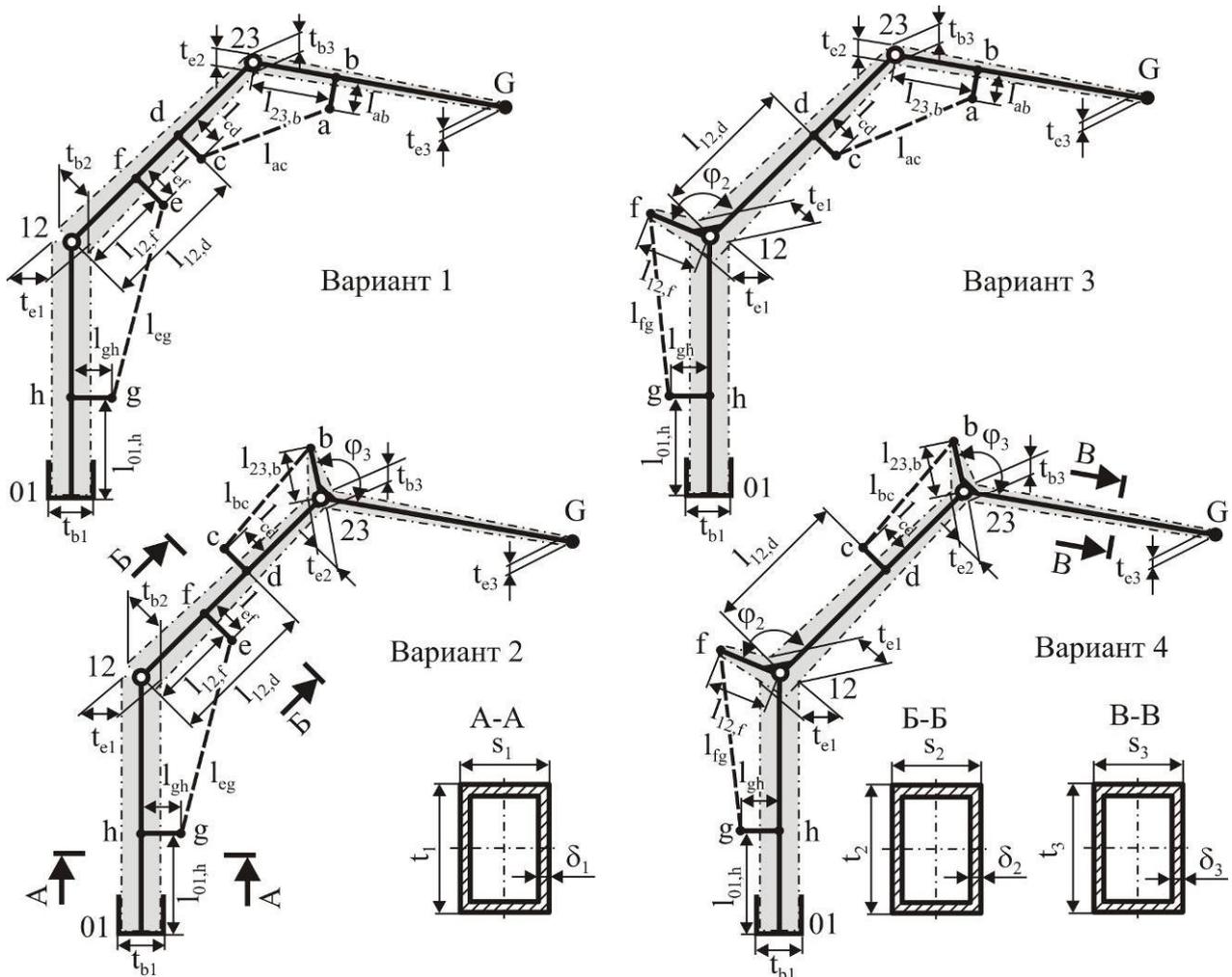


Рис. 4. Варианты конструктивного исполнения гидрофицированной трехзвенной манипуляционной системы

жидкости  $Q_n$  и мощность гидропривода  $N_n$ ). Анализ вариантов конструктивного исполнения трехзвенной манипуляционной системы показывает, что собственная масса металлоконструкции грузоподъемной стрелы  $M_{ms}$  и мощность насосной установки  $N_n$  определяется сочетанием следующих параметров: длин звеньев ( $L_1, L_2, L_3$ ), присоединительных размеров гидроцилиндров ( $l_{01,h}, l_{12,f}, l_{12,d}, l_{23,b}, l_{gh}, l_{ef}, l_{cd}, l_{ab}$ ), габаритных размеров поперечных сечений звеньев (высоты  $t_{b1}, t_{e1}, t_h, t_{b2}, t_{e2}, t_f, t_d, t_{b3}, t_{e3}, t_b$ ; ширины  $s_1, s_2, s_3$ ), толщин стенок звеньев ( $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ ), углов поворота рычагов ( $\varphi_2, \varphi_3$ ). В зависимости от конструктивного варианта число этих параметров составляет 25...27.

Максимальная мгновенная мощность при допустимом совместном движении звеньев 2 и 3, определяющая мощность насосной установки гидрофицированной манипуляционной системы, составляет

$$N_n = 0,25\pi p_n [D_{гц2}^2 v_{гц2,max}(\dot{q}_2) + D_{гц3}^2 v_{гц3,max}(\dot{q}_3)], \quad (2)$$

где  $D_{гци}$  - диаметр приводного гидроцилиндра  $i$ -го звена;  $v_{гци,max}(\dot{q}_i)$  - максимальная линейная скорость штока приводного гидроцилиндра  $i$ -го звена, обеспечивающая требуемую угловую скорость поворота  $\dot{q}_i$ .

Анализ зависимости (2) показывает, что мощность насосной установки определяется сочетанием трех параметров -  $p_n, D_{гц2}, D_{гц3}$ .

Перечисленные выше при анализе гидрофицированной манипуляционной системы параметры могут рассматриваться как управляемые параметры задачи оптимизации манипуляционной системы мобильной транспортно-технологической машины, т.е. для  $i$ -го варианта ее конструктивного исполнения (рис. 4) подлежащий оптимизации вектор  $\{x\}_i$  будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \{x\}_1^T &= \{L_1 L_2 L_3 q_{20} q_{30} \Delta q_2 \Delta q_3 p_n D_{2y2} D_{2y3} s_1 s_2 s_3 \delta_1 \delta_2 \delta_3 l_{01,h} l_{gh} t_{b1} t_{e1} t_{b2} t_{e2} t_{b3} t_{e3} \\ & l_{12,f} l_{ef} l_{12,d} l_{cd} l_{23,b} l_{ab} t_h t_f t_d t_b\} = \{x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_7 x_8 x_9 x_{10} x_{11} x_{12} x_{13} x_{14} \\ & x_{15} x_{16} x_{17} x_{18} x_{19} x_{20} x_{21} x_{22} x_{23} x_{24} x_{25} x_{26} x_{27} x_{28} x_{29} x_{30} x_{31} x_{32} x_{33} x_{34}\}; \\ \{x\}_2^T &= \{L_1 L_2 L_3 q_{20} q_{30} \Delta q_2 \Delta q_3 p_n D_{2y2} D_{2y3} s_1 s_2 s_3 \delta_1 \delta_2 \delta_3 l_{01,h} l_{gh} t_{b1} t_{e1} t_{b2} t_{e2} t_{b3} t_{e3} \\ & l_{12,f} l_{ef} l_{12,d} l_{cd} l_{23,b} t_h t_f t_d \varphi_3\} = \{x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_7 x_8 x_9 x_{10} x_{11} x_{12} x_{13} x_{14} \\ & x_{15} x_{16} x_{17} x_{18} x_{19} x_{20} x_{21} x_{22} x_{23} x_{24} x_{25} x_{26} x_{27} x_{28} x_{29} x_{30} x_{31} x_{32} x_{33}\}; \\ \{x\}_3^T &= \{L_1 L_2 L_3 q_{20} q_{30} \Delta q_2 \Delta q_3 p_n D_{2y2} D_{2y3} s_1 s_2 s_3 \delta_1 \delta_2 \delta_3 l_{01,h} l_{gh} t_{b1} t_{e1} t_{b2} t_{e2} t_{b3} t_{e3} \\ & l_{12,f} l_{12,d} l_{cd} l_{23,b} l_{ab} t_h t_f t_d t_b\} = \{x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_7 x_8 x_9 x_{10} x_{11} x_{12} x_{13} x_{14} \\ & x_{15} x_{16} x_{17} x_{18} x_{19} x_{20} x_{21} x_{22} x_{23} x_{24} x_{25} x_{26} x_{27} x_{28} x_{29} x_{30} x_{31} x_{32} x_{33}\}; \\ \{x\}_4^T &= \{L_1 L_2 L_3 q_{20} q_{30} \Delta q_2 \Delta q_3 p_n D_{2y2} D_{2y3} s_1 s_2 s_3 \delta_1 \delta_2 \delta_3 l_{01,h} l_{gh} t_{b1} t_{e1} t_{b2} t_{e2} t_{b3} t_{e3} \\ & l_{12,f} l_{12,d} l_{cd} l_{23,b} t_h t_d \varphi_2 \varphi_3\} = \{x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_7 x_8 x_9 x_{10} x_{11} x_{12} x_{13} x_{14} \\ & x_{15} x_{16} x_{17} x_{18} x_{19} x_{20} x_{21} x_{22} x_{23} x_{24} x_{25} x_{26} x_{27} x_{28} x_{29} x_{30} x_{31} x_{32}\}. \end{aligned}$$

Показатель качества - собственная масса  $M_{ms}$  манипуляционной системы – определяется суммированием масс отдельных звеньев с учетом их конструктивного исполнения (с рычагом и без рычага) и для  $i$ -го варианта манипуляционной системы (рис. 4) выражается одной из соответствующих зависимостей

$$\begin{aligned} M_{ms1} &= M_{s1} + M_{s2} + M_{s3}; & M_{ms2} &= M_{s1} + M_{s2} + M_{s3l}; \\ M_{ms3} &= M_{s1} + M_{s2l} + M_{s3}; & M_{ms4} &= M_{s1} + M_{s2l} + M_{s3l}, \end{aligned} \quad (3)$$

Массы отдельных звеньев, входящие в (3), составляют:

- звено 1

$$M_{s1} = \rho L_1 \delta_1 (t_{b1} + t_{e1} + 2s_1 - 4\delta_1);$$

- звено 2 (без рычага)

$$\begin{aligned} M_{s2} &= \rho l_{12,f} \left\langle t_{b2} + t_f + (s_2 - 2\delta_2) \left\{ 1 + \sqrt{1 + [(t_f - t_{b2}) / l_{12,f}]^2} \right\} \right\rangle + \\ &+ \rho (l_{12,d} - l_{12,f}) \left\langle t_f + t_d + (s_2 - 2\delta_2) \left\{ 1 + \sqrt{1 + [(t_d - t_f) / (l_{12,d} - l_{12,f})]^2} \right\} \right\rangle + \\ &+ \rho (L_2 - l_{12,d}) \left\langle t_d + t_{e2} + (s_2 - 2\delta_2) \left\{ 1 + \sqrt{1 + [(t_{e2} - t_d) / (L_2 - l_{12,d})]^2} \right\} \right\rangle; \end{aligned}$$

- звено 2 (с рычагом)

$$\begin{aligned} M_{s2l} &= \rho l_{12,f} \left\{ 1, 5t_{b2} + (s_2 - 2\delta_2) \left[ 1 + \sqrt{1 + (t_{b2} / 2l_{12,f})^2} \right] \right\} + \\ &+ \rho l_{12,d} \left\langle t_{b2} + t_d + (s_2 - 2\delta_2) \left\{ 1 + \sqrt{1 + [(t_d - t_{b2}) / l_{12,d}]^2} \right\} \right\rangle + \\ &+ \rho (L_2 - l_{12,d}) \left\langle t_d + t_{e2} + (s_2 - 2\delta_2) \left\{ 1 + \sqrt{1 + [(t_{e2} - t_d) / (L_2 - l_{12,d})]^2} \right\} \right\rangle; \end{aligned}$$

