

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО МАНИПУЛЯТОРА И ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ СОВМЕЩЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ ПОДЪЕМА СТРЕЛЫ И ВРАЩЕНИЯ РУКОЯТИ

И.М. Бартнев, Э.К. Емтыль, П.И. Попиков

ВГЛТА, г. Воронеж

Майкопский машиностроительный завод, г. Майкоп

В статье рассмотрена динамическая нагруженность гидравлического манипулятора при одновременном движении стрелы и рукояти (совмещение движений) и раздельном их движении. Для трех типоразмеров манипуляторов определена зависимость усилий гидроцилиндров подъема стрелы и привода рукояти от времени цикла, а также выявлен характер изменения их в течение рабочего цикла при раздельном движении и совмещении операций.

Установлено, что совмещение операций дает значительное снижение динамической нагруженности и повышение производительности манипулятора.

В известных работах [4], [5], [7], [8] рассматриваются отдельно задачи оптимизации кинематических параметров механизмов подъема стрелы и привода рукояти гидравлического манипулятора, а в работах [1], [2], [3] при решении задачи динамики массы стрелы и рукояти приводятся к точке подвеса захвата.

Предлагаемая в работе [6] формула предполагает совмещение операций, но угловые скорости стрелы и рукояти при этом принимаются постоянными.

Динамические (инерционные) силы, возникающие вследствие неравномерного вращения стрелы и рукояти гидравлического манипулятора при равномерном движении штоков гидроцилиндров, оказывают весьма существенное влияние на расчетные нагрузки, преодолеваемые манипулятором в процессе работы. Эти силы, зависящие как от кинематических параметров манипулятора, так и от скоростей движений штоков гидроцилиндров, могут быть значительно снижены при совмещении движений звеньев, а, следовательно, повышена надежность металлоконструкции и гидрооборудования манипулятора. Кроме того, совмещение операций дает значительное повышение производительности манипулятора.

Так как время цикла движения рукояти и стрелы составляет более 50% времени полного цикла манипулятора, то наиболее целесообразным является совмещение этих операций. Однако совмещение операций связано с усложнением гидравлической схемы манипулятора, поэтому целесообразность совмещения должна быть обоснована в каждом конкретном случае.

На рис.1 представлена кинематическая схема стреловой группы (стрела и рукоять с удлинителем) гидравлического манипулятора.

Рассмотрим рукоять с удлинителем как одно звено с одной степенью свободы потому, что инерционные силы, возникающие при установившемся движении удлинителя и вращении рукояти, незначительны.

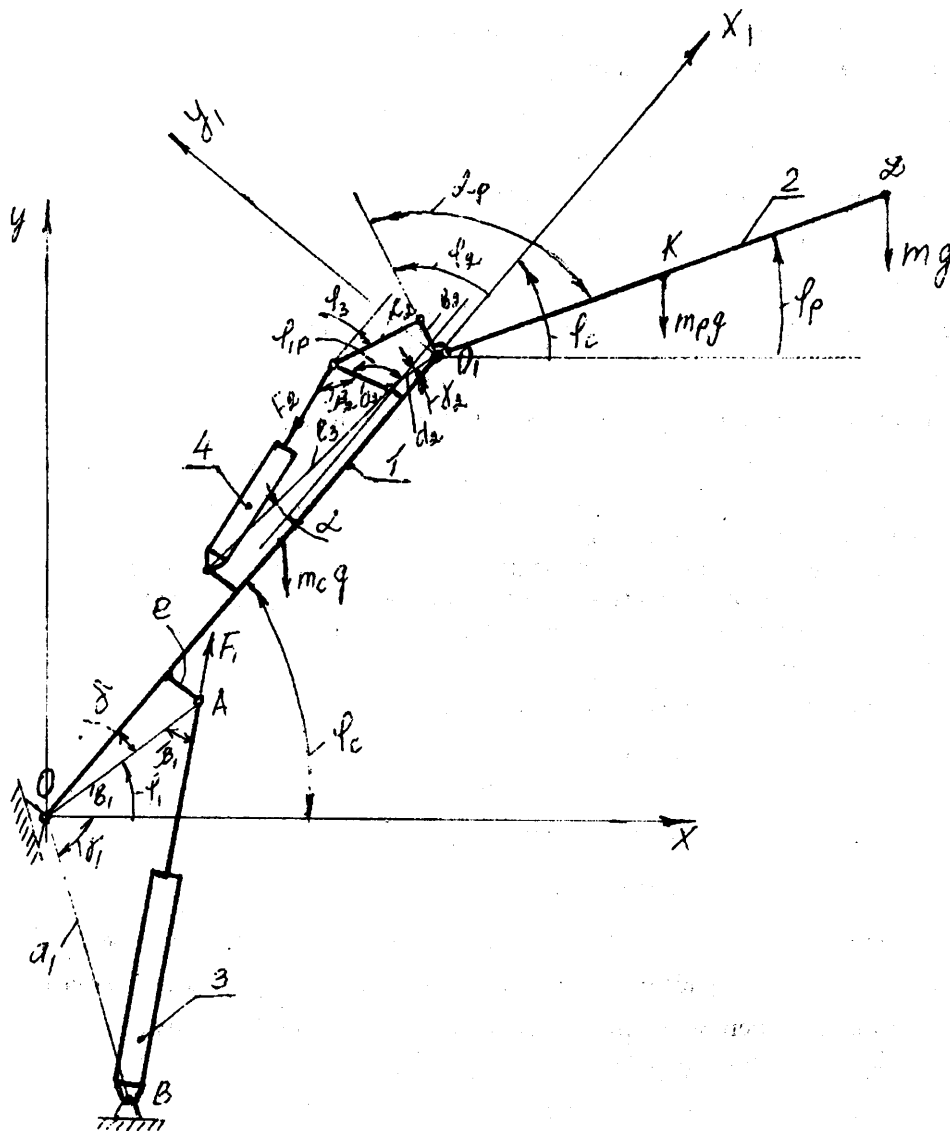


Рис.1. Кинематическая схема стреловой группы гидравлического манипулятора:

1 - стрела; 2 - рукоять с удлинителем; 3 - гидроцилиндр подъема стрелы; 4 - гидроцилиндр привода рукояти.

Введем следующие обозначения:

$OO_1 = l_c$ - длина стрелы;

m_c - масса стрелы с гидроцилиндром и механизмом привода рукояти;

$O_1D = l_p$ - длина рукояти с удлинителем;

m_p - масса рукояти с удлинителем и гидроцилиндром удлинителя.

Принимаем, что центр тяжести стрелы лежит на прямой OO_1 и делит этот отрезок пополам, а центр тяжести рукояти соответственно лежит в точке K , причем $O_1K = DK$.

φ_c - угол подъема стрелы,

$$\varphi_c = \varphi_1 + \delta; \quad (1)$$

φ_p - угол между осью рукояти и горизонтальной осью,

$$\varphi_p = \varphi_2 - (\alpha_p - \varphi_c) = \varphi_2 + \varphi_1 + \delta - \alpha_p \quad (2)$$

m - масса груза с грузозахватным органом и ротатором;

F_1 - усилие, развиваемое гидроцилиндром подъема стрелы;

F_2 - усилие, развиваемое гидроцилиндром привода рукояти;

$a_1; b_1; e; \delta; \gamma_1$ - заданные параметры механизма подъема стрелы;

$\beta_1 = \angle OAB$ - текущее значение угла между прямыми OA и AB ;

$l_3; \alpha; a_2; b_2; c_2; d_2; \gamma_2$ - заданные параметры механизма привода рукояти;

α_p - угол между осью звена b_2 и осью рукояти; в общем случае $\alpha_p \neq 90^\circ$

φ_{1p} - текущее значение угла между осью звена a_2 и осью, параллельной оси O_1x_1 ;

φ_3 - текущее значение угла между осью звена c_2 и осью, параллельной оси O_1x_1 .

