

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/10>

УДК 630*3 : 621.866-82



Влияние податливости гидропривода на динамическую нагруженность механизмов лесного манипулятора

Иван Д. Евсиков¹✉, evsfan1997@gmail.com, 0009-0007-3388-3275

Дмитрий С. Богданов¹, bogdanov_s69@mail.ru 0000-0003-4179-8189

Алина В. Попикова¹, poalinka@mail.ru 0000-0002-9387-4254

Андрей В. Конюхов¹, akoniukhov@gmail.com 0000-0002-1828-3673

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Россия

Проведен анализ исследований динамики гидропривода технологических машин и оборудования. Установлено, что вопросам влияния податливости гидропривода на динамическую нагруженность отдельных механизмов уделено недостаточно внимания. Цель работы – оценка влияния податливости гидропривода на динамическую нагруженность механизмов лесного манипулятора при совершенствовании компоновки гидроцилиндров на основе математического моделирования. Представлена математическая модель движения стрелы манипулятора с учетом сил инерции и расходов рабочей жидкости. Сделана модельная оценка динамики гидропривода и давления рабочей жидкости при повороте стрелы лесного манипулятора. Задача решалась в рамках работы над программным комплексом для исследований скачков давления рабочей жидкости в гидроцилиндрах. Результаты оценки показали, что оптимальные точки присоединения гидроцилиндра к стреле и к поворотной колонне зависят от коэффициента податливости. В вычислительном эксперименте по определению оптимальной компоновки гидроцилиндра механизма подъема стрелы манипулятора по критерию минимизации скачков давления рабочей жидкости были получены оптимальные точки присоединения гидроцилиндра к стреле $b_1 = 0.9$ м и к поворотной колонне $OB = 0.7$ м, а при учете коэффициента податливости были получены новые оптимальные точки присоединения гидроцилиндра: $b_1 = 1$ м, $OB = 0.85$ м. Для интерпретации модели и уточнения влияния податливости гидропривода на динамическую нагруженность механизмов лесного манипулятора необходимо проведение стендовых испытаний.

Ключевые слова: гидропривод, динамическая нагруженность, коэффициент податливости, моделирование.

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: Авторы выражают признательность заведующему кафедрой общей и прикладной физики доценту Евсиковой Наталье Юрьевне и доценту кафедры общей и прикладной физики Камаловой Нине Сергеевне за консультации при подготовке материалов для статьи.


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Влияние податливости гидропривода на динамическую нагруженность механизмов лесного манипулятора / И. Д. Евсиков, Д. С. Богданов, А. В. Попикова, А. В. Конюхов // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 3 (51). – С. 131–142. – Библиогр.: с. 138–141 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/10>.


Поступила 17.08.2023 Пересмотрена 16.11.2023 Принята 17.11.2023 Опубликовано онлайн 30.11.2023


Article

Influence of Hydraulic Drive Compliance on Dynamic Loading of Forest Manipulator Mechanisms

Ivan D. Evsikov¹✉, evsfan1997@gmail.com,  0009-0007-3388-3275

Dmitry S. Bogdanov¹, bogdanov_s69@mail.ru  0000-0003-4179-8189

Alina V. Popikova¹, poalinka@mail.ru  0000-0002-9387-4254

Andrey V. Konyukhov¹, akoniukhov@gmail.com  0000-0002-1828-3673

¹Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, 394087, Russian Federation

Abstract

The article analyzes the research into the dynamics of the hydraulic drive of technological machines and equipment. It has been established that insufficient attention has been paid to the issues of the influence of hydraulic drive compliance on the dynamic loading of individual mechanisms. The purpose of the work is to assess the effect of hydraulic drive compliance on the dynamic loading of forest manipulator mechanisms when improving the layout of hydraulic cylinders based on mathematical modeling. A mathematical model of the movement of the manipulator boom is presented, taking into account the forces of inertia and the flow rate of the working fluid. A model estimate of the dynamics of the hydraulic drive and the pressure of the working fluid was made when the boom of the forest manipulator is turned. The problem was solved as part of the work on a software package for studying the pressure jumps of the working fluid in hydraulic cylinders. The evaluation results showed that the optimal points of attachment of the hydraulic cylinder to the boom and to the rotary column depend on the compliance coefficient. In a computational experiment to determine the optimal layout of the hydraulic cylinder of the lifting mechanism of the manipulator boom, according to the criterion of minimizing the pressure surges of the working fluid, the optimal points of attachment of the hydraulic cylinder to the boom $b_1 = 0.9$ m and to the rotary column $OB = 0.7$ m were obtained, and when taking into account the compliance coefficient were new optimal hydraulic cylinder attachment points were obtained: $b_1 = 1$ m, $OB = 0.85$ m. To interpret the model and clarify the effect of hydraulic drive compliance on the dynamic loading of forest manipulator mechanisms, it is necessary to conduct bench tests.