- звено 3 (без рычага)

$$\begin{aligned} M_{s3} &= \rho l_{23,b} \left\langle t_{b3} + t_b + (s_3 - 2\delta_3) \left\{ 1 + \sqrt{1 + [(t_b - t_{b3}) / l_{23,b}]^2} \right\} \right\rangle + \\ &+ \rho (L_3 - l_{23,b}) \left\langle t_b + t_{e3} + (s_3 - 2\delta_3) \left\{ 1 + \sqrt{1 + [(t_{e3} - t_b) / (L_3 - l_{23,b})]^2} \right\} \right\rangle; \end{aligned}$$

- звено 3 (с рычагом)

$$M_{s3l} = \rho l_{23,b} \left\langle 1,5t_{b3} + (s_3 - 2\delta_3) \{1 + \sqrt{1 + (t_{b3} / 2l_{23,b})^2}\} \right\rangle + \\ + \rho L_3 \left\langle t_{b3} + t_{e3} + (s_3 - 2\delta_3) \{1 + \sqrt{1 + [(t_{e3} - t_{b3}) / L_3]^2}\} \right\rangle.$$

Значение показателя качества - мощности насосной установки  $N_n$  - зависит согласно (2) от максимальных линейных скоростей штоков приводных гидроцилиндров звеньев манипуляционной системы, обеспечивающих требуемые угловые скорости их поворота. Анализ приведенных в [9, 10] зависимостей связи между линейными и угловыми скоростями движения звеньев шарнирно-сочлененных стрел позволяет установить расчетные соотношения для оценки максимальных скоростей  $v_{ци, \max}(\dot{q}_i)$ :

- звено 2 (без рычага)

$$v_{ци2, \max}(\dot{q}_2) = \frac{l_{12,e} l_{12,g} \cos\{q_{20} - \arctg(l_{ef} / l_{12,f}) - \arctg[l_{gh} / (L_1 - l_{01,h})]\}}{\sqrt{l_{12,e}^2 + l_{12,g}^2 + 2l_{12,e} l_{12,g} \sin\{q_{20} - \arctg(l_{ef} / l_{12,f}) - \arctg[l_{gh} / (L_1 - l_{01,h})]\}}} \cdot \dot{q}_2;$$

- звено 2 (с рычагом)

$$v_{ци2, \max}(\dot{q}_2) = - \frac{l_{12,f} l_{12,g} \cos\{q_{2\max} + q_{20} + \varphi_2 + \arctg[l_{gh} / (L_1 - l_{01,h})]\}}{\sqrt{l_{12,f}^2 + l_{12,g}^2 + 2l_{12,f} l_{12,g} \sin\{q_{2\max} + q_{20} + \varphi_2 + \arctg[l_{gh} / (L_1 - l_{01,h})]\}}} \cdot \dot{q}_2;$$

- звено 3 (без рычага)

$$v_{ци3, \max}(\dot{q}_3) = \frac{l_{23,a} l_{23,c} \cos\{q_{30} - \arctg(l_{ab} / l_{23,b}) - \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d})]\}}{\sqrt{l_{23,a}^2 + l_{23,c}^2 + 2l_{23,a} l_{23,c} \sin\{q_{30} - \arctg(l_{ab} / l_{23,b}) - \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d})]\}}} \cdot \dot{q}_3;$$

- звено 3 (с рычагом)

$$v_{ци3, \max}(\dot{q}_3) = - \frac{l_{23,b} l_{23,c} \cos\{q_{3\max} + q_{30} + \varphi_3 + \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d})]\}}{\sqrt{l_{23,b}^2 + l_{23,c}^2 + 2l_{23,b} l_{23,c} \sin\{q_{3\max} + q_{30} + \varphi_3 + \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d})]\}}} \cdot \dot{q}_3,$$

где  $l_{12,e} = \sqrt{l_{12,f}^2 + l_{ef}^2}$ ;  $l_{12,g} = \sqrt{(L_1 - l_{01,h})^2 + l_{gh}^2}$ ;  $l_{23,c} = \sqrt{(L_2 - l_{12,d})^2 + l_{cd}^2}$ ;  $l_{23,a} = \sqrt{l_{23,b}^2 + l_{ab}^2}$ ;  $q_{2\max}$ ,  $q_{3\max}$  - углы поворота звеньев 2 и 3, при которых в диапазоне  $q_2 \in [0; \Delta q_2]$  и  $q_3 \in [0; \Delta q_3]$  имеют место минимумы функций соответственно

$$\frac{\cos\{q_2 + q_{20} + \varphi_2 + \arctg[l_{gh} / (L_1 - l_{01,h})]\}}{\sqrt{l_{12,f}^2 + l_{12,g}^2 + 2l_{12,f} l_{12,g} \sin\{q_2 + q_{20} + \varphi_2 + \arctg[l_{gh} / (L_1 - l_{01,h})]\}}}, \\ \frac{\cos\{q_3 + q_{30} + \varphi_3 + \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d})]\}}{\sqrt{l_{23,b}^2 + l_{23,c}^2 + 2l_{23,b} l_{23,c} \sin\{q_3 + q_{30} + \varphi_3 + \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d})]\}}}.$$

Необходимая величина хода штоков гидроцилиндров поворота секций 2 и 3 с учетом зависимостей [9, 10] составляет:

- звено 2 (без рычага)

$$\Delta l_{ци2} = \sqrt{l_{12,e}^2 + l_{12,g}^2 + 2l_{12,e} l_{12,g} \sin\{q_{20} - \arctg(l_{ef} / l_{12,f}) - \arctg[l_{gh} / (L_1 - l_{01,h})]\}} - \\ - \sqrt{l_{12,e}^2 + l_{12,g}^2 + 2l_{12,e} l_{12,g} \sin\{q_{20} + \Delta q_2 - \arctg(l_{ef} / l_{12,f}) - \arctg[l_{gh} / (L_1 - l_{01,h})]\}};$$

- звено 2 (с рычагом)

$$\Delta l_{ци2} = \sqrt{l_{12,f}^2 + l_{12,g}^2 + 2l_{12,f} l_{12,g} \sin\{q_{20} + \varphi_2 + \arctg[l_{gh} / (L_1 - l_{01,h})]\}} - \\ - \sqrt{l_{12,f}^2 + l_{12,g}^2 + 2l_{12,f} l_{12,g} \sin\{q_{20} + \Delta q_2 + \varphi_2 + \arctg[l_{gh} / (L_1 - l_{01,h})]\}};$$

- звено 3 (без рычага)

$$\Delta l_{ци3} = \sqrt{l_{23,a}^2 + l_{23,c}^2 + 2l_{23,a} l_{23,c} \sin\{q_{30} - \arctg(l_{ab} / l_{23,b}) - \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d})]\}} - \\ - \sqrt{l_{23,a}^2 + l_{23,c}^2 + 2l_{23,a} l_{23,c} \sin\{q_{30} + \Delta q_3 - \arctg(l_{ab} / l_{23,b}) - \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d})]\}};$$

- звено 3 (с рычагом)

$$\Delta l_{243} = \sqrt{l_{23,b}^2 + l_{23,c}^2 + 2l_{23,b}l_{23,c} \sin\{q_{30} + \varphi_3 + \arctg[l_{cd}/(L_2 - l_{12,d})]\}} - \sqrt{l_{23,b}^2 + l_{23,c}^2 + 2l_{23,b}l_{23,c} \sin\{q_{30} + \Delta q_3 + \varphi_3 + \arctg[l_{cd}/(L_2 - l_{12,d})]\}}.$$

Тяговые усилия  $U_{242}$  и  $U_{243}$ , развиваемые гидродвигателями при повороте звеньев 2 и 3, зависят от положения звеньев в пространстве и поэтому их наибольшие значения  $U_{242}^{\max}$  и  $U_{243}^{\max}$  определяются путем нахождения максимума следующих зависимостей при варьировании координат  $q_2$  и  $q_3$  в допустимых интервалах изменения  $q_2 \in [0; \Delta q_2]$  и  $q_3 \in [0; \Delta q_3]$ :

- звено 2 (без рычага)

$$U_{242} = \frac{\zeta_{f2}}{l_{12,f} \sin \mu_2 + 2l_{ef} \cos \mu_2} \{G_n[L_2 \cos(q_2 + q_{20}) + L_3 \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30})] + \rho g \delta_2 L_2^2 [(t_{b2} + 2t_{e2})/3 + s_2 - 2\delta_2] \cos(q_2 + q_{20}) + \rho g \delta_3 L_3 (t_{b3} + t_{e3} + 2s_3 - 4\delta_3) \sqrt{L_2^2 + L_3^2/4 + L_2 L_3 \sin(q_3 + q_{30})} \cos \gamma_2\};$$

- звено 2 (с рычагом)

$$U_{242} = -\zeta_{f2} \frac{\sqrt{l_{12,f}^2 + l_{12,g}^2 + 2l_{12,f}l_{12,g} \sin\{q_2 + q_{20} + \varphi_2 + \arctg[l_{gh}/(L_1 - l_{01,h})]\}}}{l_{12,f}l_{12,g} \cos\{q_2 + q_{20} + \varphi_2 + \arctg[l_{gh}/(L_1 - l_{01,h})]\}} \times \{G_n[L_2 \cos(q_2 + q_{20}) + L_3 \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30})] + \rho g \delta_2 L_2^2 [(t_{b2} + 2t_{e2})/3 + s_2 - 2\delta_2] \cos(q_2 + q_{20}) + \rho g \delta_3 L_3 (t_{b3} + t_{e3} + 2s_3 - 4\delta_3) \sqrt{L_2^2 + L_3^2/4 + L_2 L_3 \sin(q_3 + q_{30})} \cos \gamma_2\};$$

- звено 3 (без рычага)

$$U_{243} = \zeta_{f3} \frac{\{G_n L_3 + \rho g \delta_3 [(t_b + s_3 - 2\delta_3 + t_{e3})L_3^2 + (t_{b3} - t_{e3})l_{23,b}^2]/2\} \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30})}{l_{23,d} \sin \mu_3 + 2l_{ab} \cos \mu_3};$$

- звено 3 (с рычагом)

$$U_{243} = -\zeta_{f3} \frac{\sqrt{l_{23,b}^2 + l_{23,c}^2 + 2l_{23,b}l_{23,c} \sin\{q_3 + q_{30} + \varphi_3 + \arctg[l_{cd}/(L_2 - l_{12,d})]\}}}{l_{23,b}l_{23,c} \cos\{q_3 + q_{30} + \varphi_3 + \arctg[l_{cd}/(L_2 - l_{12,d})]\}} \times L_3 \{G_n + \rho g \delta_3 L_3 [(t_{b3} + 2t_{e3})/3 + s_3 - 2\delta_3] \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30})\},$$

где  $\rho$  - плотность материала металлоконструкции звеньев;  $g$  - ускорение свободного падения;

$$\gamma_2 = q_2 + q_{20} - \arccos \left[ \frac{2L_2 + L_3 \sin(q_3 + q_{30})}{2\sqrt{L_2^2 + L_3^2/4 + L_2 L_3 \sin(q_3 + q_{30})}} \right];$$

$$\mu_2 = \arctg(l_{12,f}/l_{ef}) - \pi/2 +$$

$$+ \arccos \left[ \frac{l_{12,e}l_{12,g} \sin\{q_2 + q_{20} - \arctg(l_{ef}/l_{12,f}) - \arctg[l_{gh}/(L_1 - l_{01,h})]\}}{\sqrt{l_{12,e}^2 + l_{12,g}^2 + 2l_{12,e}l_{12,g} \sin\{q_2 + q_{20} - \arctg(l_{ef}/l_{12,f}) - \arctg[l_{gh}/(L_1 - l_{01,h})]\}} \right];$$

$$\mu_3 = \arctg(l_{23,b}/l_{ab}) - \pi/2 +$$

$$+ \arccos \left[ \frac{l_{23,a}l_{23,c} \sin\{q_3 + q_{30} - \arctg(l_{ab}/l_{23,b}) - \arctg[l_{cd}/(L_2 - l_{12,d})]\}}{\sqrt{l_{23,a}^2 + l_{23,c}^2 + 2l_{23,a}l_{23,c} \sin\{q_3 + q_{30} - \arctg(l_{ab}/l_{23,b}) - \arctg[l_{cd}/(L_2 - l_{12,d})]\}} \right].$$

