

DOI: [10.34220/2311-8873-2023-3-3-98-108](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-3-3-98-108)



УДК 630; 629.1

UDC 630; 629.1

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА СТРЕЛЫ МАНИПУЛЯТОРА АВТОСОРТИМЕНТОВОЗА

IMPROVEMENT OF THE LIFTING MECHANISM OF THE BOOM OF THE MANIPULATOR OF THE AUTO-SORTING TRUCK

Попиков Петр Иванович,

д.т.н., профессор кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Popikov Pyotr Ivanovich,

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh.

✉¹**Четверикова Ирина Владимировна,**
к.т.н., доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: chivles@rambler.ru

✉¹**Chetverikova Irina Vladimirovna,**
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: chivles@rambler.ru

Усков Алексей Иванович,

студент машиностроительного факультета, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: uskov.aleshcka@yandex.ru

Uskov Alexey Ivanovich,

student of the Faculty of Mechanical Engineering, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: uskov.aleshcka@yandex.ru

Мироненко Дарья Алексеевна,

студент кафедры информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, e-mail: dasha.mironenko.02@bk.ru

Mironenko Darya Alekseevna,

Student of the Department of Information and Control Systems, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, e-mail: dasha.mironenko.02@bk.ru

Пономарев Павел Иванович,

магистрант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Ponomarev Pavel Ivanovich,

Master's student of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh.

Аннотация. В статье рассмотрен рабочий процесс подъема стрелы манипулятора автосортиментовоза с энергосберегающим гидроприводом. С помощью математической модели обоснованы параметры энергосберегающего гидропривода и выявлено его положительное влияние на надежность машины в целом.

Annotation. The article describes the working process of lifting the boom of the manipulator of an auto-sorting truck with an energy-saving hydro-drive. Using a mathematical model, the parameters of an energy-saving hydraulic drive are substantiated and its positive effect on the reliability of the machine as a whole is revealed.

Ключевые слова: АВТОСОТИМЕНТО-ВОЗ, ГИДРООБОРУДОВАНИЕ, ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ, ДЕМПФИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО. **Keywords:** AUTO-SORTING TRUCK, HYDRAULIC EQUIPMENT, RELIABILITY IMPROVEMENT, DAMPING DEVICE.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Опыт эксплуатации лесных гидроманипуляторов автосортиментовозов показал, что из-за высоких динамических нагрузок при низких температурах воздуха отказы рукавов высокого давления составляют 29,7–56%, а гидроцилиндров 14,0 – 24,1%. При износе уплотнений уменьшается начальная амплитуда колебаний давления рабочей жидкости, а период колебаний увеличивается.

В целях правильной эксплуатации лесовозных автомобилей, оснащенных манипуляторами и увеличения срока службы гидравлического оборудования машины исследовались такие технологические операции манипулятора, как: нагруженные движения, пустые движения и движения манипулятора при выполнении операций внутри грузового отсека.

Время движения звеньев манипулятора фиксировалось секундомером с начала движения в грузовом пространстве до момента касания челюстей грейфера бревен, лежащих на земле, и до момента раскрытия челюстей, когда сортименты выгружались внутри грузового пространства. Учитывались случаи пустых движений манипулятора на удаление веток, сортировку и перемещение отдельных сортиментов.

Установлено, что технологический цикл манипулятора включает 63% времени загруженного движения, 30% времени тратится на холостые переезды и 7% за выполненные операции внутри грузового отсека.

Помимо изучения влияния различных факторов на отдельные элементы технологического цикла проанализирован ряд работ в зарубежных журналах, в которых авторы опубликовали результаты исследований по разным аспектам автоматизации манипуляторов. Анализ литературных источников [1-11] показал, что существует возможность повышения эффективности технологического процесса в виду рекуперации энергии в гидравлической системе стрелового оборудования автосортиментовоза. Исследований динамических и кинематических характеристик энергосберегающих устройств применительно к механизмам подъема лесных манипуляторов проведено недостаточно, поэтому дополнительные исследования с целью повышения надежности и долговечности эксплуатации гидравлических систем лесовозных автомобилей, а также снижения расхода топлива являются актуальными.