Key words: hydraulic drive, dynamic loading, compliance coefficient, modeling.

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the head of the Department of General and Applied Physics, Associate Professor Evsikova Natalya Yurievna and Associate Professor of the Department of General and Applied Physics Kamalova Nina Sergeevna for consultations in preparing materials for the article.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Evsikov I. D., Bogdanov D. S., Popikova A. V., Konyukhov A. V. (2023). Influence of Hydraulic Drive Compliance on Dynamic Loading of Forest Manipulator Mechanisms. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 3 (51), pp. 131-142 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/10>.

Received 17.08.2023. **Revised** 16.11.2023. **Accepted** 17.11.2023. **Published online** 30.11.2023.

Введение

В настоящий момент на лесопромышленных предприятиях Российской Федерации наиболее остро встает проблема импортозамещения. Поэтому задача разработки эффективной техники для лесного комплекса является актуальной. Среди разнообразия критериев эффективности любой технической системы (металлоемкости, себестоимости, надежности и т.д.), на наш взгляд, особо выделяется надежность и энергоемкость, а возможным решением может стать разработка энергосберегающих демпфирующих узлов, которые снижают динамическую нагруженность и энергозатраты. Податливость гидропривода по физической сущности является величиной, обратной объемной жесткости. Разработка возможных энергосберегающих демпфирующих узлов при исследовании динамики подъема стрелы лесных манипуляторов, которыми оборудованы современные погрузочно-транспортные машины, может значительно повысить как надежность машин в целом, так и эффективность проводимых работ.

Известно, что в рабочих процессах лесотранспортных машин манипуляторного типа, осуществляющих вывоз сортиментов и хлыстов при проведении сплошных рубок или рубок лесоводственного ухода, возникают большие динамические нагрузки [1-4]. На первом этапе проектирования механизмов манипуляторов необходимо обосновать компоновку и параметры гидропривода. Для обоснования, в свою очередь, целесообразно разработать физико-математическую модель рабочего процесса гидропривода манипулятора, эффективность которого будет функционально или опосредованно меняться при изменении компоновки гидроцилиндров.

При эксплуатации лесных гидроманипуляторов из-за высокой динамической нагруженности при низких температурах воздуха отказы рукавов высокого давления составляют 29.7-56%, а гидроцилиндров 14.0-24.1% [5]. Предложен новый метод диагностики гидроцилиндров с учетом предельного значения логарифмического декремента затухания колебаний рабочей жидкости, который уменьшается при износе уплотнений до величины $\delta = 0.533$, при которой необходим ремонт гидроцилиндра.

Для снижения энергозатрат при эксплуатации силовой установки нефтедобывающего комплекса [6] создана конструкция гибридного электрогидроцилиндра рекуперативного действия. Поступательное движение поршня гидроцилиндра под действием силы тяжести рабочего оборудования станка-качалки за счет винтовой передачи превращается во вращательное движение ротора электрогенератора, встроенного в гильзу гидроцилиндра. На основании математического моделирования получены амплитудно-фазовые характеристики давления рабочей жидкости для стандартного гидроцилиндра и электрогидроцилиндра. Анализ графиков переходных процессов показывает, что при использовании стандартного гидроцилиндра переходный процесс длится около 6 с, а при использовании электрогидроцилиндра с рекуперацией энергии – около 3 с, при этом эффективность силового привода повышается на 23%.

Для рекуперации потенциальной энергии одноковшового фронтального погрузчика Амкодор (Беларусь) предлагается энергосберегающее устройство, включающее две пружины кручения, установленные между рамой и стрелой [7, 8]. Выбор пружин кручения произведен из условия, чтобы они уравнивали силу тяжести погрузочно-оборудования без груза. Предлагаемое энергосберегающее устройство, позволяет снизить энергозатраты на 26%.