Изгибающие моменты в вертикальной плоскости в характерных  $k$ -х сечениях грузоподъемной стрелы, возникающие при повороте звеньев, зависят от положения звеньев в пространстве и поэтому их наибольшие значения  $M_k^{\max}$  определяются путем нахождения мак-

сумма следующих зависимостей при варьировании координат  $q_2$  и  $q_3$  в допустимых интервалах изменения  $q_2 \in [0; \Delta q_2]$  и  $q_3 \in [0; \Delta q_3]$ :

- звено 1

$$M_{01} = 0,5\zeta_1 \rho g L_2^2 \delta_2 (t_{b2} + t_{e2} + 2s_2 - 4\delta_2) \cos(q_2 + q_{20}) + \\ + \rho g [L_2 \cos(q_2 + q_{20}) + 0,5L_3 \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30})] L_3 \delta_3 (t_{b3} + t_{e3} + 2s_3 - 4\delta_3) + \\ + [L_2 \cos(q_2 + q_{20}) + L_3 \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30})] G_n;$$

если звено 2 без рычага

$$M_h = \zeta_{f1} U_{\text{зв2}} l_{gh} \cos \varepsilon_1 + \zeta_{f1} (L_1 - l_{01,h}) \{ [G_n + \rho g L_3 \delta_3 (t_{b3} + t_{e3} + 2s_3 - 4\delta_3)] \sin(q_2 + q_{20}) + \\ + U_{\text{зв2}} [\cos(q_2 + q_{20}) \cos \mu_2 - \sin(q_2 + q_{20}) \sin \mu_2] + U_{\text{зв3}} [\cos(q_2 + q_{20}) \cos \phi_3 - \sin(q_2 + q_{20}) \sin \phi_3] \};$$

если звено 2 с рычагом

$$M_h = \zeta_{f1} \{ [G_n + \rho g L_3 \delta_3 (t_{b3} + t_{e3} + 2s_3 - 4\delta_3)] \sin(q_2 + q_{20}) + \\ + U_{\text{зв2}} [\cos(q_2 + q_{20}) \cos \mu_2 - \sin(q_2 + q_{20}) \sin \mu_2 + \sin \phi_1] + \\ + U_{\text{зв3}} [\cos(q_2 + q_{20}) \cos \phi_3 - \sin(q_2 + q_{20}) \sin \phi_3] \} - \zeta_{f1} U_{\text{зв2}} l_{gh} \cos \phi_1;$$

- звено 2 (без рычага)

если звено 3 без рычага

$$M_d = \zeta_{f2} (L_2 - l_{12,d}) \{ [G_n + \rho g \delta_3 L_3 (t_{b3} + t_{e3} + 2s_3 - 4\delta_3)] \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30}) - \\ - U_{\text{зв3}} \sin \mu_3 \} \sin(q_3 + q_{30}) + 0,5 \rho g (L_2 - l_{12,d}) \delta_2 (t_d + t_{e2} + 2s_2 - 4\delta_2) \cos(q_2 + q_{20}); \\ M_f = \zeta_{f2} (L_2 - l_{12,f}) \{ [G_n + \rho g \delta_3 L_3 (t_{b3} + t_{e3} + 2s_3 - 4\delta_3)] \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30}) - \\ - U_{\text{зв3}} \sin \mu_3 \} \sin(q_3 + q_{30}) + 0,5 \rho g (L_2 - l_{12,f}) \delta_2 (t_f + t_{e2} + 2s_2 - 4\delta_2) \cos(q_2 + q_{20}) - \\ - \zeta_{f2} U_{\text{зв3}} [l_{cd} \cos \varepsilon_2 + (l_{12,d} - l_{12,f}) \sin \varepsilon_2];$$

если звено 3 с рычагом

$$M_d = \zeta_{f2} (L_2 - l_{12,d}) \{ [G_n + \rho g L_3 \delta_3 (t_{b3} + t_{e3} + 2s_3 - 4\delta_3)] [\cos(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30}) \cos(q_3 + q_{30}) + \\ + \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30}) \sin(q_3 + q_{30})] + 0,5 \rho g (L_2 - l_{12,d}) \delta_2 (t_d + t_{e2} + 2s_2 - 4\delta_2) + \\ - U_{\text{зв3}} \sin \left[ \arccos \left( \frac{l_{23,b} + l_{23,c} \sin \{q_3 + q_{30} + \varphi_3 + \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d})\]} }{\sqrt{l_{23,b}^2 + l_{23,c}^2 + 2l_{23,b} l_{23,c} \sin \{q_3 + q_{30} + \varphi_3 + \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d})\]}} \right) \right] + \\ + \rho g l_{23,b} \delta_3 (t_b + t_{b3} + 2s_3 - 4\delta_3) [\cos(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30} + \varphi_3) \cos(q_3 + q_{30} + \varphi_3) + \\ + \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30} + \varphi_3) \sin(q_3 + q_{30} + \varphi_3)] \} + U_{\text{зв3}} l_{cd} \cos \phi_3; \\ M_f = \zeta_{f2} (L_2 - l_{12,f}) \{ [G_n + \rho g L_3 \delta_3 (t_{b3} + t_{e3} + 2s_3 - 4\delta_3)] [\cos(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30}) \cos(q_3 + q_{30}) + \\ + \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30}) \sin(q_3 + q_{30})] + 0,5 \rho g (L_2 - l_{12,f}) \delta_2 (t_f + t_{e2} + 2s_2 - 4\delta_2) + \\ - U_{\text{зв3}} \sin \left[ \arccos \left( \frac{l_{23,b} + l_{23,c} \sin \{q_3 + q_{30} + \varphi_3 + \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d})\]} }{\sqrt{l_{23,b}^2 + l_{23,c}^2 + 2l_{23,b} l_{23,c} \sin \{q_3 + q_{30} + \varphi_3 + \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d})\]}} \right) \right] + \\ + \rho g l_{23,b} \delta_3 (t_b + t_{b3} + 2s_3 - 4\delta_3) [\cos(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30} + \varphi_3) \cos(q_3 + q_{30} + \varphi_3) + \\ + \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30} + \varphi_3) \sin(q_3 + q_{30} + \varphi_3)] \} + U_{\text{зв3}} l_{cd} \cos \phi_3;$$

- звено 2 (с рычагом)

если звено 3 без рычага

$$M_d = \zeta_{f2} (L_2 - l_{12,d}) \{ [G_n + \rho g \delta_3 L_3 (t_{b3} + t_{e3} + 2s_3 - 4\delta_3)] \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30}) - \\ - U_{\text{зв3}} \sin \mu_3 \} \sin(q_3 + q_{30}) + 0,5 \rho g (L_2 - l_{12,d}) \delta_2 (t_d + t_{e2} + 2s_2 - 4\delta_2) \cos(q_2 + q_{20}); \\ M_{12} = \zeta_{f2} L_2 \{ [G_n + \rho g \delta_3 L_3 (t_{b3} + t_{e3} + 2s_3 - 4\delta_3)] \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30}) -$$

$$-U_{\alpha_3} \sin \mu_3 \{ \sin(q_3 + q_{30}) + 0,5 \rho g L_2 \delta_2 (t_{b_2} + t_{e_2} + 2s_2 - 4\delta_2) \cos(q_2 + q_{20}) \} - \\ - \zeta_{f_2} U_{\alpha_3} [l_{cd} \cos \varepsilon_2 + l_{12,d} \sin \varepsilon_2];$$

если звено 3 с рычагом

$$M_d = \zeta_{f_2} (L_2 - l_{12,d}) \{ [G_n + \rho g L_3 \delta_3 (t_{b_3} + t_{e_3} + 2s_3 - 4\delta_3)] [\cos(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30}) \cos(q_3 + q_{30}) + \\ + \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30}) \sin(q_3 + q_{30})] + 0,5 \rho g (L_2 - l_{12,d}) \delta_2 (t_d + t_{e_2} + 2s_2 - 4\delta_2) +$$

$$-U_{\alpha_3} \sin \left[ \arccos \left( \frac{l_{23,b} + l_{23,c} \sin \{ q_3 + q_{30} + \varphi_3 + \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d}) \]} \right)}{\sqrt{l_{23,b}^2 + l_{23,c}^2 + 2l_{23,b}l_{23,c} \sin \{ q_3 + q_{30} + \varphi_3 + \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d}) \]}} \right) \right] +$$

$$+ \rho g l_{23,b} \delta_3 (t_b + t_{b_3} + 2s_3 - 4\delta_3) [\cos(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30} + \varphi_3) \cos(q_3 + q_{30} + \varphi_3) + \\ + \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30} + \varphi_3) \sin(q_3 + q_{30} + \varphi_3)] \} + U_{\alpha_3} l_{cd} \cos \phi_3;$$

$$M_{12} = \zeta_{f_2} L_2 \{ [G_n + \rho g L_3 \delta_3 (t_{b_3} + t_{e_3} + 2s_3 - 4\delta_3)] [\cos(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30}) \cos(q_3 + q_{30}) + \\ + \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30}) \sin(q_3 + q_{30})] + 0,5 \rho g L_2 \delta_2 (t_{b_2} + t_{e_2} + 2s_2 - 4\delta_2) +$$

$$-U_{\alpha_3} \sin \left[ \arccos \left( \frac{l_{23,b} + l_{23,c} \sin \{ q_3 + q_{30} + \varphi_3 + \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d}) \]} \right)}{\sqrt{l_{23,b}^2 + l_{23,c}^2 + 2l_{23,b}l_{23,c} \sin \{ q_3 + q_{30} + \varphi_3 + \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d}) \]}} \right) \right] +$$

$$+ \rho g l_{23,b} \delta_3 (t_b + t_{b_3} + 2s_3 - 4\delta_3) [\cos(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30} + \varphi_3) \cos(q_3 + q_{30} + \varphi_3) + \\ + \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30} + \varphi_3) \sin(q_3 + q_{30} + \varphi_3)] \} + U_{\alpha_3} l_{cd} \cos \phi_3;$$

- звено 3 (с рычагом)

$$M_{23} = \zeta_{f_3} L_3 \{ G_n + \rho g L_3 \delta_3 [(t_{b_3} + 2t_{e_3}) / 3 + s_3 - 2\delta_3] \} \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30});$$

- звено 3 (без рычага)

$$M_b = \zeta_{f_3} \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30}) \times$$

$$\times \{ (L_3 - l_{23,b}) [G_n + \rho g \delta_3 (t_{b_3} + s_3 - 2\delta_3) (L_3 + l_{23,b})] + 2 \rho g \delta_3 (t_{e_3} - t_b) (L_3^2 + L_3 l_{23,b} + l_{23,b}^2) \},$$