Стрела 1 массой m_c и длиной l_c приводится в движение посредством гидроцилиндра

3. Рукоять 2 с удлинителем массой m_p и длиной l_p приводится в движение посредством

гидроцилиндра 4. При подаче рабочей жидкости к гидроцилиндрам 3 и 4 приводятся в движение одновременно стрела и рукоять.

Решение задачи совмещения движений проводим в следующей последовательности:

1. Определяем число степеней свободы для данного случая. Оно равно двум.
2. Выбираем систему координат и вводим независимые обобщенные координаты: для стрелы φ_1 и для рукояти φ_2 .
3. Составляем уравнения Лагранжа II - го рода

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} - \frac{\partial T}{\partial \varphi_1} &= Q_1 \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} - \frac{\partial T}{\partial \varphi_2} &= Q_2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

4. Находим обобщенные силы Q_1 и Q_2 , соответствующие обобщенным перемещениям.

Для этого вычислим сумму работ сил F_1 ; $m_c g$; F_2 ; $m_p g$; mg , пренебрегая силами трения на возможных перемещениях, соответствующих обобщенному возможному перемещению $\delta\varphi_1 \neq 0$. При этом $\delta\varphi_2 = 0$;

$$\delta A = \delta A(F_1) + \delta A(m_c g) + \delta A(F_2) + \delta A(m_p g) + \delta A(mg) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \delta A = & F_1 \cdot b_1 \sin \beta_1 \cdot \delta\varphi_1 - 0,5m_c g l_c \cdot \cos \varphi_c \cdot \delta\varphi_1 - m_p g (l_c \cdot \cos \varphi_c + \\ & + 0,5l_p \cos \varphi_p) \cdot \delta\varphi_1 + mg (l_c \cdot \cos \varphi_c + l_p \cos \varphi_p) \cdot \delta\varphi_1 \end{aligned}$$

Так как $\varphi_c = \varphi_1 + \delta$, $\varphi_p = (\varphi_2 + \varphi_1 + \delta - \alpha_p)$, то

$$\begin{aligned} \delta A = & \left\{ F_1 \cdot b_1 \sin \beta_1 - 0,5m_c g l_c \cdot \cos(\varphi_1 + \delta) - \right. \\ & \left. - m_p g \left[l_c \cdot \cos(\varphi_1 + \delta) + 0,5l_p \cos(\varphi_2 + \varphi_1 + \delta - \alpha_p) \right] - \right. \\ & \left. - mg \left[l_c \cdot \cos(\varphi_1 + \delta) + l_p \cdot \cos(\varphi_2 + \varphi_1 + \delta - \alpha_p) \right] \right\} \cdot \delta\varphi_1 \end{aligned} \quad (5)$$

Коэффициент пропорциональности, стоящий в выражении (5) при $\delta\varphi_1$ является обобщенной силой Q_1 , т.е.

$$Q_1 = F_1 \cdot b_1 \sin \beta_1 - 0,5m_c g l_c \cdot \cos(\varphi_1 + \delta) - \\ - m_p g \left[l_c \cdot \cos(\varphi_1 + \delta) + 0,5l_p \cos(\varphi_2 + \varphi_1 + \delta - \alpha_p) \right] - \\ - mg \left[l_c \cdot \cos(\varphi_1 + \delta) + l_p \cdot \cos(\varphi_2 + \varphi_1 + \delta - \alpha_p) \right], \quad (6)$$

где

$$\sin \beta_1 = \frac{a_1 \cdot \sin(\gamma_1 + \varphi_1)}{S_{01} + V_1 t} \quad (7)$$

S_{01} - закрытая высота (расстояние между осями проушин при полностью втянутом штоке) гидроцилиндра подъема стрелы;

V_1 - скорость движения штока гидроцилиндра подъема стрелы;

t - текущее значение времени;

начало отсчета совпадает с $\varphi_1 = \varphi_{10}$

$$\delta = \arcsin \frac{e}{b_1} \quad (8)$$

Для определения обобщенной силы, соответствующей обобщенному перемещению $\delta\varphi_2 \neq 0$, примем $\delta\varphi_1 = 0$.

$$\delta A = \delta A(F_1) + \delta A(m_c g) + \delta A(F_2) + \delta A(m_p g) + \delta A(mg) \\ \delta A(F_1) = 0; \quad \delta A(m_c g) = 0; \quad (9)$$

$$\delta A = \left[F_2 \cdot b_2 \sin \beta_2 \cdot \frac{\sin(\varphi_2 - \varphi_3)}{\sin(\varphi_{1p} - \varphi_3)} - 0,5m_p g l_p \cos(\varphi_2 + \varphi_1 + \delta - \alpha_p) - \right. \\ \left. - m g l_p \cdot \cos(\varphi_2 + \varphi_1 + \delta - \alpha_p) \right] \cdot \delta\varphi_2 \quad (10)$$

Обобщенная сила, соответствующая перемещению $\delta\varphi_2$, равна:

$$Q_2 = F_2 b_2 \sin \beta_2 \cdot \frac{\sin(\varphi_2 - \varphi_3)}{\sin(\varphi_{1p} - \varphi_3)} - g l_p (m + 0,5m_p) \cdot \cos(\varphi_2 + \varphi_1 + \delta - \alpha_p), \quad (11)$$

где

$$\sin \beta_2 = \frac{l_3 \cdot \sin(\alpha + \varphi_{1p})}{S_{\max 2} - V_2 t}, \quad (12)$$

$S_{\max 2}$ - открытая высота (максимальное расстояние между осями проушин при полностью выдвинутом штоке) гидроцилиндра привода рукояти;

V_2 - скорость движения штока гидроцилиндра привода рукояти.

$$\varphi_2 = \varphi_{4e_2} + \varphi_{e_2} \quad (13)$$

$$\varphi_{4e_2} = \arccos \left(\frac{c_2^2 - b_2^2 - e_2^2}{2b_2 e_2} \right) \quad (14)$$

$$e_2 = \sqrt{a_2^2 + d_2^2 - 2a_2 d_2 \cdot \cos(\varphi_{1p} - \gamma_2)} \quad (15)$$

$$\varphi_{e_2} = \arcsin\left(\frac{d_2 \sin \gamma_2 - a_2 \sin \varphi_{1p}}{e_2}\right) \quad (16)$$

$$\varphi_3 = \varphi_{3e_2} + \varphi_{e_2} \quad (17)$$

$$\varphi_{3e_2} = \arccos\left(\frac{c_2^2 + e_2^2 - b_2^2}{-2c_2e_2}\right) \quad (18)$$

5. Определим кинетическую энергию системы.

Кинетическая энергия системы равна сумме кинетических энергий стрелы, рукояти с удлинителем и груза

$$T = T_c + T_p + T_{gp} \quad (19)$$

Кинетическая энергия стрелы, совершающей вращательное движение:

$$T_c = \frac{1}{2} J_c \dot{\varphi}_c^2 \quad (20)$$

где J_c - момент инерции стрелы относительно оси O

$$J_c = \frac{m_c l_c^2}{3} \quad (21)$$

$\dot{\varphi}_c$ - угловая скорость стрелы.