2 Материалы и методы

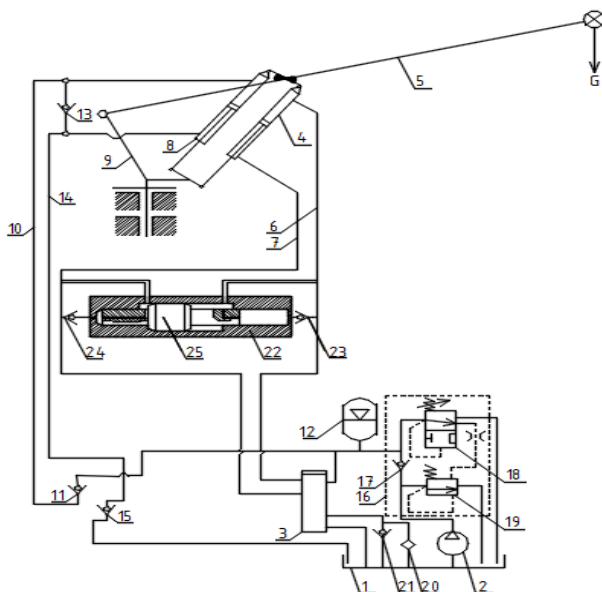
Поставленной целью является снижение динамической нагруженности и энергоемкости рабочих процессов механизма подъема стрелы лесного манипулятора путем обоснования параметров энергосберегающего гидропривода [12] на основе решения математической модели.

В качестве объекта исследований выбран серийный гидроманипулятор ЛВ-184А-10 (рис. 1), который монтируется на шасси автомобилей-сортиментовозов.



Рисунок 1 – Серийный гидроманипулятор ЛВ-184А-10

Предлагается новый энергосберегающий гидропривод механизма подъема стрелы лесного манипулятора, включающий дополнительный гидроцилиндр рекуперации и гидропневматический аккумулятор, который аккумулирует энергию торможения при опускании груза и возвращает ее при последующих подъемах груза (рис. 2).



- 1 – бак; 2 – насос; 5; 6; 7; 10; 14 – гидролинии; 4 – гидроцилиндр привода стрелы; 8 – дополнительный гидроцилиндр рекуперации; 11; 13; 15; 17; 21; 23 – обратные клапаны; 12 – гидроаккумулятор; 19 – предохранительный клапан; 18 – разгрузочное устройство; 22 – демпфер; 25 – плунжер.

Рисунок 2 – Энергосберегающий гидропривод механизма подъема стрелы лесного манипулятора

Для исследования процесса погрузочных работ с учетом подключения к гидроприводу механизма подъема стрелы гидропневматического устройства рассмотрен расчетный случай подъема груза с максимальным вылетом манипулятора на уклоне местности, например, при проседании грунта под правым аутригером в точке А (рис. 3).

Для обоснования параметров энергосберегающего гидропривода механизма подъема стрелы лесного манипулятора составлена расчетная схема, которая приведена на рис. 3.

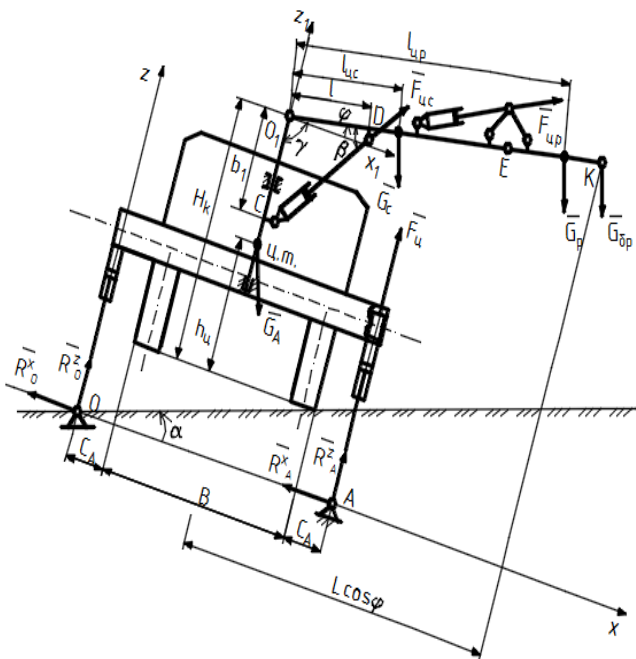


Рисунок 3 – Расчетная схема манипулятора на склоне

3 Результаты исследований

Предварительные расчеты с использованием программы MathCad позволили получить кинематические и динамические параметры энергосберегающего гидропривода.