где

$$\varepsilon_1 = \pi - (q_2 + q_{20}) - \arctg(l_{12,f} / l_{ef}) -$$

$$- \arccos \left( \frac{l_{12,e} + l_{12,g} \sin \{ q_2 + q_{20} - \arctg(l_{ef} / l_{12,f}) - \arctg[l_{gh} / (L_1 - l_{01,h}) \]} \right)}{\sqrt{l_{12,e}^2 + l_{12,g}^2 + 2l_{12,e}l_{12,g} \sin \{ q_2 + q_{20} - \arctg(l_{ef} / l_{12,f}) - \arctg[l_{gh} / (L_1 - l_{01,h}) \]}} \right);$$

$$\varepsilon_2 = \pi - (q_3 + q_{30}) - \arctg(l_{23,b} / l_{ab}) -$$

$$- \arccos \left( \frac{l_{23,a} + l_{12,c} \sin \{ q_3 + q_{30} - \arctg[l_{ab} / l_{23,b}] - \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d}) \]} \right)}{\sqrt{l_{23,a}^2 + l_{12,c}^2 + 2l_{23,a}l_{12,c} \sin \{ q_3 + q_{30} - \arctg[l_{ab} / l_{23,b}] - \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d}) \]}} \right);$$

$$\phi_3 = \arctg [(L_2 - l_{12,d}) / l_{cd}] - \frac{\pi}{2} +$$

$$+ \arccos \left( \frac{l_{23,c} + l_{23,b} \sin \{ q_3 + q_{30} + \varphi_3 + \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d}) \]} \right)}{\sqrt{l_{23,b}^2 + l_{23,c}^2 + 2l_{23,b}l_{23,c} \sin \{ q_3 + q_{30} + \varphi_3 + \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d}) \]}} \right).$$

Опыт проектирования звеньев манипуляционных систем мобильных машин показывает, что прочность таких конструкций обусловлена, главным образом, их изгибной прочностью и характеризуется величиной нормальных напряжений изгиба в поперечных сечениях по длине звена [10-13]. Однако поперечных сечений свободных концов звеньев, где изгибающие моменты близки к 0, прочность звеньев определяется действием поперечной силы и характеризуется величиной касательных напряжений. Для рассматриваемой трехзвенной манипуляционной системы (рис. 4) такими сечениями являются: *G* (для всех вариантов конструктивного исполнения манипуляционной системы) и дополнительно 12 и 23 (для вариан-

та 1), 12 и  $b$  (для варианта 2), 23 и  $f$  (для варианта 3),  $b$  и  $f$  (для варианта 4). Поперечные силы в вертикальной плоскости в указанных сечениях, возникающие при повороте звеньев, зависят от положения звеньев в пространстве и поэтому их наибольшие значения  $Q_k^{\max}$  определяются путем нахождения максимума следующих зависимостей при варьировании координат  $q_2$  и  $q_3$  в допустимых интервалах изменения  $q_2 \in [0; \Delta q_2]$  и  $q_3 \in [0; \Delta q_3]$ :

- звено 1

$$Q_{12} = \zeta_{f1} \{ [G_n + \rho g L_3 \delta_3 (t_{b3} + t_{e3} + 2s_3 - 4\delta_3)] \sin(q_2 + q_{20}) + U_{\text{ц}2} [\cos(q_2 + q_{20}) \cos \mu_2 - \sin(q_2 + q_{20}) \sin \mu_2] + U_{\text{ц}3} [\cos(q_2 + q_{20}) \cos \phi_3 - \sin(q_2 + q_{20}) \sin \phi_3] \};$$

если звено 2 без рычага

$$Q_{12} = \zeta_{f1} \{ [G_n + \rho g L_3 \delta_3 (t_{b3} + t_{e3} + 2s_3 - 4\delta_3)] \sin(q_2 + q_{20}) + U_{\text{ц}2} [\cos(q_2 + q_{20}) \cos \mu_2 - \sin(q_2 + q_{20}) \sin \mu_2 + \sin \varepsilon_1] + U_{\text{ц}3} [\cos(q_2 + q_{20}) \cos \phi_3 - \sin(q_2 + q_{20}) \sin \phi_3] \};$$

если звено 2 с рычагом

$$Q_{12} = \zeta_{f1} \{ [G_n + \rho g L_3 \delta_3 (t_{b3} + t_{e3} + 2s_3 - 4\delta_3)] \sin(q_2 + q_{20}) + U_{\text{ц}2} [\cos(q_2 + q_{20}) \cos \mu_2 - \sin(q_2 + q_{20}) \sin \mu_2 + \sin \phi_1] + U_{\text{ц}3} [\cos(q_2 + q_{20}) \cos \phi_3 - \sin(q_2 + q_{20}) \sin \phi_3] \};$$

- звено 2 (без рычага)

если звено 3 без рычага

$$Q_{12} = \zeta_{f2} \{ [G_n + \rho g \delta_3 L_3 (t_{b3} + t_{e3} + 2s_3 - 4\delta_3)] \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30}) - U_{\text{ц}3} \sin \mu_3 \sin(q_3 + q_{30}) + \rho g L_2 \delta_2 (t_{b2} + t_{e2} + 2s_2 - 4\delta_2) \cos(q_2 + q_{20}) - U_{\text{ц}2} \sin \mu_2 - U_{\text{ц}3} \sin \varepsilon_3 \};$$

$$Q_{23} = \zeta_{f3} \{ [G_n + \rho g \delta_3 L_3 (t_{b3} + t_{e3} + 2s_3 - 4\delta_3)] \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30}) - U_{\text{ц}3} \sin \mu_3 \sin(q_3 + q_{30}) \};$$

если звено 3 с рычагом

$$Q_{12} = \zeta_{f2} \{ [G_n + \rho g L_3 (t_{b3} + t_{e3} + 2s_3 - 4\delta_3)] [\sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30}) \cos(q_3 + q_{30}) + \cos(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30}) \sin(q_3 + q_{30})] - U_{\text{ц}2} \sin \mu_2 - U_{\text{ц}3} \sin \phi_3 + \rho g L_2 \delta_2 (t_{b2} + t_{e2} + 2s_2 - 4\delta_2) \};$$

$$Q_{23} = \zeta_{f3} \{ [G_n + \rho g L_3 (t_{b3} + t_{e3} + 2s_3 - 4\delta_3)] [\cos(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30}) \cos(q_3 + q_{30}) + \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30}) \sin(q_3 + q_{30})] + \rho g l_{23,b} \delta_3 (t_b + t_{b1} + 2s_3 - 4\delta_3) \} -$$

$$- \zeta_{f3} U_{\text{ц}3} \sin \left[ \arccos \left( \frac{l_{23,b} + l_{23,c} \sin \{q_3 + q_{30} + \varphi_3 + \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d})]\}}{\sqrt{l_{23,b}^2 + l_{23,c}^2 + 2l_{23,b}l_{23,c} \sin \{q_3 + q_{30} + \varphi_3 + \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d})]\}}} \right) \right];$$

- звено 2 (с рычагом)

$$Q_f = Q_{12} = U_{\text{ц}2} \sin \left[ \arccos \left( \frac{l_{12,f} + l_{12,g} \sin \{q_2 + q_{20} + \varphi_2 + \arctg[l_{gh} / (L_1 - l_{01,h})]\}}{\sqrt{l_{12,f}^2 + l_{12,g}^2 + 2l_{12,f}l_{12,g} \sin \{q_2 + q_{20} + \varphi_2 + \arctg[l_{gh} / (L_1 - l_{01,h})]\}}} \right) \right];$$

если звено 3 без рычага

$$Q_{23} = \zeta_{f3} \{ [G_n + \rho g \delta_3 L_3 (t_{b3} + t_{e3} + 2s_3 - 4\delta_3)] \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30}) - U_{\text{ц}3} \sin \mu_3 \sin(q_3 + q_{30}) \};$$

если звено 3 с рычагом

$$Q_{23} = \zeta_{f3} \{ [G_n + \rho g L_3 (t_{b3} + t_{e3} + 2s_3 - 4\delta_3)] [\cos(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30}) \cos(q_3 + q_{30}) + \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30}) \sin(q_3 + q_{30})] + \rho g l_{23,b} \delta_3 (t_b + t_{b1} + 2s_3 - 4\delta_3) \} -$$

$$- \zeta_{f3} U_{\text{ц}3} \sin \left[ \arccos \left( \frac{l_{23,b} + l_{23,c} \sin \{q_3 + q_{30} + \varphi_3 + \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d})]\}}{\sqrt{l_{23,b}^2 + l_{23,c}^2 + 2l_{23,b}l_{23,c} \sin \{q_3 + q_{30} + \varphi_3 + \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d})]\}}} \right) \right];$$

- звено 3 (без рычага)

$$Q_b = \zeta_{f3} [G_n + \rho g \delta_3 (L_3 - l_{23,b}) (t_b + t_{e3} + 2s_3 - 4\delta_3)] \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30});$$

$$Q_{23} = \zeta_{f3} [G_n + \rho g \delta_3 L_3 (t_{b3} + t_{e3} + 2s_3 - 4\delta_3)] \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30}) - U_{\text{ц}3} \sin \mu_3;$$

- звено 3 (с рычагом)

$$Q_b = U_{\varepsilon_3} \sin \left[ \arccos \left( \frac{l_{23,b} + l_{23,c} \sin \{q_3 + q_{30} + \varphi_3 + \arctg[l_{cd}/(L_2 - l_{12,d})]\}}{\sqrt{l_{23,b}^2 + l_{23,c}^2 + 2l_{23,b}l_{23,c} \sin \{q_3 + q_{30} + \varphi_3 + \arctg[l_{cd}/(L_2 - l_{12,d})]\}}} \right) \right];$$

$$Q_{23} = \zeta_{f3} \{ [G_n + \rho g L_3 (t_{b3} + t_{e3} + 2s_3 - 4\delta_3)] \sin(q_2 + q_3 + q_{20} + q_{30});$$

где

$$\varepsilon_3 = \pi - (q_3 + q_{30}) - \arctg(l_{23,u}/l_{ab}) -$$

$$- \arccos \left( \frac{l_{23,a} + l_{23,c} \sin \{q_3 + q_{30} - \arctg(l_{ab}/l_{23,b}) - \arctg[l_{cd}/(L_2 - l_{12,d})]\}}{\sqrt{l_{23,a}^2 + l_{23,c}^2 + 2l_{23,a}l_{23,c} \sin \{q_3 + q_{30} - \arctg(l_{ab}/l_{23,b}) - \arctg[l_{cd}/(L_2 - l_{12,d})]\}}} \right);$$

$$\phi_1 = \arctg[(L_1 - l_{01,h})/l_{gh}] - \frac{\pi}{2} +$$

$$+ \arccos \left( \frac{l_{12,g} + l_{12,f} \sin \{q_2 + q_{20} + \varphi_2 + \arctg[l_{gh}/(L_1 - l_{01,h})]\}}{\sqrt{l_{12,g}^2 + l_{12,f}^2 + 2l_{12,g}l_{12,f} \sin \{q_2 + q_{20} + \varphi_2 + \arctg[l_{gh}/(L_1 - l_{01,h})]\}}} \right).$$

Звено 1 манипуляционной системы выполняет роль стойки, воспринимающей при эксплуатации мобильной транспортно-технологической машины вертикально направленные нагрузки – вес груза (включая вес грузозахватного устройства), собственный вес звеньев и инерционных нагрузок. Продольная сжимающая нагрузка в характерных сечениях стойки определяется зависимостями

$$N_{01} = \zeta_{f1} [G_n + \rho g \sum_{j=1}^{j=3} L_j \delta_j (t_{bj} + t_{ej} + 2s_j - 4\delta_j)];$$

$$N_{12} = \zeta_{f1} [G_n + \rho g \sum_{j=2}^{j=3} L_j \delta_j (t_{bj} + t_{ej} + 2s_j - 4\delta_j)].$$

Целевая функция для проведения предпроектной двухкритериальной оптимизации  $i$ -го варианта конструктивного исполнения гидрофицированной манипуляционной системы, базирующаяся на целевой функции со структурой типа (1), выражается зависимостью:

$$C_i(\{x\}_i, \{z\}_i) = \sqrt{w_1 \left[ 1 - \frac{C_{M_i}(\{x\}_{M_i}^{opt}, \{z\}_{M_i}^{opt})}{C_{M_i}(\{x\}_i, \{z\}_i)} \right]^2 + w_2 \left[ 1 - \frac{C_{N_i}(\{x\}_{N_i}^{opt}, \{z\}_{N_i}^{opt})}{C_{N_i}(\{x\}_i, \{z\}_i)} \right]^2} \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $C_{M_i}, C_{N_i}$  - целевые функции задачи однокритериальной оптимизации показателей качества  $M_{ms}$  и  $N_n$  соответственно;  $\{x\}_{M_i}^{opt} (\{x\}_{N_i}^{opt}), \{z\}_k^{opt} (\{z\}_{N_i}^{opt})$  – векторы управляемых и неуправляемых параметров в точке оптимума показателя качества  $M_{ms}$  ( $N_n$ ) при однокритериальной оптимизации.