В работе [9] проведены исследования по экономии энергии в процессе эксплуатации гидравлического пресса с насосно-аккумуляторным источником питания. Разработана программа расчёта математической модели трёхскоростного привода возвратно-поступательного движения гидравлического пресса на базе блока решений дифференциальных уравнений в среде SimInTech. Приведены графики перемещения и скорости поршня гидроцилиндра, из которых видно, что перемещение поршня начинается через 1.4 с после момента включения насоса. В этот момент скорость поршня достигает величины 0.9 м/с, а затем выходит на уровень среднего значения 0.4 м/с. При включении в работу гидронасоса давление рабочей жидкости на выходе гидронасоса и на входе гидроаккумулятора возрастает до величины 15 МПа за время 0.2 с по мере

зарядки гидроаккумулятора. Подключение в гидросистему автомата разгрузки насоса позволяет поднимать КПД системы питания до 27%.

Разработан стенд для ресурсных испытаний плунжерных гидроцилиндров с рекуперацией энергии, в котором один гидроцилиндр выполняет функцию гидродвигателя и воздействует на второй гидроцилиндр, выполняющий функцию гидронасоса, через передаточное звено в виде коромысла [10]. Проведены исследования влияния различных конструктивных и функциональных параметров стенда на коэффициент эффективности. Установлено, что давление настройки клапана нагружения и угловая скорость вращения вала влияют на коэффициент эффективности в незначительной степени. Поэтому при проектировании гидромеханической системы стенда учитывались величины рабочих объемов гидронасоса и гидромотора, а также передаточное число механизма.

В ВГЛТУ разработан и изготовлен лабораторный стенд для исследования рабочих процессов гидроманипулятора [11]. Моделирование гидравлической системы стенда проводилось в соответствии с математической моделью, включающей уравнение движения стрелы и уравнение расходов жидкости с учетом упругодемпфирующего устройства с гидроаккумулятором. Проведены лабораторные испытания механизма подъема стрелы с использованием тензометрических датчиков типа ПД-100 и тензолаборатории ZETLAB ZET 058.

В работе [12] рассмотрены линеаризованные математические модели циклового гидропривода лесного манипулятора с механическим управлением, основанные на разложении в ряд Тейлора с точностью до величин первого порядка малости. Определены диапазоны устойчивости гидравлического следящего привода с учетом коэффициента скольжения, параметров золотника и коэффициента усиления по расходу.

В работе [13], чтобы получить линеаризованные математические модели, производится разрешение относительно старшей производной, благодаря чему система распадается на равенства в подпространствах уменьшающихся размерностей. Такой способ решения носит название метода каскадной декомпозиции. Этот метод был успешно

применен, например, при исследовании возмущений линейно алгебро-дифференциального уравнения, вызываемых наличием малого параметра.

В работе [14] проведены экспериментальные исследования динамики гидропривода манипулятора сучкорезной машины ЛП-30Б на стенде «Гидравлический перегрузочный манипулятор» СГУ-ГПМ. Установлена зависимость повышения динамических свойств гидропривода сучкорезной машины от внешней нагрузки. Анализ характеристик случайного процесса в разработанной математической модели проводился с использованием методов статистической динамики. В гидроприводе имеются элементы с нелинейной характеристикой упругости, которые были учтены в математической модели.

В статье [15] разработана методика оптимального проектирования лесных гидроманипуляторов, эксплуатируемых в условиях низких и сверхнизких температур, также применяемых для аварийно-спасательных и других неотложных работ. Каждое включение-выключение гидропривода (время переключения золотника для серийных распределителей составляет порядка 0.10-0.15 с) вызывает импульсное изменение потока рабочей жидкости в гидроприводе от 0 до номинальной подачи насоса и наоборот, что сопровождается значительными динамическими нагрузками в пуск-тормозных режимах. Обоснована структура методики оптимального проектирования манипулятора транспортно-технологических машин, дан порядок расчет параметров гидроуправления, разработаны алгоритмы оптимизации компоновки по критериям минимизации металлоемкости, полезного объема гидроцилиндра, энергозатрат.