Разработана математическая модель подъема стрелы манипулятора с энергосберегающим гидроприводом при работе на уклоне, когда гидроаккумулятор полностью заряжен и отдает накопленную энергию при опускании груза на подъем стрелы:

$$\left\{ \begin{array}{l} (J_{бр} + J_p + J_c) \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{\pi d_c^2 l \sin \beta}{4} \cdot p - \\ - (G_{бр}L + G_p l_{ц,р} + G_c l_{ц,с}) \cos(\varphi - \alpha), \\ q_n n_n = \frac{\pi d_c^2 l \sin \beta}{4} \cdot \frac{d\varphi}{dt} - k_{ак} \sqrt{P_A - p} + \\ + a_y p - \frac{V_{сум}}{E_{пр}} \cdot \frac{dp}{dt}, \\ \frac{dP_A}{dt} = \frac{-E_{ж} k_{ак}}{V_0 \left[1 - \left(\frac{P_0}{P_A} \right)^{\frac{1}{K}} + \frac{E_{ж}}{K P_A} \left(\frac{P_0}{P_A} \right)^{\frac{1}{K}} \right]} \cdot \sqrt{P_A - p}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $J_{бр}$, J_p , J_c – соответственно моменты инерции пачки бревен, рукояти, стрелы относительно точки O_1 , $кг \cdot м^2$;

φ – угол подъема стрелы, рад;

α – угол уклона, рад;

t – время, с;

$G_{бр}$ – сила тяжести пачки бревен в захвате, Н;

d_c – внутренний диаметр гидроцилиндра стрелы, м;

q_n – рабочий объем насоса, $м^3/об$;

n_n – частота вращения насоса, $с^{-1}$;

p – текущее значение давления в напорном трубопроводе, Па;

P_A – текущее значение давления в гидроаккумуляторе, Па;
 P_0 – давление предварительной зарядки гидроаккумулятора, Па;
 V_0 – рабочий объем гидроаккумулятора, м³;
 $E_{пр}$ – приведенный модуль упругости рабочей жидкости и упругих элементов гидропривода, Па;
 $E_{ж}$ – модуль упругости жидкости, Па;
 K – показатель адиабаты газа в гидроаккумуляторе, равный 1,41;
 μ – коэффициент расхода равен 0,7...0,8;
 $d_{ак}$ – внутренний диаметр штуцера гидроаккумулятора, м;
 d_p – внутренний диаметр гидроцилиндра рекуперации энергии, м;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 ρ – плотность рабочей жидкости, кг/м³;
 $V_{сум}$ – суммарный объем подводящего трубопровода, м³;
 $k_{ак}$ – коэффициент дросселирования штуцера аккумулятора, м³·с·Па^{-1/2}

$$k_{ак} = \frac{\mu \pi d_{ак}^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho}}. \quad (2)$$

Обозначения остальных геометрических параметров механизма подъема стрелы, входящих в уравнения (1), ясны из рис.3. Отметим, что в треугольнике O_1DC из теоремы косинусов вытекает соотношение между углами β , γ , φ

$$\sin \beta = \frac{b_1 \sin(\gamma + \varphi)}{\sqrt{l^2 + b^2 - 2lb_1 \cos(\gamma + \varphi)}}. \quad (3)$$

В настоящей работе для возможности решения задачи сделано допущение, что угол β не зависит от t на отдельном участке, это означает что отношение в правой части формулы постоянное при каждом t .

На отрезке $t \in [0; t_k]$ рассматривается задача Коши:

$$\begin{cases} \varphi(0) = \varphi_0, & p(0) = p_0, & P_A(0) = P_{A_0}, \\ \varphi'(0) = \varphi_1, & p'(0) = p_1, & P'_A(0) = P_{A_1}. \end{cases} \quad (4)$$

Представлена математическая модель процесса подъема стрелы, описываемая системой нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка. При старшей производной стоит необратимый оператор – такие системы являются неразрешенными относительно этой производной. Вследствие нелинейности системы найти решение в явном виде зависимости от t невозможно, что влечет необходимость применения приближенных методов. Искомые функции вычисляются в узловых точках t_i . Обозначим

$$\varphi_i = \varphi(t_i), \quad p_i = p(t_i), \quad P_{A_i} = P_A(t_i), \quad (5)$$