Нахождение минимума целевой функции (4), а также векторов  $\{x\}_i^{opt}$  и  $\{z\}_i^{opt}$  в точке ее оптимума должно выполняться с учетом системы ограничений неравенствами, в общем виде выражающими:

- условия компоновки звеньев;
- условия компоновки гидроцилиндров звеньев;
- допустимое сочетание габаритных размеров поперечных сечений звеньев;
- условия обеспечения требуемых размеров рабочей зоны манипуляционной системы;
- возможность подбора объемного насоса, выпускаемого промышленностью;
- возможность подбора стандартизованного гидроцилиндра для подъемно-транспортной техники;
- условия изгибной прочности характерных сечений звеньев манипуляционной системы;
- условия прочности характерных сечений звеньев манипуляционной системы при действии поперечной силы;
- условия прочности характерных сечений звена 1 при действии продольной силы;

- условие обеспечение устойчивости звена 1 при действии продольной сжимающей нагрузки с внецентренным изгибом.

Конкретное сочетание перечисленных условий и их математическое выражение определяются конкретным вариантом конструктивного исполнения трехзвенной манипуляционной системы (рис. 4). Ниже приведены системы ограничений применительно ко всем возможным вариантам.

*Вариант № 1 конструктивного исполнения манипуляционной системы (рис. 4).*

Общие условия компоновки звеньев:

$$\begin{aligned} L_1 - l_{01,h} \geq 0; \quad L_2 - l_{12,d} \geq 0; \quad l_{12,d} - l_{12,f} \geq 0; \quad L_3 - l_{23,b} \geq 0; \quad l_{ab} - 0,7t_b \geq 0; \quad l_{cd} - 0,7t_d \geq 0; \\ l_{ef} - 0,7t_f \geq 0; \quad l_{gh} - 0,7t_h \geq 0; \quad t_f - t_{b2} - (t_{e2} - t_{b2})l_{12,f} / L_2 \geq 0; \quad t_b - t_{b3} - (t_{e3} - t_{b3})l_{23,b} / L_3 \geq 0; \\ t_h - t_{b1} - (t_{e1} - t_{b1})l_{01,h} / L_1 \geq 0; \quad t_d - t_{b2} - (t_{e2} - t_{b2})l_{12,d} / L_2 \geq 0; \quad t_{e1} - t_{b2} \geq 0; \quad t_{e2} - t_{b3} \geq 0; \\ t_{b1} - t_{e1} \geq 0; \quad t_{b2} - t_{e2} \geq 0; \quad t_{b3} - t_{e3} \geq 0; \quad q_{20} - \pi/3 \geq 0; \quad \pi/6 - q_{20} \geq 0; \quad q_{30} - \pi/3 \geq 0; \\ \pi/6 - q_{30} \geq 0; \quad \pi/2 - q_{20} - \Delta q_2 \geq 0; \quad \pi/2 - q_{30} - \Delta q_3 \geq 0. \end{aligned}$$

Условия компоновки гидроцилиндров звеньев:

$$\begin{aligned} \sqrt{l_{12,e}^2 + l_{12,g}^2 + 2l_{12,e}l_{12,g} \sin\{q_{20} - \arctg(l_{ef} / l_{12,f}) - \arctg[l_{gh} / (L_1 - l_{01,h})]\}} - \Delta l_{cy2} \geq 0; \\ \sqrt{l_{23,a}^2 + l_{23,c}^2 + 2l_{23,a}l_{23,c} \sin\{q_{30} - \arctg(l_{ab} / l_{23,b}) - \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d})]\}} - \Delta l_{cy3} \geq 0. \end{aligned}$$

Допустимое сочетание габаритных размеров поперечных сечений звеньев:

$$\begin{aligned} s_1 / t_{b1} - \xi_s^{\min} \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_1 / t_{b1} \geq 0; \quad s_1 / t_{e1} - \xi_s^{\min} \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_1 / t_{e1} \geq 0; \\ s_2 / t_{b2} - \xi_s^{\min} \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_2 / t_{b2} \geq 0; \quad s_2 / t_{e2} - \xi_s^{\min} \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_2 / t_{e2} \geq 0; \\ s_3 / t_{b3} - \xi_s^{\min} \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_3 / t_{b3} \geq 0; \quad s_3 / t_{e3} - \xi_s^{\min} \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_3 / t_{e3} \geq 0; \\ s_1 / t_h - \xi_s^{\min} \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_1 / t_h \geq 0; \quad s_2 / t_f - \xi_s^{\min} \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_2 / t_f \geq 0; \\ \xi_s^{\max} - s_2 / t_d \geq 0; \quad s_2 / t_d - \xi_s^{\min} \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_3 / t_b \geq 0; \quad s_3 / t_b - \xi_s^{\min} \geq 0; \\ \xi_s^{\max} - s_1 / s_2; \quad s_2 / s_1 - \xi_s^{\min}; \quad \xi_s^{\max} - s_2 / s_3; \quad s_3 / s_2 - \xi_s^{\min}; \\ s_1 - 3\delta_1 \geq 0; \quad s_2 - 3\delta_2 \geq 0; \quad s_3 - 3\delta_3 \geq 0. \end{aligned}$$

Условия обеспечения требуемых размеров рабочей зоны манипуляционной системы:

$$\begin{aligned} (L_2 + L_3) \cos q_{20} - R_{\max} \geq 0; \quad Y_{\min} - L_1 - L_2 \sin q_{20} + L_3 \cos(q_{20} + q_{30}) \geq 0; \\ R_{\min} - L_2 \cos(q_{20} + \Delta q_2) - L_3 \sin(q_{20} + q_{30} + \Delta q_2 + \Delta q_3) \geq 0; \\ L_1 + L_2 \sin(q_{20} + \Delta q_2) - \cos(q_{20} + q_{30} + \Delta q_2 + \Delta q_3) - Y_{\max} \geq 0. \end{aligned}$$

Возможность подбора объемного насоса, выпускаемого промышленностью:

$$p_n - p_{n,\min} \geq 0; \quad p_{n,\max} - p_n \geq 0; \quad Q_{n,\max} - \pi(D_{cy2}^2 v_{cy2,\max} + D_{cy3}^2 v_{cy3,\max}) / 4 \geq 0.$$

Возможность подбора стандартизованного гидроцилиндра для подъемно-транспортной техники:

$$\begin{aligned} p_{cy,\max} - p_n \geq 0; \quad D_{cy,\max} - D_{cy2} \geq 0; \quad D_{cy,\max} - D_{cy3} \geq 0; \quad \Delta L_{cy,\max} - \Delta l_{cy2} \geq 0; \\ \Delta L_{cy,\max} - \Delta l_{cy3} \geq 0; \quad V_{cy,\max} - v_{cy2,\max}(\dot{q}_2) \geq 0; \quad V_{cy,\max} - v_{cy3,\max}(\dot{q}_3) \geq 0; \\ U_{cy,\max} - U_{cy2}^{\max} \geq 0; \quad U_{cy,\max} - U_{cy3}^{\max} \geq 0. \end{aligned}$$

Условия изгибной прочности характерных сечений звеньев манипуляционной системы:

$$\begin{aligned} [\sigma] - 6t_{b1}M_{01}^{\max} / [s_1 t_{b1}^3 - (s_1 - 2\delta_1)(t_{b1} - 2\delta_1)^3]; \quad [\sigma] - 6t_h M_h^{\max} / [s_1 t_h^3 - (s_1 - 2\delta_1)(t_h - 2\delta_1)^3]; \\ [\sigma] - 6t_b M_b^{\max} / [s_3 t_b^3 - (s_3 - 2\delta_3)(t_b - 2\delta_3)^3]; \quad [\sigma] - 6t_d M_d^{\max} / [s_2 t_d^3 - (s_2 - 2\delta_2)(t_d - 2\delta_2)^3]; \\ [\sigma] - 6t_f M_f^{\max} / [s_2 t_f^3 - (s_2 - 2\delta_2)(t_f - 2\delta_2)^3]. \end{aligned}$$

Условия прочности характерных сечений звеньев манипуляционной системы при действии поперечной силы:

$$\begin{aligned} [\tau] - 0,75\zeta_{f3}G_n / [\delta_3(t_{e3} + s_3 - 2\delta_3)] &\geq 0; & [\tau] - 0,75Q_b^{\max} / [\delta_3(t_b + s_3 - 2\delta_3)] &\geq 0; \\ [\tau] - 0,75Q_{23}^{\max} / [\delta_3(t_{e3} + s_3 - 2\delta_3)] &\geq 0; & [\tau] - 0,75Q_{23}^{\max} / [\delta_2(t_{e2} + s_2 - 2\delta_2)] &\geq 0; \\ [\tau] - 0,75Q_f^{\max} / [\delta_2(t_f + s_2 - 2\delta_2)] &\geq 0; & [\tau] - 0,75Q_{12}^{\max} / [\delta_2(t_{b2} + s_2 - 2\delta_2)] &\geq 0; \\ & & [\tau] - 0,75Q_{12}^{\max} / [\delta_1(t_{e1} + s_1 - 2\delta_1)] &\geq 0. \end{aligned}$$

Условия прочности характерных сечений звена 1 при действии продольной силы:

$$[\sigma] - 0,5N_{01} / [\delta_1(t_{b1} + s_1 - 2\delta_1)]; \quad [\sigma] - 0,5N_{12} / [\delta_1(t_{e1} + s_1 - 2\delta_1)].$$

Условие обеспечения устойчивости звена 1 при действии продольной сжимающей нагрузки с внецентренным изгибом:

$$2\varphi_e[\sigma]\delta_1(t_{b1} + s_1 - 2\delta_1) - N_{01} \geq 0.$$

В приведенных выше зависимостях используются следующие обозначения:  $\xi_s^{\min}, \xi_s^{\max}$

- минимальное и максимальное отношение ширины и высоты поперечного сечения звена;  $\xi_s^{\min}, \xi_s^{\max}$  - минимальное и максимальное отношение ширины поперечного сечения смежных звеньев;  $p_{n,\min} (p_{n,\max}), Q_{n,\max}$  - минимальное (максимальное) давление на выходе и максимальная объемная подача насосов, выпускаемых промышленностью;  $D_{cy,\max}, \Delta L_{cy,\max}, U_{cy,\max}, V_{cy,\max}$  - максимальные диаметр, ход, тяговое усилие и скорость штока стандартизованных гидроцилиндров;  $\zeta_{fj}$  - коэффициент перегрузки для  $j$ -го звена, учитывающий влияние дополнительной нагрузки от сил инерции, ветрового воздействия, веса гидроцилиндров и ребер жесткости звеньев и др.;  $[\sigma], [\tau]$  - допустимые нормальные и касательные напряжения в материале металлоконструкции звеньев;  $\varphi_e$  - коэффициент устойчивости при сжатии с изгибом.