Кинетическая энергия рукояти, совершающей плоскопараллельное движение:

$$T_p = \frac{1}{2} m_p V_k^2 + \frac{1}{2} J_{pk} \cdot \omega_p^2 \quad (22)$$

где V_k - скорость центра масс рукояти;

J_{pk} - момент инерции рукояти относительно его центра масс;

ω_p - мгновенная угловая скорость рукояти.

Кинетическая энергия груза

$$T_{gp} = \frac{1}{2} m V_D^2 \quad (23)$$

где V_D - абсолютная скорость точки D (точки подвеса груза).

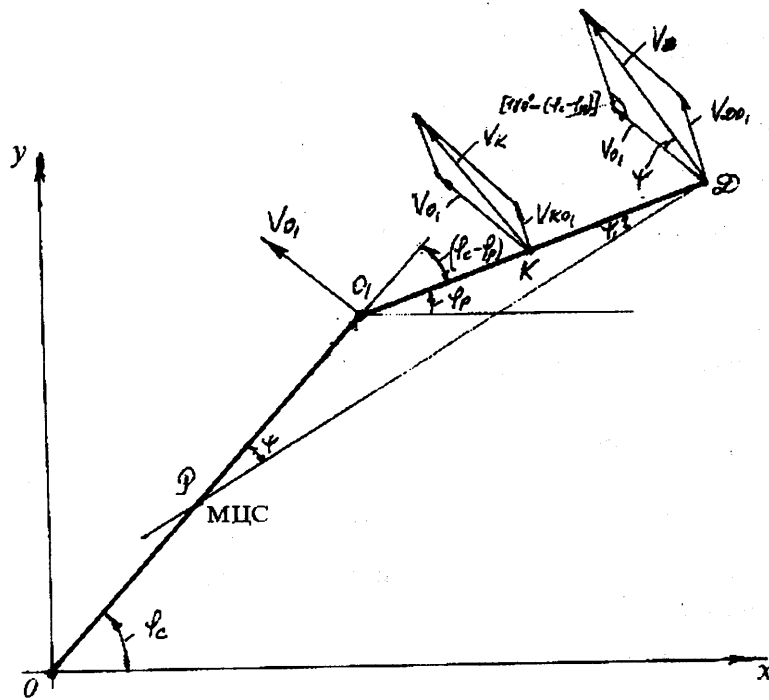


Рис.2. Схема для определения скоростей рукояти.

Скорость точки O_1 стрелы

$$V_{O1} = l_c \cdot \dot{\phi}_c = l_c \cdot \dot{\phi}_1 \tag{24}$$

Скорость точки D относительно O_1

$$V_{DO1} = l_p \cdot \dot{\phi}_p = l_p \frac{d(\phi_2 + \phi_1 + \delta - \alpha_p)}{dt} = l_p \cdot (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) \tag{25}$$

Абсолютная скорость точки D

$$\overline{V}_D = \overline{V}_{O1} + \overline{V}_{DO1} \tag{26}$$

$$\frac{V_D}{\sin(\phi_c - \phi_p)} = \frac{V_{DO1}}{\sin \psi} \tag{27}$$

Положение мгновенного центра скоростей находим на пересечении перпендикуляров, восстановленных к векторам скоростей \overline{V}_{O1} и \overline{V}_D .

Из треугольника PO_1D .

$$\frac{l_p}{\sin \psi} = \frac{PD}{\sin(\phi_c - \phi_p)} \tag{28}$$

с учетом (27)

$$\frac{l_p V_D}{V_{DO1} \cdot \sin(\phi_c - \phi_p)} = \frac{PD}{\sin(\phi_c - \phi_p)} \tag{29}$$

Мгновенная угловая скорость рукояти

$$\omega_p = \frac{V_D}{PD} = \frac{V_D \cdot V_{DO_1}}{V_D \cdot l_p} = \frac{V_{DO_1}}{l_p} = \dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 \quad (30)$$

Скорость точки K в относительном движении

$$V_{KO_1} = O_1K \cdot \dot{\varphi}_p = O_1K \cdot \omega_p = 0,5l_p(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) \quad (31)$$

Найдем из треугольников скоростей абсолютные скорости точек D и K

$$\begin{aligned} V_D &= \sqrt{V_{O_1}^2 + V_{DO_1}^2 + 2V_{O_1} \cdot V_{DO_1} \cdot \cos(\varphi_c - \varphi_p)} = \\ &= \sqrt{l_c^2 \cdot \dot{\varphi}_1^2 + l_p^2(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 + 2l_c l_p \cdot \dot{\varphi}_1(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) \cdot \cos(\alpha_p - \varphi_2)} \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} V_K &= \sqrt{V_{O_1}^2 + V_{KO_1}^2 + 2V_{O_1} \cdot V_{KO_1} \cdot \cos(\varphi_c - \varphi_p)} = \\ &= \sqrt{l_c^2 \cdot \dot{\varphi}_1^2 + 0,25l_p^2(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 + l_c l_p \cdot \dot{\varphi}_1(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) \cdot \cos(\alpha_p - \varphi_2)} \end{aligned} \quad (33)$$

Эти же результаты можно получить через проекции скоростей на оси координат. Для этого находим координаты точек D и K

$$\left. \begin{aligned} x_D &= l_c \cdot \cos \varphi_c + l_p \cdot \cos \varphi_p \\ y_D &= l_c \cdot \sin \varphi_c + l_p \cdot \sin \varphi_p \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

$$\left. \begin{aligned} x_K &= l_c \cdot \cos \varphi_c + 0,5l_p \cdot \cos \varphi_p \\ y_K &= l_c \cdot \sin \varphi_c + 0,5l_p \cdot \sin \varphi_p \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Определим проекции скоростей $V_{Dx} = \dot{x}_D$; $V_{Dy} = \dot{y}_D$; $V_{Kx} = \dot{x}_K$; $V_{Ky} = \dot{y}_K$, и абсолютные скорости:

$$V_D = \sqrt{V_{Dx}^2 + V_{Dy}^2}; \quad V_K = \sqrt{V_{Kx}^2 + V_{Ky}^2}$$

Кинетическую энергию системы находим по формуле (19) с учетом (20), (21), (23), (32) и (33)

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} J_c \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} J_{pk} (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 + \frac{1}{2} m_p \left[l_c^2 \dot{\varphi}_1^2 + \frac{l_p^2}{4} (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 + \right. \\ &+ \left. l_c l_p \cdot \dot{\varphi}_1(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) \cdot \cos(\alpha_p - \varphi_2) \right] + \frac{1}{2} m \left[l_c^2 \dot{\varphi}_1^2 + l_p^2 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 + \right. \\ &+ \left. 2l_c l_p \cdot \dot{\varphi}_1(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) \cdot \cos(\alpha_p - \varphi_2) \right] \end{aligned} \quad (36)$$