где номер i меняется от 0 до n включительно. Одним из приближенных методов является метод конечных разностей, в котором все производные заменяются соответствующими разностными аналогами:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\varphi}{dt}(t_i) \approx \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{h}, \frac{d^2\varphi}{dt^2}(t_i) \approx \frac{\varphi_{i+2} - 2\varphi_{i+1} + \varphi_i}{h^2}, \\ \frac{dp}{dt}(t_i) \approx \frac{p_{i+1} - p_i}{h}, \frac{d^2p}{dt^2}(t_i) \approx \frac{p_{i+2} - 2p_{i+1} + p_i}{h^2}, \\ \frac{dP_A}{dt}(t_i) \approx \frac{P_{A_{i+1}} - P_{A_i}}{h}, \frac{d^2P_A}{dt^2}(t_i) \approx \frac{P_{A_{i+2}} - 2P_{A_{i+1}} + P_{A_i}}{h^2}. \end{array} \right. \quad (6),$$

что приводит к системе рекуррентных соотношений второго порядка.

Поскольку система уравнений (1) не разрешена относительно производной, то задача Коши имеет решение не при всех начальных значениях.

Для ее разрешения относительно старшей производной применяется результат, полученный в работе [теорема], благодаря чему система распадается на равенства в подпространствах уменьшающихся размерностей. Такой способ решения носит название метода каскадной декомпозиции и был успешно применен, например, при исследовании возмущений линейных алгебро-дифференциального уравнения, вызываемых наличием малого параметра в работе.

Решение задачи проведем в соответствии с теоремой, изложенной в вышеуказанной работе.

Решение задачи (1), существует тогда и только тогда, когда выполнены следующие равенства:

$$\begin{aligned} p_1 - p_0 &= \sigma(\varphi_1 - \varphi_0) + \\ &+ h \cdot \frac{E_{\text{пр}}}{V_{\text{сум}}} \cdot (-k_{\text{ак}}\sqrt{P_A - p} + a_y p_0 - q_n n_n), \\ P_{A_1} - P_{A_0} &= \frac{-h E_{\text{ж}} k_{\text{ак}}\sqrt{P_{A_0} - p_0}}{V_0 \left[1 - \left(\frac{P_0}{P_{A_0}}\right)^{\frac{1}{K}} + \frac{E_{\text{ж}}}{K P_{A_0}} \left(\frac{P_0}{P_{A_0}}\right)^{\frac{1}{K}} \right]}. \end{aligned} \quad (7)$$

Для решения задачи разработан следующий алгоритм решения задачи (1) на ЭВМ.

1. Ввести значения коэффициентов $J_{\text{бр}}, J_p, J_c, d_c^2, l, G_{\text{бр}}, L, G_p, l_{\text{ц,р}}, G_c, l_{\text{ц,с}}, \alpha, q_n, n_n, \mu, a_y, V_{\text{сум}}, E_{\text{пр}}, E_{\text{ж}}, V_0, P_0, K, \rho$. Определить $k_{\text{ак}}$ формулой (2) и σ - формулой

$$\sigma = \frac{\pi d_c^2 l E_{\text{пр}} \sin \beta i}{4V_{\text{сум}}}. \quad (8)$$

2. Ввести начальные значения (в момент времени $t = 0$) искомых величин: φ_0, p_0, P_{A_0} .

Из теоремы выше следует, что значения скоростей изменения φ_1, p_1, P_{A_1} искомых величин в начальный момент времени нужно вводить так, чтобы выполнялись равенства (7).

3. Ввести значение t_k правого конца отрезка изменения переменной t . Этот отрезок разбить равноотстоящими узловыми точками t_i с шагом h :

$$t_i = i \cdot h, \quad (9)$$

где $h = \frac{t_k}{n}$, n – количество точек разбиения

Замечание. Чем больше n , тем меньше погрешность приближения реальных функций их значениями в узловых точках.