*Вариант № 2 конструктивного исполнения манипуляционной системы (рис. 4).*

Общие условия компоновки звеньев:

$$\begin{aligned} L_1 - l_{01,h} &\geq 0; & L_2 - l_{12,d} &\geq 0; & l_{12,d} - l_{12,f} &\geq 0; & l_{12,d} - l_{12,f} &\geq 0; & L_3/3 - l_{23,b} &\geq 0; \\ l_{23,b} - 0,7t_{b3} &\geq 0; & t_{b3} - t_b &\geq 0; & t_b - t_{e3}/3 &\geq 0; & l_{ef} - 0,7t_f &\geq 0; & t_f - t_{b2} - (t_{e2} - t_{b2})l_{12,f}/L_2 &\geq 0; \\ l_{cd} - 0,7t_d &\geq 0; & l_{gh} - 0,7t_h &\geq 0; & t_h - t_{b1} - (t_{e1} - t_{b1})l_{01,h}/L_1 &\geq 0; & t_d - t_{b2} - (t_{e2} - t_{b2})l_{12,d}/L_2 &\geq 0; \\ t_{e1} - t_{b2} &\geq 0; & t_{e2} - t_{b3} &\geq 0; & t_{b1} - t_{e1} &\geq 0; & t_{b2} - t_{e2} &\geq 0; & t_{b3} - t_{e3} &\geq 0; & q_{20} - \pi/3 &\geq 0; \\ \pi/6 - q_{20} &\geq 0; & q_{30} - \pi/3 &\geq 0; & \pi/6 - q_{30} &\geq 0; & \pi/2 - q_{20} - \Delta q_2 &\geq 0; & \pi/2 - q_{30} - \Delta q_3 &\geq 0; \\ \varphi_3 - \pi/4 &\geq 0; & 5\pi/6 - \varphi_3 &\geq 0. \end{aligned}$$

Условия компоновки гидроцилиндров звеньев:

$$\begin{aligned} \sqrt{l_{12,e}^2 + l_{12,g}^2 + 2l_{12,e}l_{12,g} \sin\{q_{20} - \arctg(l_{ef}/l_{12,f}) - \arctg[l_{gh}/(L_1 - l_{01,h})]\}} - \Delta l_{cy2} &\geq 0; \\ \sqrt{l_{23,b}^2 + l_{23,c}^2 + 2l_{23,b}l_{23,c} \sin\{q_{30} + \Delta q_3 + \varphi_3 + \arctg[l_{cd}/(L_2 - l_{12,d})]\}} - \Delta l_{cy3} &\geq 0. \end{aligned}$$

Допустимое сочетание габаритных размеров поперечных сечений звеньев:

$$\begin{aligned} s_1/t_{b1} - \xi_s^{\min} &\geq 0; & \xi_s^{\max} - s_1/t_{b1} &\geq 0; & s_1/t_{e1} - \xi_s^{\min} &\geq 0; & \xi_s^{\max} - s_1/t_{e1} &\geq 0; & s_2/t_{b2} - \xi_s^{\min} &\geq 0; \\ \xi_s^{\max} - s_2/t_{b2} &\geq 0; & s_2/t_{e2} - \xi_s^{\min} &\geq 0; & \xi_s^{\max} - s_2/t_{e2} &\geq 0; & s_3/t_{b3} - \xi_s^{\min} &\geq 0; & \xi_s^{\max} - s_3/t_{b3} &\geq 0; \\ s_3/t_{e3} - \xi_s^{\min} &\geq 0; & \xi_s^{\max} - s_3/t_{e3} &\geq 0; & s_1/t_h - \xi_s^{\min} &\geq 0; & \xi_s^{\max} - s_1/t_h &\geq 0; & s_2/t_f - \xi_s^{\min} &\geq 0; \\ \xi_s^{\max} - s_2/t_f &\geq 0; & \xi_s^{\max} - s_2/t_d &\geq 0; & s_2/t_d - \xi_s^{\min} &\geq 0; & \xi_s^{\max} - s_3/t_b &\geq 0; & s_3/t_b - \xi_s^{\min} &\geq 0; \\ \xi_s^{\max} - s_1/s_2; & s_2/s_1 - \xi_s^{\min}; & \xi_s^{\max} - s_2/s_3; & s_3/s_2 - \xi_s^{\min}; & & & & & & \\ s_1 - 3\delta_1 &\geq 0; & s_2 - 3\delta_2 &\geq 0; & s_3 - 3\delta_3 &\geq 0. \end{aligned}$$

Условия обеспечения требуемых размеров рабочей зоны манипуляционной системы:

$$(L_2 + L_3) \cos q_{20} - R_{\max} \geq 0; \quad Y_{\min} - L_1 - L_2 \sin q_{20} + L_3 \cos(q_{20} + q_{30}) \geq 0;$$

$$R_{\min} - L_2 \cos(q_{20} + \Delta q_2) - L_3 \sin(q_{20} + q_{30} + \Delta q_2 + \Delta q_3) \geq 0;$$

$$L_1 + L_2 \sin(q_{20} + \Delta q_2) - \cos(q_{20} + q_{30} + \Delta q_2 + \Delta q_3) - Y_{\max} \geq 0.$$

Возможность подбора объемного насоса, выпускаемого промышленностью:

$$p_n - p_{n,\min} \geq 0; \quad p_{n,\max} - p_n \geq 0; \quad Q_{n,\max} - \pi(D_{\text{ц}2}^2 v_{\text{ц}2,\max} + D_{\text{ц}3}^2 v_{\text{ц}3,\max}) / 4 \geq 0.$$

Возможность подбора стандартизованного гидроцилиндра для подъемно-транспортной техники:

$$p_{\text{ц}2,\max} - p_n \geq 0; \quad D_{\text{ц}2,\max} - D_{\text{ц}2} \geq 0; \quad D_{\text{ц}2,\max} - D_{\text{ц}3} \geq 0; \quad \Delta L_{\text{ц}2,\max} - \Delta L_{\text{ц}2} \geq 0;$$

$$\Delta L_{\text{ц}2,\max} - \Delta L_{\text{ц}3} \geq 0; \quad V_{\text{ц}2,\max} - v_{\text{ц}2,\max} (\dot{q}_2) \geq 0; \quad V_{\text{ц}2,\max} - v_{\text{ц}3,\max} (\dot{q}_3) \geq 0;$$

$$U_{\text{ц}2,\max} - U_{\text{ц}2}^{\max} \geq 0; \quad U_{\text{ц}2,\max} - U_{\text{ц}3}^{\max} \geq 0.$$

Условия изгибной прочности характерных сечений звеньев манипуляционной системы:

$$[\sigma] - 6t_{b1} M_{01}^{\max} / [s_1 t_{b1}^3 - (s_1 - 2\delta_1)(t_{b1} - 2\delta_1)^3]; \quad [\sigma] - 6t_h M_h^{\max} / [s_1 t_h^3 - (s_1 - 2\delta_1)(t_h - 2\delta_1)^3];$$

$$[\sigma] - 6t_d M_d^{\max} / [s_2 t_d^3 - (s_2 - 2\delta_2)(t_d - 2\delta_2)^3]; \quad [\sigma] - 6t_f M_f^{\max} / [s_2 t_f^3 - (s_2 - 2\delta_2)(t_f - 2\delta_2)^3];$$

$$[\sigma] - 6t_{b3} M_{23}^{\max} / [s_3 t_{b3}^3 - (s_3 - 2\delta_3)(t_{b3} - 2\delta_3)^3] \geq 0.$$

Условия прочности характерных сечений звеньев манипуляционной системы при действии поперечной силы:

$$[\tau] - 0,75 \zeta_{f3} G_n / [\delta_3 (t_{e3} + s_3 - 2\delta_3)] \geq 0; \quad [\tau] - 0,75 Q_b^{\max} / [\delta_3 (t_b + s_3 - 2\delta_3)] \geq 0;$$

$$[\tau] - 0,75 Q_{23}^{\max} / [\delta_3 (t_{e3} + s_3 - 2\delta_3)] \geq 0; \quad [\tau] - 0,75 Q_{23}^{\max} / [\delta_2 (t_{e2} + s_2 - 2\delta_2)] \geq 0;$$

$$[\tau] - 0,75 Q_f^{\max} / [\delta_2 (t_f + s_2 - 2\delta_2)] \geq 0; \quad [\tau] - 0,75 Q_{12}^{\max} / [\delta_2 (t_{b2} + s_2 - 2\delta_2)] \geq 0;$$

$$[\tau] - 0,75 Q_{12}^{\max} / [\delta_1 (t_{e1} + s_1 - 2\delta_1)] \geq 0.$$

Условия прочности характерных сечений звена 1 при действии продольной силы:

$$[\sigma] - 0,5 N_{01} / [\delta_1 (t_{b1} + s_1 - 2\delta_1)]; \quad [\sigma] - 0,5 N_{12} / [\delta_1 (t_{e1} + s_1 - 2\delta_1)].$$

Условие обеспечения устойчивости звена 1 при действии продольной сжимающей нагрузки с внецентренным изгибом:

$$2\varphi_e [\sigma] \delta_1 (t_{b1} + s_1 - 2\delta_1) - N_{01} \geq 0.$$

Вариант № 3 конструктивного исполнения манипуляционной системы (рис. 4).

Общие условия компоновки звеньев:

$$L_1 - l_{01,h} \geq 0; \quad L_2 - l_{12,d} \geq 0; \quad l_{cd} - 0,7t_d \geq 0; \quad l_{gh} - 0,7t_h \geq 0; \quad L_3 - l_{23,b} \geq 0; \quad l_{ab} - 0,7t_b \geq 0;$$

$$t_b - t_{b3} - (t_{e3} - t_{b3})l_{23,b} / L_3 \geq 0; \quad L_2 / 3 - l_{12,f} \geq 0; \quad l_{12,f} - 0,7t_{b2} \geq 0; \quad t_{b2} - t_f \geq 0;$$

$$t_f - t_{e2} / 3 \geq 0; \quad t_h - t_{b1} - (t_{e1} - t_{b1})l_{01,h} / L_1 \geq 0; \quad t_d - t_{b2} - (t_{e2} - t_{b2})l_{12,d} / L_2 \geq 0;$$

$$t_{e1} - t_{b2} \geq 0; \quad t_{e2} - t_{b3} \geq 0; \quad t_{b1} - t_{e1} \geq 0; \quad t_{b2} - t_{e2} \geq 0; \quad t_{b3} - t_{e3} \geq 0; \quad q_{20} - \pi / 3 \geq 0;$$

$$\pi / 6 - q_{20} \geq 0; \quad q_{30} - \pi / 3 \geq 0; \quad \pi / 6 - q_{30} \geq 0; \quad \pi / 2 - q_{20} - \Delta q_2 \geq 0; \quad \pi / 2 - q_{30} - \Delta q_3 \geq 0;$$

$$\varphi_2 - \pi / 4 \geq 0; \quad 5\pi / 6 - \varphi_2 \geq 0.$$

Условия компоновки гидроцилиндров звеньев:

$$\sqrt{l_{23,a}^2 + l_{23,c}^2 + 2l_{23,a}l_{23,c} \sin\{q_{30} - \arctg(l_{ab} / l_{23,b}) - \arctg[l_{cd} / (L_2 - l_{12,d})]\}} - \Delta L_{\text{ц}3} \geq 0;$$

$$\sqrt{l_{12,f}^2 + l_{12,g}^2 + 2l_{12,f}l_{12,g} \sin\{q_{20} + \Delta q_2 + \varphi_2 + \arctg[l_{gh} / (L_1 - l_{01,h})]\}} - \Delta L_{\text{ц}2} \geq 0.$$

Допустимое сочетание габаритных размеров поперечных сечений звеньев:

$$s_1 / t_{b1} - \xi_s^{\min} \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_1 / t_{b1} \geq 0; \quad s_1 / t_{e1} - \xi_s^{\min} \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_1 / t_{e1} \geq 0; \quad s_2 / t_{b2} - \xi_s^{\min} \geq 0;$$

$$\xi_s^{\max} - s_2 / t_{b2} \geq 0; \quad s_2 / t_{e2} - \xi_s^{\min} \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_2 / t_{e2} \geq 0; \quad s_3 / t_{b3} - \xi_s^{\min} \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_3 / t_{b3} \geq 0;$$

$$s_3 / t_{e3} - \xi_s^{\min} \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_3 / t_{e3} \geq 0; \quad s_1 / t_h - \xi_s^{\min} \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_1 / t_h \geq 0; \quad s_2 / t_f - \xi_s^{\min} \geq 0;$$

$$\xi_s^{\max} - s_2 / t_f \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_2 / t_d \geq 0; \quad s_2 / t_d - \xi_s^{\min} \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_3 / t_b \geq 0; \quad s_3 / t_b - \xi_s^{\min} \geq 0;$$

$$\zeta_s^{\max} - s_1/s_2; \quad s_2/s_1 - \zeta_s^{\min}; \quad \zeta_s^{\max} - s_2/s_3; \quad s_3/s_2 - \zeta_s^{\min};$$

$$s_1 - 3\delta_1 \geq 0; \quad s_2 - 3\delta_2 \geq 0; \quad s_3 - 3\delta_3 \geq 0.$$