Найдя производные, входящие в уравнения Лагранжа (3) и сделав преобразования, получим дифференциальные уравнения движения системы стрела - рукоять с удлинителем:

$$\begin{aligned}
& J_c \ddot{\varphi}_1 + J_{pk} (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) + (m_p + m) l_c^2 \cdot \ddot{\varphi}_1 + (0,25m_p + m) l_p^2 (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) + \\
& + (0,5m_p + m) l_c l_p (2\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) \cdot \cos(\alpha_p - \varphi_2) + \\
& + (0,5m_p + m) l_c l_p (2\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) \dot{\varphi}_2 \cdot \sin(\alpha_p - \varphi_2) = \\
& = F_1 \cdot b_1 \sin \beta_1 - 0,5m_c g l_c \cdot \cos(\varphi_1 + \delta) - \\
& - m_p g \left[l_c \cdot \cos(\varphi_1 + \delta) + 0,5l_p \cos(\varphi_2 + \varphi_1 + \delta - \alpha_p) \right] - \\
& - mg \left[l_c \cdot \cos(\varphi_1 + \delta) + l_p \cos(\varphi_2 + \varphi_1 + \delta - \alpha_p) \right]
\end{aligned} \tag{37}$$

$$\begin{aligned}
& J_{pk} (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) + (0,25m_p + m) l_p^2 (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) + \\
& + (0,5m_p + m) l_c l_p \ddot{\varphi}_1 \cdot \cos(\alpha_p - \varphi_2) - (0,5m_p + m) l_c l_p \dot{\varphi}_1^2 \cdot \sin(\alpha_p - \varphi_2) = \\
& = F_2 \cdot b_2 \sin \beta_2 \cdot \frac{\sin(\varphi_2 - \varphi_3)}{\sin(\varphi_{1p} - \varphi_3)} - g l_p (0,5m_p + m) \cdot \cos(\varphi_2 + \varphi_1 + \delta - \alpha_p)
\end{aligned} \tag{38}$$

При $\varphi_2 = \alpha_p = const$; $\dot{\varphi}_2 = 0$; $\ddot{\varphi}_2 = 0$; $\varphi_p = \varphi_c$ т.е. ось рукоятки параллельна оси стрелы, из уравнения (37) будем иметь дифференциальное уравнение движения стреловой группы в целом (стрелы и рукоятки с удлинителем).

$$\begin{aligned}
& J_c \ddot{\varphi}_1 + J_{pk} \cdot \ddot{\varphi}_1 + (m_p + m) l_c^2 \cdot \ddot{\varphi}_1 + (0,25m_p + m) l_p^2 \cdot \ddot{\varphi}_1 + (0,5m_p + m) l_c l_p 2\ddot{\varphi}_1 = \\
& = F_1 \cdot b_1 \sin \beta_1 - 0,5m_c g l_c \cdot \cos(\varphi_1 + \delta) - m_p g (l_c + 0,5l_p) \cdot \cos(\varphi_1 + \delta) - \\
& - mg(l_c + l_p) \cdot \cos(\varphi_1 + \delta)
\end{aligned}$$

После некоторых преобразований:

$$\begin{aligned}
& \left[J_c + J_{pk} + \left(l_c + \frac{l_p}{2} \right)^2 m_p + (l_c + l_p)^2 \cdot m \right] \cdot \ddot{\varphi}_1 = F_1 \cdot b_1 \cdot \sin \beta_1 - \\
& - g \left[0,5m_c l_c + m_p (l_c + 0,5l_p) + m(l_c + l_p) \right] \cdot \cos(\varphi_1 + \delta)
\end{aligned} \tag{39}$$

Обозначив момент инерции стреловой группы

$$J_{c'} = J_c + J_{pk} + \left(l_c + \frac{l_p}{2} \right)^2 m_p \tag{40}$$

длину стреловой группы

$$l = l_c + l_p$$

центр масс стреловой группы

$$l_y = \frac{0,5m_c l_c + m_p \left(l_c + \frac{l_p}{2} \right)}{m_c + m_p} \tag{41}$$

окончательно получим дифференциальное уравнение движения стреловой группы при неподвижной рукоятки относительно стрелы:

$$(J_{c'} + ml^2) \cdot \ddot{\varphi}_1 = F_1 \cdot b_1 \cdot \sin \beta_1 - g(m_c l_y + ml) \cdot \cos(\varphi_1 + \delta) \tag{42}$$

Принимая $\varphi_1 = const$; $\dot{\varphi}_1 = 0$; $\ddot{\varphi}_1 = 0$; $\varphi_c = \varphi_1 + \delta = const$,

из уравнения (38) получим уравнение движения рукоятки при фиксированных значениях $\varphi_c = \varphi_1 + \delta$

$$\begin{aligned} J_{pk} \cdot \ddot{\varphi}_2 + (0,25m_p + m)l_p^2 \cdot \ddot{\varphi}_2 = \\ = F_2 \cdot b_2 \sin \beta_2 \cdot \frac{\sin(\varphi_2 - \varphi_3)}{\sin(\varphi_{1p} - \varphi_3)} - gl_p(0,5m_p + m) \cdot \cos(\varphi_2 + \varphi_1 + \delta - \alpha_p) \end{aligned} \quad (43)$$

Обозначив момент инерции рукоятки относительно оси его вращения

$$J_p = J_{pk} + \left(\frac{l_p}{2}\right)^2 m_p = J_{pk} + 0,25m_p l_p^2$$

и учитывая, что $\varphi_c = \varphi_1 + \delta$, получим дифференциальное уравнение вращения рукоятки при неподвижной стреле:

$$\begin{aligned} (J_p + ml_p^2) \ddot{\varphi}_2 = F_2 \cdot b_2 \sin \beta_2 \cdot \frac{\sin(\varphi_2 - \varphi_3)}{\sin(\varphi_{1p} - \varphi_3)} - \\ - gl_p(0,5m_p + m) \cdot \cos(\varphi_2 + \varphi_1 + \delta - \alpha_p) \end{aligned} \quad (44)$$

Систему дифференциальных уравнений (37) и (38) решаем численным методом в следующей последовательности:

1. Задаем значениями скоростей движения штоков гидроцилиндров подъема стрелы и привода рукоятки $V_1\left(\frac{m}{c}\right)$ и $V_2\left(\frac{m}{c}\right)$;
2. Определяем время цикла, как наибольшее из значений

$$t_1 = \frac{S_{\max 1} - S_{01}}{V_1}; \quad (45)$$

$$t_2 = \frac{S_{\max 2} - S_{02}}{V_2} \quad (46)$$

3. Разбиваем интервал времени на 10 частей и определяем:

а) значения φ_1 из выражения

$$\cos(\gamma_1 + \varphi_1) = \cos(\gamma_1 + \varphi_{10}) - \frac{V_1 t}{a_1 b_1} \cdot \left(S_{01} + \frac{V_1 t}{2}\right); \quad (47)$$

б) угловую скорость стрелы по формуле

$$\dot{\varphi}_1 = \frac{V_1(S_{01} + V_1 t)}{a_1 b_1 \sin(\gamma_1 + \varphi_1)} \quad (48)$$

в) угловое ускорение стрелы

$$\ddot{\varphi}_1 = \frac{V_1^2 \sin(\gamma_1 + \varphi_1) - \dot{V}_1(S_{01} + V_1 t) \cdot \cos(\gamma_1 + \varphi_1) \cdot \dot{\varphi}_1}{a_1 b_1 \sin^2(\gamma_1 + \varphi_1)} \quad (49)$$

г) текущее значение угла β_1 из треугольника OAB

$$\beta_1 = \arccos \left[\frac{b_1^2 + (S_{01} + V_1 t)^2 - a_1^2}{2b_1(S_{01} + V_1 t)} \right]; \quad (50)$$

д) угол поворота звена a_2 механизма привода рукоятки φ_{1p} из выражения:

$$\cos(\alpha + \varphi_{1p}) = \cos(\alpha + \varphi_{1p0}) - \frac{V_2 t}{a_2 l_3} \cdot \left(S_{\max 2} - \frac{V_2 t}{2} \right) \quad (51)$$

е) угловую скорость звена a_2 механизма привода рукояти:

$$\dot{\varphi}_{1p} = \frac{V_2 (S_{\max 2} - V_2 t)}{a_2 l_3 \sin(\alpha + \varphi_{1p})} \quad (52)$$

ж) угловое ускорение звена a_2

$$\ddot{\varphi}_{1p} = - \frac{V_2^2 \sin(\alpha + \varphi_{1p}) + V_2 (S_{\max 2} - V_2 t) \cdot \cos(\alpha + \varphi_{1p}) \cdot \dot{\varphi}_{1p}}{a_2 l_3 \sin^2(\alpha + \varphi_{1p})} \quad (53)$$

з) значения вспомогательных величин $e_2; \varphi_{e2}; \varphi_{3e2}; \varphi_{4e2}$; и значения углов φ_2 и φ_3 по формулам (13), (14), (15), (16), (17) и (18).