В гидроприводах лесных манипуляторов широкое применение нашли шестеренчатые насосы с внешним зацеплением [16]. Авторами разработаны модели шестеренчатого насоса с внешним зацеплением в среде 3D-моделирования Ansys и выполнен анализ его гидродинамики. В результате сравнительного анализа гидродинамики шестеренчатых и кулачковых насосов, установлено, что у шестеренчатых насосов более высокая разницы давлений в нагнетательной и всасывающих полостях, что приводит к повышенному износу опор, в

отличие от кулачковых, где давление жидкости при перекачке распределяется равномернее.

Разработана методика расчета металлоконструкции манипулятора [17] на динамические нагрузки, которая представляет собой плоскую статически определимую конструкцию с массами, распределенными по узлам консоли. Расчет представлен в аналитической форме. В алгоритме определения зависимости первой частоты колебаний конструкции от числа панелей используются операторы системы символьной математики Maple и формула Донкерлея. Решение имеет высокую точность по сравнению с численным методом решения задачи.

В работе [18] представлена безразмерная математическая модель динамики приводного комплекса в виде системы управления двумя гидроприводами для поднятия груза в параллельном режиме. В системе управления применяются три гидравлических распределительных устройства, которые регулируют скорость подъема (и/или опускания) объекта и поддержание его горизонтального положения с учетом возмущающих факторов различной природы. Величина отклонения объекта от горизонтального положения оценивается разностью перемещений штоков гидроприводов от базового положения в данный момент времени.

В работе [19] исследована динамика гидропривода ротора многоковшового роторного экскаватора с применением систем автоматического управления высотным положением рабочего оборудования за счет изменения давления рабочей жидкости в гидроцилиндре подъема и опускания ротора. Составлена система уравнений по Лапласу и структурная схема математической модели объекта управления.

Анализ приведенных выше работ по исследованию динамики гидроприводов технологических машин показал, что вопросам влияния коэффициента податливости гидропривода на динамическую нагруженность отдельных механизмов уделено недостаточно внимания исследователей.

Целью настоящей работы является оценка влияния податливости гидропривода на динамическую нагруженность механизмов лесного манипулятора ЛВ-184А при совершенствовании компо-

новки гидроцилиндров на основе математического моделирования.

Материалы и методы

Расчетная схема механизма подъема стрелы манипулятора, соответствующая патенту на изобретение [20], представлена на рисунке 1.

Математическая модель движения стрелы манипулятора с учетом сил инерции и расходов рабочей жидкости имеет вид [21]:

$$\begin{aligned} QK_t &= \frac{\pi d^2}{4} b_1 \sin \beta \frac{d\varphi}{dt} + a_y P + K_p \frac{dP}{dt}, \\ (J_c + ml^2) \frac{d^2\varphi}{dt^2} &= \\ &= \frac{\pi d^2}{4} P b_1 \sin \beta - g(ml + m_c l_n) \cos(\varphi - \varphi_n), \end{aligned} \quad (1)$$

где Q – подача насоса, м³/с;

K_t – коэффициент нарастания подачи насоса;

J_c – момент инерции стрелы относительно шарнира O , кг·м²;

m – масса пачки сортиментов, кг;

a_y – коэффициент утечек жидкости, м⁵/(Н·с);

P – давление в гидроприводе, Па;

d – диаметр гидроцилиндра, м;

m_c – масса стрелы, кг;

K_p – коэффициент податливости гидропривода, м³/Па, определяется по эмпирической формуле:

$$K_p = \frac{10^{-5}}{7,28 \cdot P + 106}. \quad (2)$$

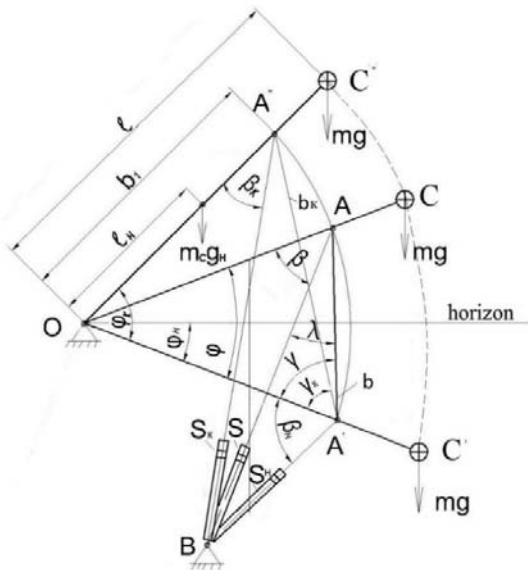


Рисунок 1. Расчетная схема компоновки гидроцилиндра

Figure 1. Calculation diagram of the layout of the hydraulic cylinder

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Результаты и обсуждение

Ввиду сложности исследуемой технической системы такая задача может быть решена методами комплексного анализа. Поскольку результатом является определение параметров компоновки лесного манипулятора, алгоритм работы программного комплекса необходимо осуществлять в рамках формализованного моделирования. Такие модели строятся как формальные (физико-математические) и реализуются в виде логико-лингвистических моделей, в которых искомые параметры определяются в результате вычислительного эксперимента методом оптимизации некоторого критерия. При этом в эксперименте используются технологии так называемых «мягких вычислений», в которых определяемые и задаваемые параметры имеют определенную, но произвольную величину в пределах интервала принадлежности. Поэтому определение этих интервалов, по сути, и является основной задачей вычислительного эксперимента. В работе предлага-

ется определить интервал принадлежности для коэффициента податливости гидропривода при определении оптимального расположения гидроцилиндра.

Для вычислительного эксперимента динамика давления $P(t)$ в гидроприводе моделировалась как решение уравнения расхода рабочей жидкости:

$$K_t Q = \frac{\pi d^2}{4} b_1 \sin \beta \omega + a_y P + K_p \frac{dP}{dt}. \quad (3)$$

Уравнение (3) содержит две величины, определяемые в текущий момент времени t : угловую скорость поворота стрелы $\omega = d\varphi/dt$ (φ – угол подъема стрелы в текущий момент времени, град) и собственно давление в гидроцилиндрах P . Угол β определяется из соотношения:

$$\beta = 90^\circ - \frac{\varphi}{2} - \arcsin \left[\frac{S_n}{\sqrt{4b_1^2 \sin^2 \left(\frac{\varphi}{2} \right) + S_n^2 - 4b_1 S_n \cos \left(\beta_n + 90^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)}} \cos \left(\beta_n - \frac{\varphi}{2} \right) \right], \quad (4)$$

в котором

$$\beta_n = \arccos \left(\frac{4b_1^2 \sin^2 \left(\frac{\varphi_k}{2} \right) + S_n^2 + S_k^2}{2b_1 S_n \sin \left(\frac{\varphi_k}{2} \right)} - 90^\circ + \frac{\varphi}{2} \right);$$

S_n и S_k – задаваемые в исходных данных стандартные начальная и конечная длины штока гидроцилиндра, м;

φ_k – конечный угол поворота стрелы, град.

Последнее слагаемое в уравнении (3) из-за сравнительно небольшой величины K_p на начальном этапе моделирования было приравнено к нулю. Затем для обоснования этой операции была рассчитана динамика коэффициента податливости при повороте стрелы лесного манипулятора (рисунок 2а).

В одни те же моменты времени в сравнении с величиной второго слагаемого в уравнении (3), которое содержит давление P , вклад слагаемого с коэффициентом податливости K_p может быть существенно ниже, поскольку K_p примерно на двенадцать порядков меньше, чем P (см. рис. 1б).