Условия обеспечения требуемых размеров рабочей зоны манипуляционной системы:

$$(L_2 + L_3) \cos q_{20} - R_{\max} \geq 0; \quad Y_{\min} - L_1 - L_2 \sin q_{20} + L_3 \cos(q_{20} + q_{30}) \geq 0;$$

$$R_{\min} - L_2 \cos(q_{20} + \Delta q_2) - L_3 \sin(q_{20} + q_{30} + \Delta q_2 + \Delta q_3) \geq 0;$$

$$L_1 + L_2 \sin(q_{20} + \Delta q_2) - \cos(q_{20} + q_{30} + \Delta q_2 + \Delta q_3) - Y_{\max} \geq 0.$$

Возможность подбора объемного насоса, выпускаемого промышленностью:

$$p_n - p_{n,\min} \geq 0; \quad p_{n,\max} - p_n \geq 0; \quad Q_{n,\max} - \pi(D_{2y2}^2 v_{2y2,\max} + D_{2y3}^2 v_{2y3,\max})/4 \geq 0.$$

Возможность подбора стандартизованного гидроцилиндра для подъемно-транспортной техники:

$$p_{2y,\max} - p_n \geq 0; \quad D_{2y,\max} - D_{2y2} \geq 0; \quad D_{2y,\max} - D_{2y3} \geq 0; \quad \Delta L_{2y,\max} - \Delta l_{2y2} \geq 0;$$

$$\Delta L_{2y,\max} - \Delta l_{2y3} \geq 0; \quad V_{2y,\max} - v_{2y2,\max}(\dot{q}_2) \geq 0; \quad V_{2y,\max} - v_{2y3,\max}(\dot{q}_3) \geq 0;$$

$$U_{2y,\max} - U_{2y2}^{\max} \geq 0; \quad U_{2y,\max} - U_{2y3}^{\max} \geq 0.$$

Условия изгибной прочности характерных сечений звеньев манипуляционной системы:

$$[\sigma] - 6t_{b1} M_{01}^{\max} / [s_1 t_{b1}^3 - (s_1 - 2\delta_1)(t_{b1} - 2\delta_1)^3]; \quad [\sigma] - 6t_h M_h^{\max} / [s_1 t_h^3 - (s_1 - 2\delta_1)(t_h - 2\delta_1)^3];$$

$$[\sigma] - 6t_b M_b^{\max} / [s_3 t_b^3 - (s_3 - 2\delta_3)(t_b - 2\delta_3)^3]; \quad [\sigma] - 6t_d M_d^{\max} / [s_2 t_d^3 - (s_2 - 2\delta_2)(t_d - 2\delta_2)^3];$$

$$[\sigma] - 6t_{b2} M_{12}^{\max} / [s_2 t_{b2}^3 - (s_2 - 2\delta_2)(t_{b2} - 2\delta_2)^3].$$

Условия прочности характерных сечений звеньев манипуляционной системы при действии поперечной силы:

$$[\tau] - 0,75 \zeta_{f3} G_n / [\delta_3(t_{e3} + s_3 - 2\delta_3)] \geq 0; \quad [\tau] - 0,75 Q_b^{\max} / [\delta_3(t_b + s_3 - 2\delta_3)] \geq 0;$$

$$[\tau] - 0,75 Q_{23}^{\max} / [\delta_3(t_{e3} + s_3 - 2\delta_3)] \geq 0; \quad [\tau] - 0,75 Q_{23}^{\max} / [\delta_2(t_{e2} + s_2 - 2\delta_2)] \geq 0;$$

$$[\tau] - 0,75 Q_f^{\max} / [\delta_2(t_f + s_2 - 2\delta_2)] \geq 0; \quad [\tau] - 0,75 Q_{12}^{\max} / [\delta_2(t_{b2} + s_2 - 2\delta_2)] \geq 0;$$

$$[\tau] - 0,75 Q_{12}^{\max} / [\delta_1(t_{e1} + s_1 - 2\delta_1)] \geq 0.$$

Условия прочности характерных сечений звена 1 при действии продольной силы:

$$[\sigma] - 0,5 N_{01} / [\delta_1(t_{b1} + s_1 - 2\delta_1)]; \quad [\sigma] - 0,5 N_{12} / [\delta_1(t_{e1} + s_1 - 2\delta_1)].$$

Условие обеспечения устойчивости звена 1 при действии продольной сжимающей нагрузки с внецентренным изгибом:

$$2\varphi_e [\sigma] \delta_1(t_{b1} + s_1 - 2\delta_1) - N_{01} \geq 0.$$

Вариант № 4 конструктивного исполнения манипуляционной системы (рис. 4).

Общие условия компоновки звеньев:

$$L_1 - l_{01,h} \geq 0; \quad L_2 - l_{12,d} \geq 0; \quad l_{cd} - 0,7t_d \geq 0; \quad l_{gh} - 0,7t_h \geq 0; \quad L_2/3 - l_{12,f} \geq 0;$$

$$l_{12,f} - 0,7t_{b2} \geq 0; \quad L_3/3 - l_{23,b} \geq 0; \quad l_{23,b} - 0,7t_{b3} \geq 0; \quad t_{b2} - t_f \geq 0; \quad t_f - t_{e2}/3 \geq 0;$$

$$t_{b3} - t_b \geq 0; \quad t_b - t_{e3}/3 \geq 0; \quad t_h - t_{b1} - (t_{e1} - t_{b1})l_{01,h}/L_1 \geq 0; \quad t_d - t_{b2} - (t_{e2} - t_{b2})l_{12,d}/L_2 \geq 0;$$

$$t_{e1} - t_{b2} \geq 0; \quad t_{e2} - t_{b3} \geq 0; \quad t_{b1} - t_{e1} \geq 0; \quad t_{b2} - t_{e2} \geq 0; \quad t_{b3} - t_{e3} \geq 0; \quad q_{20} - \pi/3 \geq 0;$$

$$\pi/6 - q_{20} \geq 0; \quad q_{30} - \pi/3 \geq 0; \quad \pi/6 - q_{30} \geq 0; \quad \pi/2 - q_{20} - \Delta q_2 \geq 0; \quad \pi/2 - q_{30} - \Delta q_3 \geq 0;$$

$$L_2/3 - l_{12,f} \geq 0; \quad l_{12,f} - 0,7t_{b2} \geq 0; \quad L_3/3 - l_{23,b} \geq 0; \quad l_{23,b} - 0,7t_{b3} \geq 0; \quad t_{b2} - t_f \geq 0;$$

$$t_f - t_{e2}/3 \geq 0; \quad t_{b3} - t_b \geq 0; \quad t_b - t_{e3}/3 \geq 0; \quad \varphi_2 - \pi/4 \geq 0; \quad 5\pi/6 - \varphi_2 \geq 0; \quad \varphi_3 - \pi/4 \geq 0;$$

$$5\pi/6 - \varphi_3 \geq 0.$$

Условия компоновки гидроцилиндров звеньев;

$$\sqrt{l_{12,f}^2 + l_{12,g}^2 + 2l_{12,f}l_{12,g} \sin\{q_{20} + \Delta q_2 + \varphi_2 + \arctg[l_{gh}/(L_1 - l_{01,h})]\}} - \Delta l_{2y2} \geq 0;$$

$$\sqrt{l_{23,b}^2 + l_{23,c}^2 + 2l_{23,b}l_{23,c} \sin\{q_{30} + \Delta q_3 + \varphi_3 + \arctg[l_{cd}/(L_2 - l_{12,d})]\}} - \Delta l_{2y3} \geq 0.$$

Допустимое сочетание габаритных размеров поперечных сечений звеньев:

$$\begin{aligned} s_1/t_{b1} - \xi_s^{\min} \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_1/t_{b1} \geq 0; \quad s_1/t_{e1} - \xi_s^{\min} \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_1/t_{e1} \geq 0; \quad s_2/t_{b2} - \xi_s^{\min} \geq 0; \\ \xi_s^{\max} - s_2/t_{b2} \geq 0; \quad s_2/t_{e2} - \xi_s^{\min} \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_2/t_{e2} \geq 0; \quad s_3/t_{b3} - \xi_s^{\min} \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_3/t_{b3} \geq 0; \\ s_3/t_{e3} - \xi_s^{\min} \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_3/t_{e3} \geq 0; \quad s_1/t_h - \xi_s^{\min} \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_1/t_h \geq 0; \quad s_2/t_f - \xi_s^{\min} \geq 0; \\ \xi_s^{\max} - s_2/t_f \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_2/t_d \geq 0; \quad s_2/t_d - \xi_s^{\min} \geq 0; \quad \xi_s^{\max} - s_3/t_b \geq 0; \quad s_3/t_b - \xi_s^{\min} \geq 0; \\ \zeta_s^{\max} - s_1/s_2; \quad s_2/s_1 - \zeta_s^{\min}; \quad \zeta_s^{\max} - s_2/s_3; \quad s_3/s_2 - \zeta_s^{\min}; \\ s_1 - 3\delta_1 \geq 0; \quad s_2 - 3\delta_2 \geq 0; \quad s_3 - 3\delta_3 \geq 0. \end{aligned}$$

Условия обеспечения требуемых размеров рабочей зоны манипуляционной системы:

$$\begin{aligned} (L_2 + L_3) \cos q_{20} - R_{\max} \geq 0; \quad Y_{\min} - L_1 - L_2 \sin q_{20} + L_3 \cos(q_{20} + q_{30}) \geq 0; \\ R_{\min} - L_2 \cos(q_{20} + \Delta q_2) - L_3 \sin(q_{20} + q_{30} + \Delta q_2 + \Delta q_3) \geq 0; \\ L_1 + L_2 \sin(q_{20} + \Delta q_2) - \cos(q_{20} + q_{30} + \Delta q_2 + \Delta q_3) - Y_{\max} \geq 0. \end{aligned}$$

Возможность подбора объемного насоса, выпускаемого промышленностью:

$$p_H - p_{H,\min} \geq 0; \quad p_{H,\max} - p_H \geq 0; \quad Q_{H,\max} - \pi(D_{cy2}^2 v_{cy2,\max} + D_{cy3}^2 v_{cy3,\max})/4 \geq 0.$$

Возможность подбора стандартизованного гидроцилиндра для подъемно-транспортной техники:

$$\begin{aligned} p_{cy,\max} - p_H \geq 0; \quad D_{cy,\max} - D_{cy2} \geq 0; \quad D_{cy,\max} - D_{cy3} \geq 0; \quad \Delta L_{cy,\max} - \Delta L_{cy2} \geq 0; \\ \Delta L_{cy,\max} - \Delta L_{cy3} \geq 0; \quad V_{cy,\max} - v_{cy2,\max}(\dot{q}_2) \geq 0; \quad V_{cy,\max} - v_{cy3,\max}(\dot{q}_3) \geq 0; \\ U_{cy,\max} - U_{cy2}^{\max} \geq 0; \quad U_{cy,\max} - U_{cy3}^{\max} \geq 0. \end{aligned}$$