Для машинных программ удобнее вычислять φ_{e2} по формуле:

$$\varphi_{e2} = - \arccos \left[\frac{d_2 \cdot \cos \gamma_2 - a_2 \cdot \cos \varphi_{1p}}{e_2} \right]; \quad (54)$$

и) аналоги скорости и ускорения шарнирного четырехзвенника механизма привода рукояти:

$$i_{41} = \frac{a_2 \sin(\varphi_{1p} - \varphi_3)}{b_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)}; \quad (55)$$

$$i_{31} = - \frac{a_2 \sin(\varphi_{1p} - \varphi_2)}{c_2 \sin(\varphi_3 - \varphi_2)}; \quad (56)$$

$$i'_{41} = \frac{a_2 \cos(\varphi_{1p} - \varphi_3) + i_{31}^2 c_2 - i_{41}^2 b_2 \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_3)}{b_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)} \quad (57)$$

к) угловую скорость и угловое ускорение рукояти:

$$\dot{\varphi}_2 = \dot{\varphi}_{1p} \cdot i_{41}; \quad (58)$$

$$\ddot{\varphi}_2 = \dot{\varphi}_{1p}^2 \cdot i'_{41} + \ddot{\varphi}_{1p} i_{41}; \quad (59)$$

л) значения $\sin \beta_1$ и $\sin \beta_2$ по формулам (7) и (12).

Вычисленные в п.3 значения параметров подставляем в уравнения (37) и (38), определяем значения усилий в гидроцилиндрах подъема стрелы и привода рукояти F_1 и F_2 для каждого текущего значения времени t .

Принимаем значения V_1 и V_2 постоянными в течение всего цикла движения. Это возможно при наличии двух контуров в гидросистеме.

При решении задачи приняты следующие допущения:

Податливость гидросистемы и сжимаемость рабочей жидкости равны нулю. Учитывая, что динамические силы в основном не превышает 30% от статических в период установившегося движения штока гидроцилиндра, данное допущение можно считать вполне корректным.

Исследования эффективности совмещения операций проводим следующим образом.

А. Совмещение движений рукояти и стрелы:

1. Задаемся значениями времени цикла $T_{\text{ц}}$ от 4 до 20 сек с интервалом 1 сек.

2. Принимаем $V_1 = V_2$ и определяем как минимальное из значений

$$V_1 = \frac{S_1}{T_u}; V_2 = \frac{S_2}{T_u} \quad (60)$$

проводим все расчеты и строим графики зависимости

$$F_1^{\max} = f(T_u); F_2^{\max} = f(T_u); F_{d1}^{\max} = f(T_u); F_{d2}^{\max} = f(T_u);$$

Принимаем $V_1 \neq V_2$; $V_1 = \frac{S_1}{T_u}$; $V_2 = \frac{S_2}{T_u}$ (61)

Это случай идеального совмещения, когда стрела и рукоять одновременно начинают и заканчивают движения.

Для этого случая проводим все расчеты и строим графики

$$F_1^{\max} = f(T_u); F_2^{\max} = f(T_u); F_{d1}^{\max} = f(T_u); F_{d2}^{\max} = f(T_u);$$

Б. Раздельное (последовательное) выполнение операций:

1. Задаем значениями времени цикла T_u от 4 с до 20 с с интервалом 1 с.

2. Принимаем $V_1 = V_2$ и определяем скорости

$$V = V_1 = V_2 = \frac{S_1 + S_2}{T_u} \quad (62)$$

Расчеты проводим для двух случаев последовательного движения звеньев манипулятора:

а) движение рукояти от начального до конечного положения при неподвижной стреле, а затем, движение стрелы от начального до конечного положения;

б) движение стрелы от начального до конечного положения, а затем, движение рукояти от начального до конечного положения.

Расчеты сводим в таблицы и по ним строим графики

$$F_1^{\max} = f(T_u); F_2^{\max} = f(T_u); F_{d1}^{\max} = f(T_u); F_{d2}^{\max} = f(T_u);$$

Г. Определяем целесообразность совмещения движения конкретных моделей манипуляторов со штатным насосом.

Для манипуляторов с грузовым моментом 52 кН.м (ЛВ-184), 75 кН.м (ЛВ-185), 90 кН.м (ЛВ-215) применяется насос 310.56 с номинальной подачей $Q_n = 80$ л/мин = $1,33 \cdot 10^{-3}$ м³/с.

Рассматриваем два случая: совмещение движений и раздельное движение звеньев манипулятора.

1. Совмещение движений.

При установке в гидросхеме делителя потока скорости движения штоков гидроцилиндров определяются из соотношения:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{f_2}{f_1} \quad (63)$$

где f_1 и f_2 - эффективные площади поршней гидроцилиндров подъема стрелы и привода рукояти.

Производительность насоса (без учета потерь)

$$Q_n = V_1 f_1 + V_2 f_2 \quad (64)$$

С учетом (63), получим: $Q_n = 2V_1 f_1$; или

$$V_1 = \frac{Q_n}{2f_1} \quad (65)$$

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{f_1}{f_2} \quad (66)$$

Для манипуляторов ЛВ-184А (52 кН.м) с учетом, что $f_1 = 7,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, $f_2 = 5,024 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; ($f_{2\text{н}} = 3,062 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$), имеем $V = 0,085 \text{ м/с}$, $V_2 = 0,13 \text{ м/с}$, (0,22 м/с).

Для манипуляторов ЛВ-185 (75 кН.м), ЛВ-215 (90 кН.м) при $f_1 = 15,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, $f_2 = 12,666 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; ($9,15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$)
 $V_1 = 0,042 \text{ м/с}$, $V_2 = 0,054 \text{ м/с}$, (0,072 м/с).

2. При раздельном (последовательном) движении звеньев:

$$V_1 = \frac{Q_{\text{н}}}{f_1} \quad (67)$$

$$V_2 = \frac{Q_{\text{н}}}{f_2} \quad (68)$$

Для ЛВ-184А (52 кН.м) $V_1 = 0,17 \text{ м/с}$, $V_2 = 0,26 \text{ м/с}$, (0,43 м/с).

Для ЛВ-185 (75 кН.м) и ЛВ-215 (90 кН.м) $V_1 = 0,085 \text{ м/с}$, $V_2 = 0,11 \text{ м/с}$, (0,15 м/с).

Предлагаемая методика определения целесообразности совмещения операций проверена на манипуляторах ЛВ-184А (52 кН.м), ЛВ-185 (75 кН.м) и ЛВ-215 (90 кН.м). В табл. 1 представлены исходные данные для расчетов.

Совмещение операций особенно эффективно при времени цикла $T_{\text{ц}} < 11 \text{ сек}$ (рис.3):

Так, при $T_{\text{ц}} = 6 \text{ сек}$ и раздельном движении звеньев максимальные значения усилий в гидроцилиндрах подъема стрелы и привода рукояти больше соответственно на 90% и 30%, чем при совмещении движений.