4. Ввести следующие величины

$$\Phi_i^{(1)} = \frac{\pi d_c^2 h^2 l \sin \beta}{4(J_{6p} + J_p + J_c)} p_i - \frac{(G_{6p}L + G_p l_{ц,п} + G_c l_{ц,с}) h^2}{J_{6p} + J_p + J_c} \cos(\varphi_i - \alpha), \quad (10)$$

$$\Phi_i^{(2)} = \frac{\pi^2 d_c^4 h^2 l^2 E_{пп} \sin^2 \beta}{16 V_{сум} (J_{6p} + J_p + J_c)} p_i - \frac{\pi d_c^2 h^2 E_{пп} l \sin \beta (G_{6p}L + G_p l_{ц,п} + G_c l_{ц,с})}{J_{6p} + J_p + J_c} \cos(\varphi_i - \alpha) - \frac{E_{пп} h k_{ак} \mu}{V_{сум}} \sqrt{P_{A_{i+1}} - p_{i+1}} + \frac{a_y E_{пп} h}{V_{сум}} p_{i+1} - \frac{E_{пп} h n_n q_n}{V_{сум}}, \quad (11)$$

$$\Phi_i^{(3)} = - \frac{-h k_{ак} E_{ж} K P_{A_{i+1}} \sqrt{P_{A_{i+1}} - p_{i+1}}}{K P_{A_{i+1}} \left(\frac{P_0}{P_{A_{i+1}}}\right)^{\frac{1}{K}} V_0 - E_{ж} V_0 \left(\frac{P_0}{P_{A_{i+1}}}\right)^{\frac{1}{K}} - K V_0 P_{A_{i+1}}}. \quad (12)$$

5. Искомые значения при каждом $i = 2, 3, \dots, n$ определяются из итерационных процессов, когда каждое значение получается при вычислении предыдущих.

Угол φ (в радианах) определяется формулой

$$\varphi_i = \varphi_0 + i(\varphi_1 - \varphi_0) + \sum_{k=1}^i \sum_{j=0}^{k-1} C_i^k C_{k-1}^j (-1)^{k-1-j} (i-1-j) \Phi_j^{(1)}; \quad (13)$$

давление p – формулой

$$p_i = p_1 + i \sigma (\varphi_1 - \varphi_0) + \sigma \sum_{k=1}^i \sum_{j=0}^{k-1} C_i^k C_{k-1}^j (-1)^{k-1-j} (i-2-j) \Phi_j^{(1)} + \sum_{k=1}^i \sum_{j=0}^{k-1} C_i^k C_{k-1}^j (-1)^{k-1-j} \Phi_j^{(2)} + \sigma \Phi_{i-1}^{(1)} - \Phi_{i-1}^{(2)}; \quad (14)$$

давление P_A – формулой

$$P_{A_i} = P_{A_1} + \sum_{k=1}^i \sum_{j=0}^{k-1} C_i^k C_{k-1}^j (-1)^{k-1-j} \Phi_j^{(3)} - \Phi_{i-1}^{(3)}, \quad (15)$$

где обозначено

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}. \quad (16)$$

6. Зная значения φ_i , p_i , p_{A_i} , вычисленные на предыдущем шаге, можно вычислить их первые и вторые производные по приближенным формулам (4).

7. Зная угол φ_i , можно вычислить значение угла β из формулы (3) и построить график зависимости $\sin(\beta)$ от угла поворота стрелы φ_i (рис. 4), данные которого используются в расчетах.

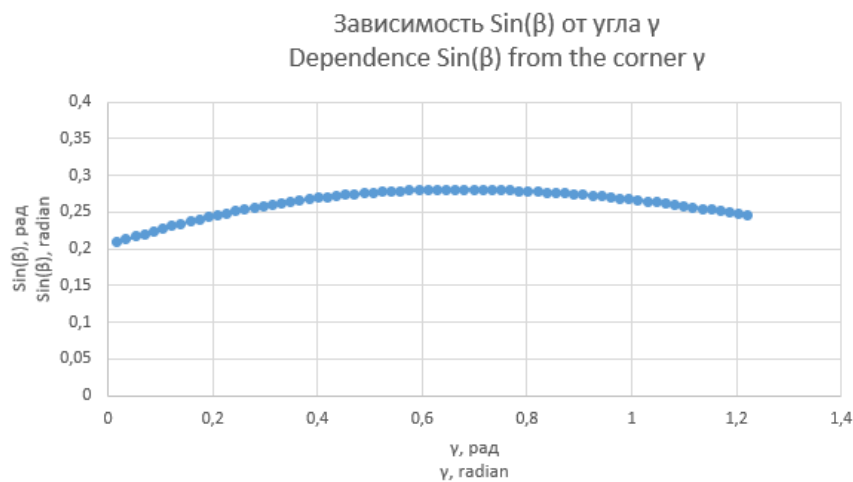


Рисунок 4 – Зависимость $\sin(\beta)$ от угла поворота стрелы φ_i

На рисунке 5 представлена зависимость угла поворота стрелы от времени, угол поворота возрастает сначала плавно, а затем резко возрастает, что объясняется кинематическими свойствами четырехзвенного механизма.