Условия изгибной прочности характерных сечений звеньев манипуляционной системы:

$$\begin{aligned} [\sigma] - 6t_{b1} M_{01}^{\max} / [s_1 t_{b1}^3 - (s_1 - 2\delta_1)(t_{b1} - 2\delta_1)^3]; \quad [\sigma] - 6t_h M_h^{\max} / [s_1 t_h^3 - (s_1 - 2\delta_1)(t_h - 2\delta_1)^3]; \\ [\sigma] - 6t_{b3} M_{23}^{\max} / [s_3 t_{b3}^3 - (s_3 - 2\delta_3)(t_{b3} - 2\delta_3)^3] \geq 0; \quad [\sigma] - 6t_d M_d^{\max} / [s_2 t_d^3 - (s_2 - 2\delta_2)(t_d - 2\delta_2)^3]; \\ [\sigma] - 6t_{b2} M_{12}^{\max} / [s_2 t_{b2}^3 - (s_2 - 2\delta_2)(t_{b2} - 2\delta_2)^3]; \quad [\sigma] - 6t_{b3} M_{23}^{\max} / [s_3 t_{b3}^3 - (s_3 - 2\delta_3)(t_{b3} - 2\delta_3)^3]. \end{aligned}$$

Условия прочности характерных сечений звеньев манипуляционной системы при действии поперечной силы:

$$\begin{aligned} [\tau] - 0,75 \zeta_{f3} G_n / [\delta_3(t_{e3} + s_3 - 2\delta_3)] \geq 0; \quad [\tau] - 0,75 Q_b^{\max} / [\delta_3(t_b + s_3 - 2\delta_3)] \geq 0; \\ [\tau] - 0,75 Q_{23}^{\max} / [\delta_3(t_{e3} + s_3 - 2\delta_3)] \geq 0; \quad [\tau] - 0,75 Q_{23}^{\max} / [\delta_2(t_{e2} + s_2 - 2\delta_2)] \geq 0; \\ [\tau] - 0,75 Q_f^{\max} / [\delta_2(t_f + s_2 - 2\delta_2)] \geq 0; \quad [\tau] - 0,75 Q_{12}^{\max} / [\delta_2(t_{b2} + s_2 - 2\delta_2)] \geq 0; \\ [\tau] - 0,75 Q_{12}^{\max} / [\delta_1(t_{e1} + s_1 - 2\delta_1)] \geq 0. \end{aligned}$$

Условия прочности характерных сечений звена 1 при действии продольной силы:

$$[\sigma] - 0,5 N_{01} / [\delta_1(t_{b1} + s_1 - 2\delta_1)]; \quad [\sigma] - 0,5 N_{12} / [\delta_1(t_{e1} + s_1 - 2\delta_1)].$$

Условие обеспечения устойчивости звена 1 при действии продольной сжимающей нагрузки с внецентренным изгибом:

$$2\varphi_e [\sigma] \delta_1(t_{b1} + s_1 - 2\delta_1) - N_{01} \geq 0.$$

Задачи однокритериальной оптимизации показателей качества  $M_{ms}$  и  $N_n$  для  $i$ -го варианта исполнения гидрофицированной манипуляционной системы, результаты решения которых необходимы для формирования целевой функции многокритериальной оптимизации вида (4), представляют собой минимизацию следующих целевых функций на основе соотношений (2) и (3):

$$U_{Mi}(\{x\}_{Mi}, \{z\}_{Mi}) \equiv M_{msi}(\{x\}_{Mi}, \{z\}_{Mi}) \rightarrow \min \quad (5)$$

$$U_{Ni}(\{x\}_{Ni}, \{z\}_{Ni}) \equiv N_{hi}(\{x\}_{Ni}, \{z\}_{Ni}) \rightarrow \min \quad (6)$$

и нахождения в точке их оптимума векторов управляемых параметров  $\{x\}_{Mi}^{opt}$  и  $\{x\}_{Ni}^{opt}$ . Структура векторов  $\{x\}_{Mi}$ ,  $\{x\}_{Ni}$  и системы ограничений, используемых при минимизации данных целевых функций, совпадают со структурой вектора управляемых параметров при многокритериальной оптимизации  $\{x\}_i$  и системами ограничений, представленными выше.

### Список литературы

1. Кобзев, А.П. Оптимальное проектирование тяжелых козловых кранов / А.П. Кобзев. – Саратов: СГУ, 1991. – 160 с.
2. Лагерев, Э.А. Научные проблемы проектирования гидравлических крано-манипуляторных установок мобильных транспортно-технологических машин / Э.А. Лагерев // Достижения вузовской науки. – 2015. - № 14. – С. 101-106.
3. Лагерев, И.А. Оптимальное проектирование подъемно-транспортных машин / И.А. Лагерев, А.В. Лагерев. - Брянск: БГТУ, 2013. - 228 с.
4. Лагерев, И.А. Проектирование поворотных гидродвигателей для манипуляционных систем мобильных машин на основе многокритериальной оптимизации / И.А. Лагерев, Е.А. Шатунова // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2016. - № 4. – С. 34-51. DOI: 10.22281/2413-9920-2016-02-04-34-51.
5. Беляков, В.В. Многокритериальная оптимизация в задачах подвижности, конкурентоспособности автотракторной техники и диагностики сложных технических систем / В.В. Беляков, М.Е. Бушуева, В.И. Сагунов. – Н. Новгород: НГТУ. – 2001. – 271 с.
6. Хорошев, А.Н. Введение в управление проектированием механических систем. - Белгород, 1999. - 372 с.
7. Лагерев, А.В. Оптимизация конструкции крана-манипулятора машины для сварки магистральных трубопроводов при модернизации / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев // Подъемно-транспортное дело. – 2013. – №1. – С. 7-10.
8. Лагерев, А.В. Динамико-прочностной анализ гидравлических крано-манипуляторных установок мобильных машин / А.В. Лагерев, А.А. Мильто, И.А. Лагерев. – Брянск: БГУ, 2015. – 186 с.
9. Лагерев, И.А. Динамический анализ трехзвенного гидравлического крана-манипулятора / И.А. Лагерев, А.В. Лагерев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2011. – №3. – С. 9-16.
10. Лагерев, И.А. Динамика трехзвенных гидравлических кранов-манипуляторов / И.А. Лагерев, А.В. Лагерев. – Брянск: БГТУ, 2012. – 196 с.
11. Казак, С.А. Курсовое проектирование грузоподъемных машин / С.А. Казак, В.Е. Дусье, Е.С. Кузнецов [и др.]; под ред. С.А. Казака. – М.: Высш. шк., 1989. – 319 с.
12. Вершинский, А.В. Строительная механика и металлические конструкции / А.В. Вершинский, М.М. Гохберг, В.П. Семенов. – Л.: Машиностроение, 1984. – 231 с.
13. Справочник по кранам: в 2-х т. Т. 1 / под ред. М.М. Гохберга. – Л.: Машиностроение, 1987. – 536 с.
14. Васильев, Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач / Ф.П. Васильев. – М.: Наука, 1980. – 518 с.
15. Реклейтис, Г. Оптимизация в технике: В 2-х кн. Кн. 1. - М.: Мир, 1986. – 349 с.

### Сведения об авторе

Лагерев Игорь Александрович – кандидат технических наук, проректор по инновационной работе ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», *lagerev-bgu@yandex.ru*.

## PRE-DESIGN OPTIMIZATION OF THE MANIPULATION SYSTEM WITH HYDRAULIC DRIVE FOR MOBILE TRANSPORT-TECHNOLOGICAL MACHINE

Lagerev I.A.

Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, Bryansk, Russian Federation

In the article has developed an optimization mathematical model and methodology of selection of optimal parameters of manipulation of systems of transport and technological machines, which allows to increase their service performance and competitiveness. Also developed the original structure of a comprehensive objective function taking into account the additive effect of any number of important indicators of quality in the formation of the optimal variant of the designed construction. Established the feasibility of using optimization approaches to definition of the basic dimensions of the kinematic scheme and parameters of the drive for the hydraulic manipulation system at the preliminary stage – the stage of development of the technical proposal for the design of the mobile machine. The approach enables the source to lay the subject to further design of the optimal values of the most important quantitative characteristics that determine the realization of the highest values of quality designed manipulation systems. For manipulation systems of hydraulic mobile machine appropriate to use such indicators of quality as its own weight and the capacity of the pumping installation. Pre-design optimization allows to comprehensively determine the optimum combination of a sufficiently large number of basic design parameters – the characteristic dimensions of metal constructions of manipulation systems (lengths, dimensions, cross sections, links, and mounting dimensions for hydraulic drives) and characteristics of the hydraulic equipment (working pressure and flow rate of the working fluid).

**Keywords:** *transport-technological mobile machine, manipulator, multicriterial optimization, objective function, restriction, weight, pressure, stress*

**DOI:** 10.22281/2413-9920-2017-03-01-26-45

### References

1. Kobzev A.P. *Optimalnoe proektirovanie tyazhelykh kozlovykh kranov* [Optimal design of heavy gantry cranes]. Satatov, SGU, 1991. 160 p.
2. Lagereva E.A. The scientific problem of designing hydraulic crane-manipulating installations of mobile transport technological machines, *Dostizheniya vuzovskoy nauki*, 2015, No.14, pp. 101-106.
3. Lagerev I.A., Lagerev A.V. *Optimalnoe proektirovanie podyemno-transportnykh mashin* [Optimal design of lifting-transport machines]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Tekhnicheskii Universitet, 2013. 228 p.
4. Lagerev I.A., Shatunova E.A. Design of turning hydraulic engines for manipulators of mobile machines on the basis of multicriterial optimization. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, No. 4, pp. 34-51. DOI: 10.22281/2413-9920-2016-02-04-34-51.
5. Belyakov V.V., Bushueva M.E., Sagunov V.I. *Mnogokriterialnaya optimizatsiya v zadachakh podvizhnosti, konkurentosposobnosti avtotraktornoy tekhniki i diagnostiki slozhnykh tekhnicheskikh system* [Multicriterial optimization in problems of mobility, the competitiveness of automotive engineering and diagnostics of complex technical systems]. N.Novgorod, NGTU, 2001. 271 p.
6. Khoroshev A.N. *Vvedenie v upravlenie proektirovaniem mekhanicheskikh system* [Introduction to control of mechanical systems design]. Belgorod, 1999. 372 p.
7. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Trunk pipeline welding machine crane-manipulator optimization during its modernization, *Podyemno-transportnoe delo*, 2013, No.1, pp. 4-7.
8. Lagerev A.V., Milto A.A., Lagerev I.A. *Dinamiko-prochnostnoy analiz gidravlicheskikh krano-manipulyatornykh ustanovok mobilnykh mashin* [Dynamic and mechanical analysis of hydraulic crane-manipulating installations of mobile machines]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Universitet, 2015. 186 p.
9. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Dynamic analysis of a hydraulic three-tier crane-manipulator, *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, No.3, pp. 9-16.

10. Lagerev I.A., Lagerev A.V. *Dinamika tryekhzhvennykh gidravlicheskiikh kranov-manipulatorov* [Dynamics three-tier hydraulic crane-manipulators]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Tekhnicheskii Universitet, 2012. 196 p.

11. Kazak S.A., Duse V.E., Kuznetsov E.S. *Kursovoe proektirovanie gruzopodemnykh mashin* [Course design of lifting machines]. Moscow, Vysshaya Shkola, 1989. 319 p.

12. Vershinskiy A.V., Gokhberg M.M., Semenov A.V. *Stroitel'naya mekhanika i metallicheskie konstruksii* [Structural mechanics and metal constructions]. Leningrad, Mashinostroenie, 1984. 231 p.

13. *Spravochnik po kranam. Tom 2* [Handbook on cranes. Vol. 2]. Leningrad, Mashinostroenie, 1987. 536 p.

14. Vasilev F.P. *Chislennyye metody resheniya ekstremalnykh zadach* [Numerical methods for solving extremal problems]. Moscow, Nauka, 1980. 518 p.

15. Reklaitis G.V., Ravindran A., Ragsdell K.M. *Engineering optimization. Methods and applications*. John Wiley & Sons, Inc., 1983.

#### **Author' information**

Igor A. Lagerev - Candidate of Technical Sciences, Vice rector for Innovations at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, [lagerev-bgu@yandex.ru](mailto:lagerev-bgu@yandex.ru).

Дата публикации  
(Date of publication):  
25.03.2017