Динамические составляющие максимальных значений усилий гидроцилиндров подъема стрелы и привода рукояти при совмещении движений уменьшаются в 3 ÷ 8 раз в зависимости от времени цикла (рис.4).

Характер изменений усилий в гидроцилиндрах подъема стрелы и привода рукояти при их движении от начальных до конечных положений (рис.5 и рис.6) свидетельствует в пользу целесообразности совмещения операций. Так при совмещении операций (движений) с применением делителя потока усилие гидроцилиндра подъема стрелы на 30 %, а усилие в штоковой полости гидроцилиндра привода рукояти в 2 раза меньше, чем при раздельном движении (рис.5). Причем, усилие в гидроцилиндре подъема стрелы при совмещении операций изменяется более плавно, без резких пиков.

Различие в величине динамической составляющей усилий в гидроцилиндрах подъема стрелы и привода рукояти особенно проявляется в конце хода. (рис.6).

На рис.7 и 8 представлены изменения усилий гидроцилиндров подъема стрелы и привода рукояти за время рабочего цикла при различных скоростях штоков гидроцилиндров. При этом, в случае совмещения движений обеспечение таких же скоростей штоков гидроцилиндров, как и при раздельном движении, возможно при установке 2-х насосов. Из графиков видно, что при совмещении движений при $V_1 = V_2 = 0,15 \text{ м/с}$ максимальное значение усилия гидроцилиндра на 20 % больше, чем при раздельном выполнении операций, но время цикла при совмещении сокращается в 1,7 раза. При $V_1 = V_2 = 0,10 \text{ м/с}$, хотя максимальные значения усилий в гидроцилиндрах при совмещении и раздельном движении одинаковы, но время цикла при совмещении также сокращается в 1,7 раза.

Усилие гидроцилиндра привода рукояти при совмещении движений (операций) меньше в 1,8 раза, а время цикла в 1,5 ÷ 1,8 раза ниже, чем при раздельном движении рукояти и стрелы.

Аналогичные предыдущим зависимости получены и выявлен характер изменения усилий гидроцилиндров подъема стрелы и привода рукояти, их динамических составляющих при различных скоростях движения штоков гидроцилиндров гидроманипуляторов ЛВ-185 и ЛВ-215. При совмещении движений рукояти и стрелы усилие гидроцилиндра подъема стрелы снижается в 1,3 ÷ 1,7 раза, а привода рукояти в 1,2 ÷ 2,2 раза (для ЛВ-215 - снижается в 1,5 ÷ 4,0 раза): динамическая составляющая усилий уменьшается в 3,0 раза (ЛВ-185) и 2,5 ÷ 5 раз (ЛВ-215).

Исходные данные для расчетов

Таблица 1

	ЛВ-184А	ЛВ-185	ЛВ-215
m	884 кг	1047 кг	1257 кг
m_p	122 кг	190 кг	190 кг
m_c	311 кг	520 кг	520 кг
l_p	2,818 м	3,110 м	3,110 м
a_1	1,347 м	1,389 м	1,389 м
b_1	0,447 м	0,460 м	0,460 м
l	0,09 м	0,132 м	0,132 м
γ_1	76,25°	76,46°	76,46°
δ	11,61°	16,69°	16,69°
S_{01}	1,075 м	1,075 м	1,075 м
S_{max1}	1,705 м	1,705 м	1,705 м
a_2	0,565 м	0,476 м	0,476 м
b_2	0,211 м	0,302 м	0,302 м
c_2	0,593 м	0,539 м	0,539 м
d_2	0,139 м	0,225 м	0,225 м
l_3	1,841 м	1,683 м	1,683 м
α	7,02°	11,48°	11,48°
γ_2	-30,25°	-10,76°	-10,76°
α_p	95,44°	96,65°	96,65°
S_{02}	1,365 м	1,380 м	1,380 м
S_{max2}	2,365 м	2,180 м	2,180 м
J_c	1153 кг.м ²	3198 кг.м ²	3198 кг.м ²
J_{pk}	81 кг.м ²	153 кг.м ²	153 кг.м ²
φ_{10}	-31,61°	-36,69°	-36,69°
φ_{1max}	60,9°	48,3°	48,3°
φ_{1p0}	53°	46,5°	46,5°
φ_{1pmax}	146°	137°	137°
φ_{c0}	-20°	-20°	-20°
φ_{cmax}	72,5°	65°	65°

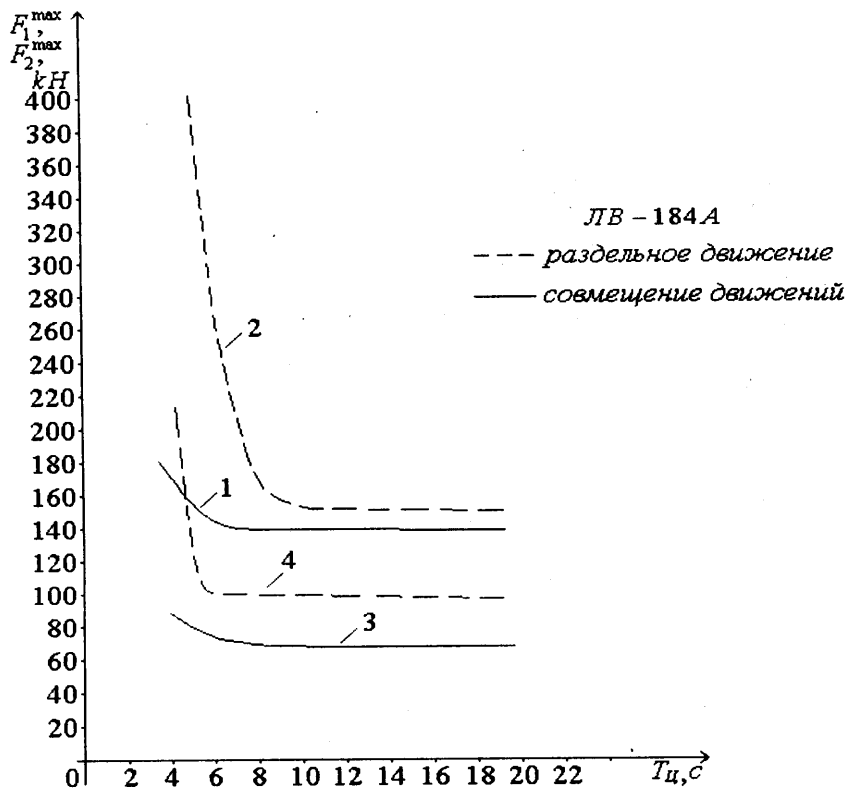


Рис. 3 Изменение максимального значения усилия гидроцилиндра подъема стрелы (1,2) и привода рукоятки (3,4) манипулятора ЛВ - 184А от времени цикла.