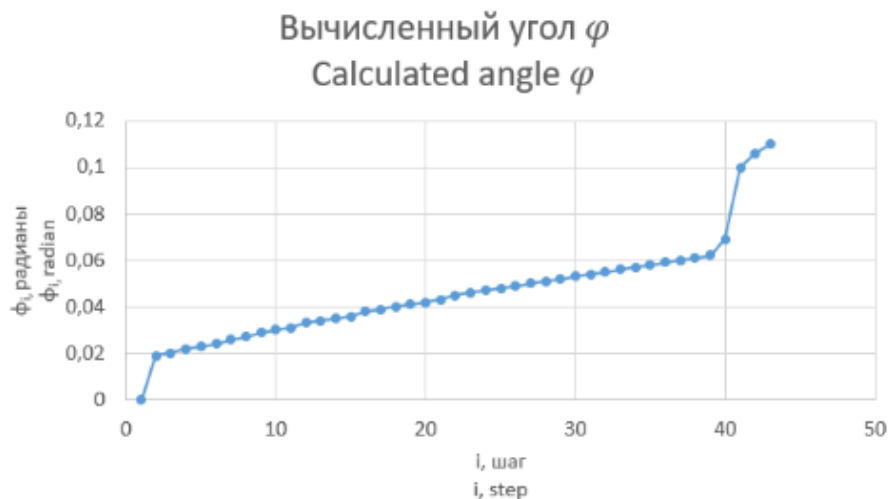


Рисунок 5 – Рассчитанное значение φ в радианах

Графики зависимостей давления рабочей жидкости (рис. 6) показали, что подключение энергосберегающего демпфирующего устройства в гидропривод механизма подъема стрелы позволяет снизить пиковое давление в гидролинии поршневой полости гидроцилиндра при переходных режимах на в 1,5-1,6 раза.

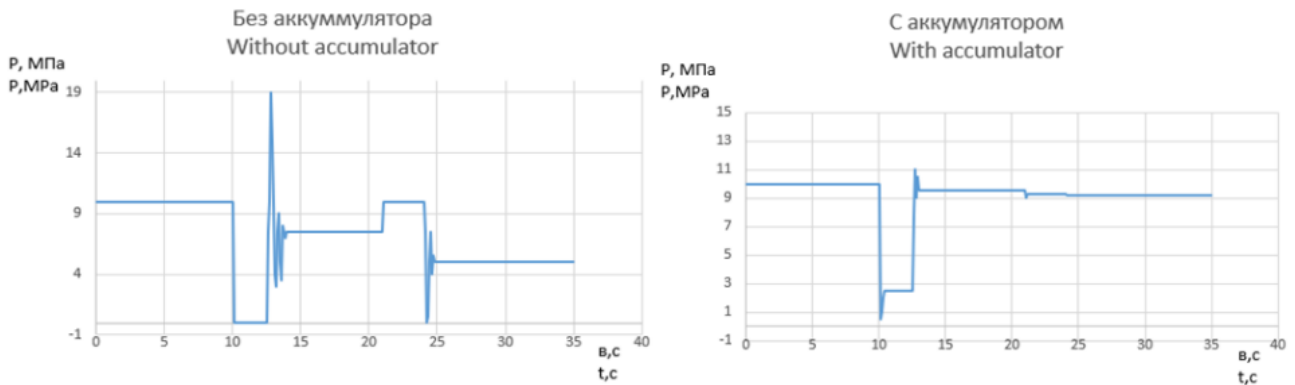


Рисунок 6 – Теоретические зависимости давления в гидросистеме при использовании энергосберегающего демпфирующего устройства

4 Обсуждение и заключение

Применение нового энергосберегающего гидропривода механизма подъема стрелы манипулятора лесовозного автомобиля позволяет существенно сгладить всплески давления в гидросистеме, кроме этого в переходных режимах устраняются высокочастотные колебания давления, вызывающие усталостное разрушение металлоконструкций элементов манипулятора. Всплески давления рабочей жидкости не превышают давления настройки срабатывания предохранительных клапанов, которые не превращают гидравлическую энергию потока жидкости в тепловую, и гидросистема манипулятора не перегревается.

Таким образом, снижение динамической нагруженности и энергоемкости рабочих процессов механизма подъема стрелы лесного манипулятора путем обоснования параметров энергосберегающего демпфирующего устройства гидропривода позволяет уменьшить энергозатраты, а также время простоев в ремонте из-за выхода из строя гидрооборудования. В результате модернизации гидропривода механизма подъема стрелы манипулятора автосортиментовоза появится возможность эксплуатации автомобильных средств манипуляторного типа с наименьшими нагрузками на гидропривод, что сократит стоимость обслуживания и увеличит надежность машин в целом. Результаты исследований, проведенных применительно к манипуляторам лесовозных машин применимы к манипуляторам, которыми оснащаются другие транспортные средства в т.ч. автомобили-эвакуаторы.

Список литературы

- 1 Jensen, K. J. Novel Concept for Electro- Hydrostatic Actuators for Motion Control of Hydraulic Manipulators / M. K. Ebbesen, M. R. Hansen // *Energies*. – 2021 – Т. 14 – №. 20 – С. 6566
- 2 Jensen, K. J. Anti-swing control of a hydraulic loader crane with a hanging load / M. K. Ebbesen, M. R. Hansen // *Mechatronics*. – 2021 – Т. 77 –С. 102599
- 3 Qu S. et al. A high-efficient solution for electro-hydraulic actuators with energy regeneration capability // *Energy*. – 2021 – Т. 216 – С. 119291
- 4 Agostini T. etal. Effect of energy recovery on efficiency in electro-hydrostatic closed system for differential actuator // *Actuators*. – Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020 – Т. 9 – №.1 – С. 12

5 Тарбеев, А.А. Обеспечение надежности гидроприводов лесных машин совершенствованием методов и средств их диагностирования [текст]: автореф. Канд. Техн. Наук /А.А. Тарбеев – Йошкар-Ола, 2019 – 17.

6 Попиков, П. И. Повышение технического уровня гидропривода манипуляторов автосортиментовозов / П. И. Попиков, И. В. Четверикова, А. С. Черных // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2020. – Т. 8, № 1(48). – С. 129-134. – DOI 10.34220/2308-8877-2020-8-1-129-134. – EDN MLKESM.

7 Попиков, П. И. Повышение эффективности лесного манипулятора при оснащении энергосберегающим гидроприводом / П. И. Попиков, И. В. Четверикова, С. В. Зимарин // Повышение эффективности управления устойчивым развитием лесопромышленного комплекса : Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 90-летию Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова, Воронеж, 15–16 октября 2020 года / Редколлегия: Е.А. Яковлева [и др.]. – Воронеж: Издательство "Знание-М", 2020. – С. 354-358. – DOI 10.38006/907345-73-7.2020.354.358. – EDN THJCAZ.

8 Четверикова, И. В. Анализ манипуляторов для лесозаготовок в условиях Северо-Западного федерального округа / И. В. Четверикова, А. И. Усков // Современный лесной комплекс страны: проблемы и тренды развития : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 07 октября 2022 года / Отв. редактор А.А. Платонов. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2022. – С. 75-80. – DOI 10.58168/MFCCPTD2022_75-80. – EDN AVYUVC.

9 Болгов, А.В. Совершенствование механизма подъема стрелы лесного манипулятора / А. В. Болгов, И. Д. Евсиков, И. В. Четверикова, В. П. Попиков // Наука и технологии: модернизация, инновации, прогресс : сборник научных трудов по материалам XIII Международной научно-практической конференции, Анапа, 28 марта 2023 года. – Анапа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский центр экономических и социальных процессов» в Южном Федеральном округе, 2023. – С. 11-15. – EDN ПЕОНW.

10 Zimarin, S. V. Comparative studies of energy efficient machines based on cluster analysis / S. V. Zimarin, I. V. Chetverikova, A. I. Uskov // , 01–30 апреля 2022 года, 2022. – P. 179-184. – EDN GRSZBY.

11 Четверикова, И.В. Дополнительные возможности совершенствования гидросистемы лесного манипулятора, ведущие к снижению динамической нагрузки / И. В. Четверикова, П. И. Попиков, Н. А. Бородин [и др.] // Воронежский научно-технический Вестник. – 2017. – Т. 3, № 3(21). – С. 49-52. – EDN ZHVAJR.