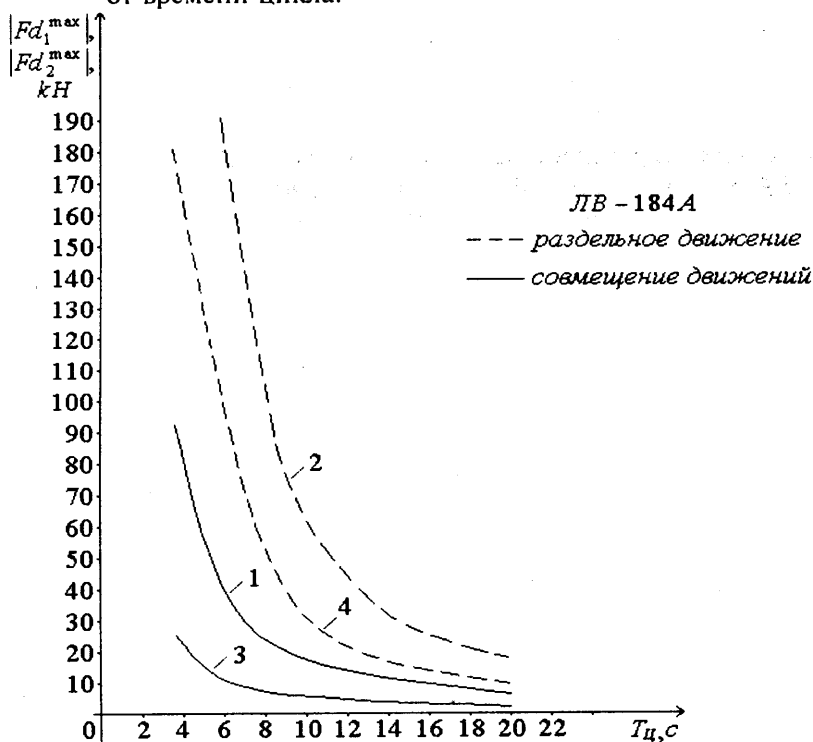


Рис.4 Зависимость максимального значения динамической составляющей усилия гидроцилиндра подъема стрелы (1,2) и привода рукоятки (3,4) манипулятора ЛВ - 184А от времени цикла.

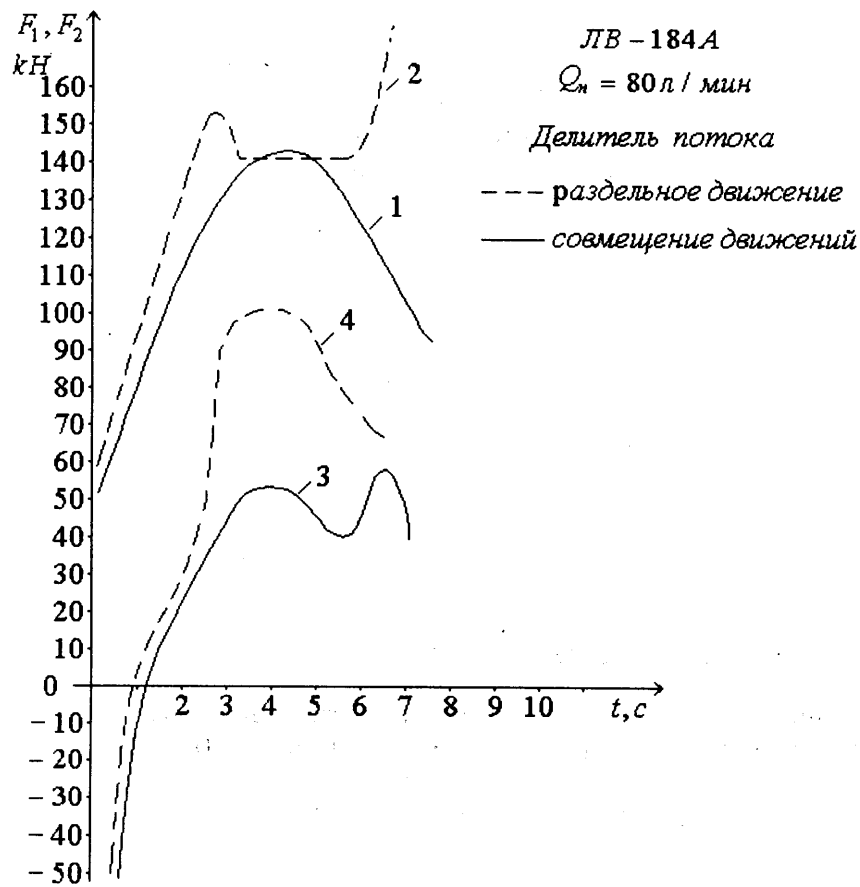


Рис. 5 Изменение усилий гидроцилиндра подъема стрелы (1,2) и привода рукояти (3,4) манипулятора ЛВ - 184А во времени.

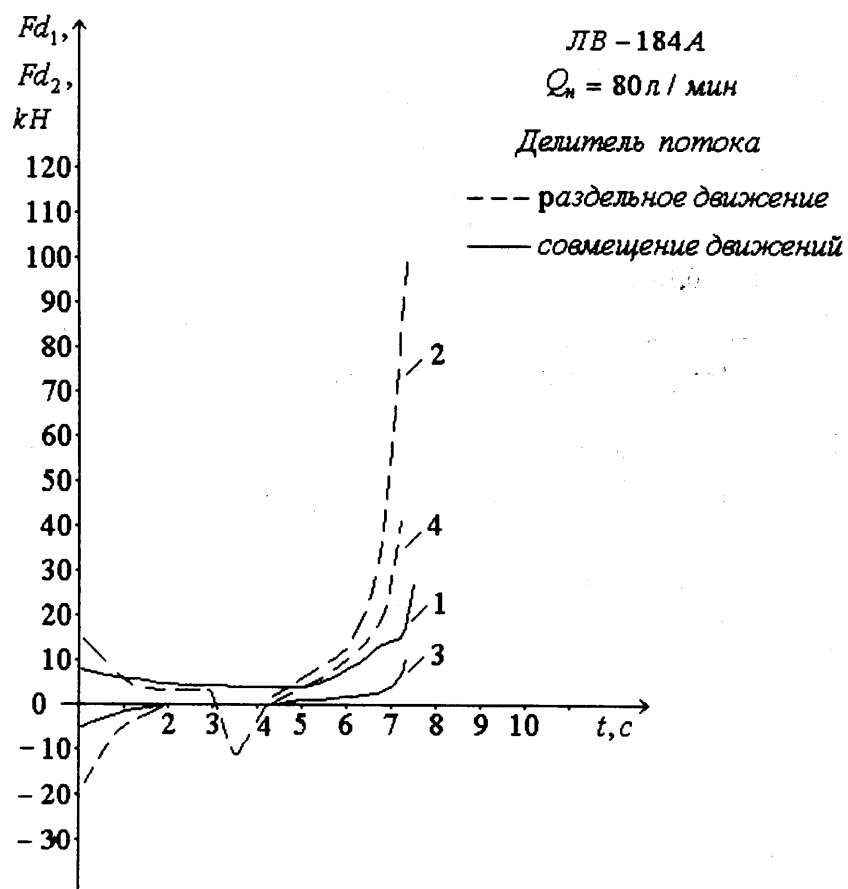


Рис. 6 Изменение динамической составляющей усилия гидроцилиндра подъема стрелы (1,2) и привода рукояти (3,4) манипулятора ЛВ - 184А во времени.