12 Патент № 2652596 С1 Российская Федерация, МПК В66С 13/42. Гидропривод грузоподъемного механизма стрелы манипулятора : № 2017100113 : заявл. 09.01.2017 : опубл. 27.04.2018 / П. И. Попиков, В. А. Зеликов, К. А. Меняйлов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова". – EDN OLSKPV.

References

1 Jensen, K. J. Novel Concept for Electro-Hydrostatic Actuators for Motion Control of Hydraulic Manipulators / M. K. Ebbesen, M. R. Hansen // Energies. – 2021 – Vol. 14 – No. 20 – p. 6566

2 Jensen, K. J. Anti-swing control of a hydraulic loader crane with a hanging load / M. K. Ebbesen, M. R. Hansen // Mechatronics. – 2021 – Vol. 77 –p. 102599

3 Qu S. et al. A high-efficient solution for electro-hydraulic actuators with energy regeneration capability // Energy. – 2021 – Vol. 216 – p. 119291

4 Agostini T. et al. Effect of energy recovery on efficiency in electro-hydrostatic closed system for differential actuator // Actuators. – Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020 – Vol. 9 – No. 1 – p. 12

5 Tarbeev, A.A. Ensuring the reliability of hydraulic drives of forest machines by perfecting methods and means of their diagnosis [text]: abstract. Cand. Tech. Sciences /A.A. Tarbeev – Yoshkar-Ola, 2019 – 17.

6 Popikov, P. I. Raising the technical level of hydraulic drive of manipulators of vehicles / P. I. Popikov, I. V. Chetverikova, A. S. Chernykh // Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. – 2020. – Vol. 8, No. 1(48). – pp. 129-134. – DOI 10.34220/2308-8877-2020-8-1-129-134. – EDN MLKECM.

7 Popikov, P. I. Improving the efficiency of a forest manipulator when equipped with an energy-saving hydraulic drive / P. I. Popikov, I. V. Chetverikova, S. V. Zimarin // Improving the efficiency of sustainable development management of the timber industry complex : Materials of the All-Russian Scientific Conference dedicated to the 90th anniversary of the Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov, Voronezh, October 15-16, 2020 / Editorial Board: E.A. Yakovleva [et al.]. – Voronezh: Publishing House "Znanie-M", 2020. – pp. 354-358. – DOI 10.38006/907345-73-7.2020.354.358. – EDN THJCAZ.

8 Chetverikova, I. V. Analysis of manipulators for logging in the conditions of the North-Western Federal District / I. V. Chetverikova, A. I. Uskov // Modern forest complex of the country: problems and development trends : Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Voronezh, October 07, 2022 / Editor A.A. Platonov. – Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2022. – pp. 75-80. – DOI 10.58168/MFCCPTD2022_75-80. – EDN AVYUVC.

9 Bolgov, A.V. Improving the mechanism of lifting the boom of a forest manipulator / A.V. Bolgov, I. D. Evsikov, I. V. Chetverikova, V. P. Popikov // Science and Technology: modernization, innovation, progress : a collection of scientific papers based on the materials of the XIII International Scientific and Practical Conference, Anapa, March 28, 2023. – Anapa: Limited Liability Company "Research Center for Economic and Social Processes" in the Southern Federal District, 2023. – pp. 11-15. – EDN IIEONW.

10 Zimarin, S. V. Comparative studies of energy efficient machines based on cluster analysis / S. V. Zimarin, I. V. Chetverikova, A. I. Uskov // , 01-30 April 2022, 2022. – P. 179-184. – EDN GRSZBY.

11 Chetverikova, I.V. Additional possibilities for improving the hydraulic system of the forest manipulator, leading to a decrease in dynamic load / I. V. Chetverikova, P. I. Popikov, N. A. Borodin [et al.] // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2017. – Vol. 3, No. 3(21). – pp. 49-52. – EDN ZHVAJR.

12 Patent No. 2652596 C1 Russian Federation, IPC B66C 13/42. Hydraulic drive of the lifting mechanism of the manipulator boom : No. 2017100113 : application 09.01.2017 : published 27.04.2018 / P. I. Popikov, V. A. Zelikov, K. A. Menyailov [et al.] ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov". – EDN OLSKPV.

© Попиков П.И., Четверикова И.В., Усков А.И., Мироненко Д.А., Пономарев П.И., 2023