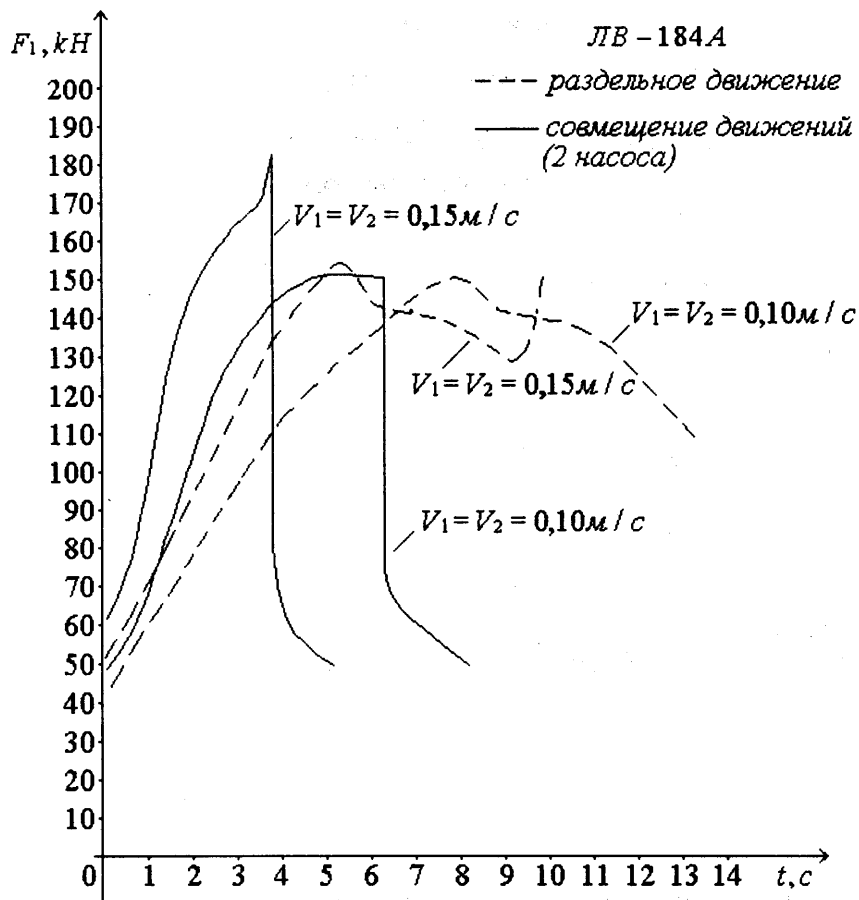


Рис. 7 Изменение усилия гидроцилиндра подъема стрелы при совмещенном и раздельном движении рукояти и стрелы за время рабочего цикла при различных скоростях штока.

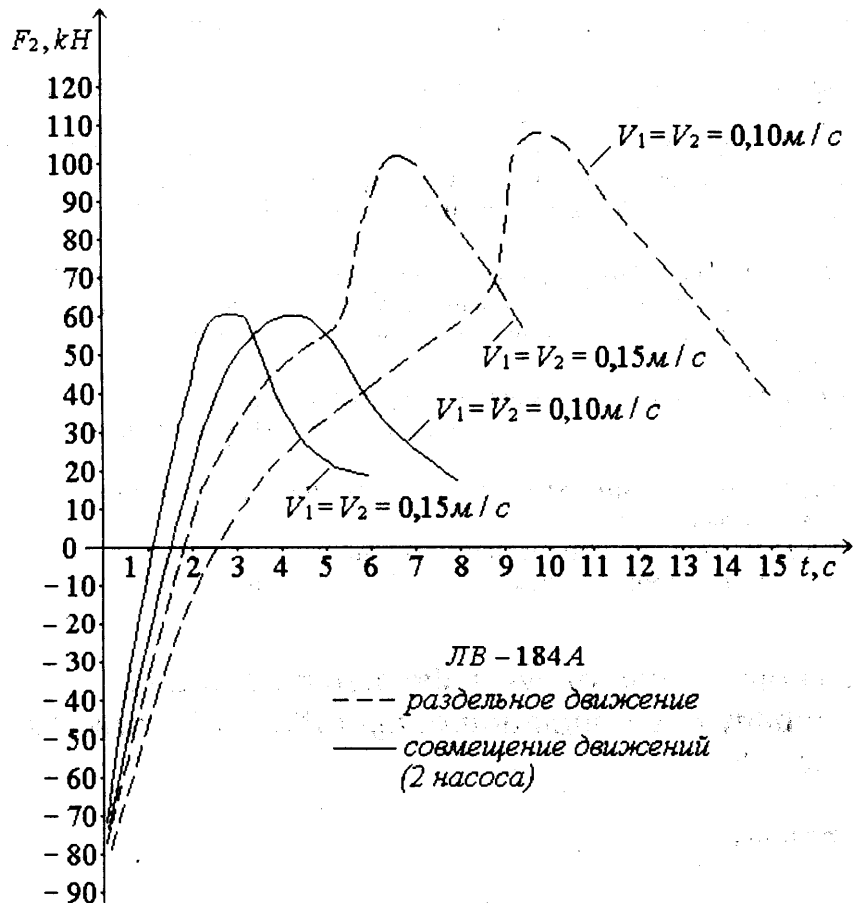


Рис.8 Изменение усилия гидроцилиндра привода рукояти при совмещении и раздельном движении рукояти и стрелы за время рабочего цикла при различных скоростях штока.

Из проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Эффективность совмещения операций зависит от времени цикла движения рукояти и стрелы. Совмещение особенно эффективно при $T_{ц} < 11$ сек
2. При заданном значении времени цикла динамические составляющие усилий гидроцилиндров подъема стрелы и привода рукояти при совмещении движений уменьшаются в $3 \div 8$ раза.
3. При установке штатного насоса ($Q_n = 80$ л/мин) и делителя потока (для совмещения операций) максимальные значения усилий гидроцилиндров снижаются в $1,16-2,00$ раза для различных манипуляторов, а динамические составляющие усилий гидроцилиндров снижаются в 4 раза.
4. Наиболее эффективной схемой совмещения операций является 2-х контурная гидросхема с 2-мя насосами. При одинаковых скоростях движения штоков усилия в гидроцилиндрах снижаются до 70% , а время цикла сокращается в $1,5 \div 2$ раза.

Литература

1. Александров В.А. Моделирование технологических процессов лесных машин: Учебник для вузов. - М.: Экология, -1996. - с.256.

2. *Андреев В.Н. Герасимов Ю.Ю.* Повышение качества и надежности технологического оборудования при проектировании. Часть 2. - Петрозаводский гос.университет. Петрозаводск, 1995. С.151.:ил.
3. *Баринов К.Н., Александров В.А.* Проектирование лесопромышленного оборудования. Учебное пособие. -Л.: Изд-во ЛГУ -1988., с.240.
4. *Баринов К.Н., Каршев Г.В.* Оптимизация компоновки манипуляторов лесных машин по косвенному показателю металлоемкости. Обоснование параметров машин и механизмов для лесозаготовок и лесного хозяйства. Межвузов.сб.науч.тр., -Л.: Изд-во ЛТА, -1990, с.22-25.
5. *Каршев Г.В, Кушляев В.Ф.* Формализация функциональных ограничений в задачах оптимизации компоновки манипуляторов лесных машин. Обоснование параметров машин и механизмов для лесозаготовок и лесного хозяйства: Межвузов.сб.науч.тр., -Л.: Изд-во ЛТА, -1990, с.54-58.
6. *Кашуба С.М., Турлай И.В.* Оптимизация элементов манипуляторов для лесоматериалов. Механизация лесоразработок и транспорта леса. -Минск.: Вышэйша школа. -1985, с.39-41.
7. *Коршун В.И., Баринов К.Н.* Оптимизация размещения гидроцилиндров манипулятора лесной машины. // Лесной журнал. 1984. №4, с.129-131.
8. *Пискунов А.С., Попиков П.И.* Влияние кинематических параметров механизма подъема на динамическую нагруженность гидроманипулятора. // Лесной журнал. 1985., №5.

The research of dynamic loading of hydraulic manipulator and explanation of advisability of combination of operations of arrow lifting and rotation of the handle

I.M.Bartnev, Z.K.Emtyl, P.I.Popikov

In the article the authors examine the dynamic loading of hydraulic manipulator with simultaneous movement of the arrow and the handle.