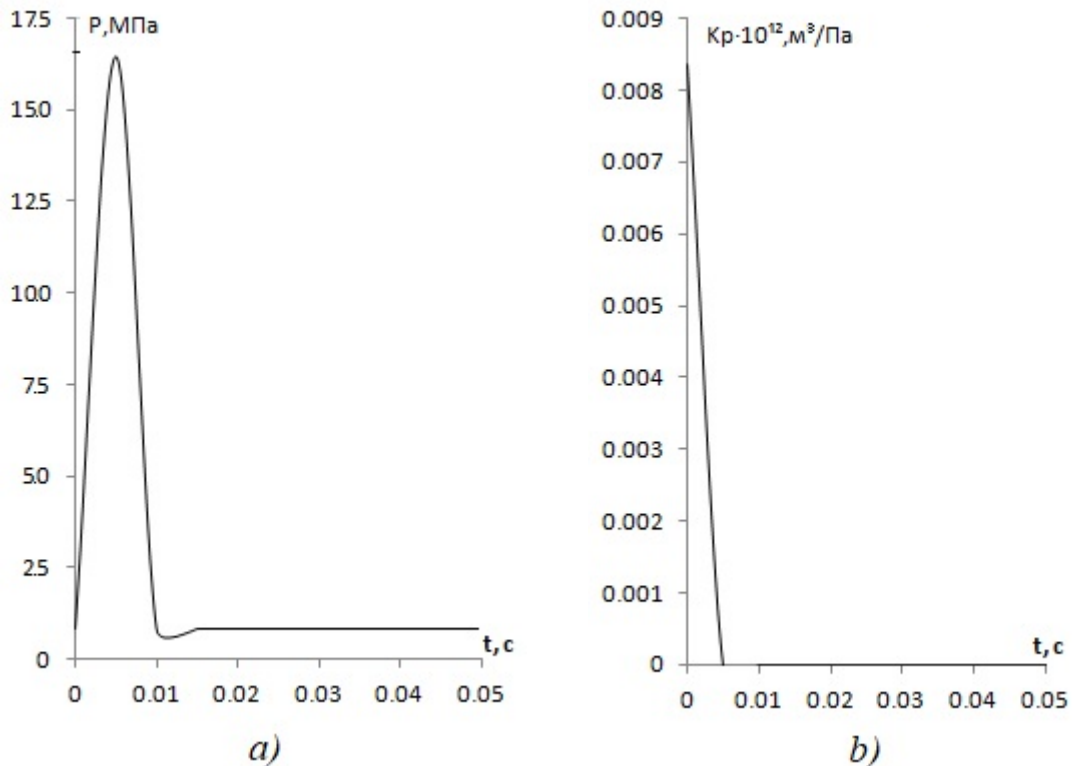


Рисунок 2. Динамика давления рабочей жидкости (а) и коэффициента податливости (b) в гидроприводе
 Figure 2. Dynamics of the working fluid pressure (a) and the coefficient of compliance (b) in the hydraulic drive

Источник: собственная композиция авторов
 Source: author's composition

В вычислительном эксперименте по определению оптимальной компоновки гидроцилиндра механизма подъема стрелы манипулятора ЛВ-184А по критерию минимизации скачков давления рабочей жидкости без учета податливости гидропривода были получены оптимальные точки присоединения гидроцилиндра к стреле $b_1 = 0.9$ м и к поворотной колонне $OB = 0.7$ м (см. рисунок 1), а при учете коэффициента податливости были приняты новые оптимальные точки присоединения гидроцилиндра: $b_1 = 1$ м, $OB = 0.85$ м. Для уточнения математической модели и выявления такого влияния необходимо проведение стендовых испытаний.

Заклучение

Таким образом, вычислительный эксперимент по оценке влияния податливости гидропривода на динамическую нагруженность механизмов

лесного манипулятора при совершенствовании компоновки гидроцилиндров показал, что оптимальные точки присоединения гидроцилиндра к стреле и к поворотной колонне зависят от коэффициента податливости. При этом происходит увеличение времени переходного процесса на 32% и снижение пикового давления на 41%. Но небольшое увеличение времени переходного процесса незначительно повлияет на снижение производительности гидроманипулятора, тогда как снижение пикового давления почти в 1.7 раз значительно увеличивает запас прочности металлоконструкции манипулятора. Для интерпретации модели и уточнения влияния податливости гидропривода на динамическую нагруженность механизмов лесного манипулятора необходимо проведение стендовых испытаний.

Список литературы

1. Компьютерное моделирование работы рекуперативного поворотного коникового устройства лесовозного тягача с прицепом-ропуском / В.И. Посметьев, В.О. Никонов, А.Ю. Мануковский, В.В. Посметьев // Известия ВУЗов. Лесной журнал. – 2022. – № 5. – С. 85-99. – doi: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-85-99>. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49610591>.
2. Влияние режимов движения лесовозного автопоезда при вывозке лесоматериалов на эффективность рекуперации энергии в пневмогидравлическом седельно-сцепном устройстве / В.И. Посметьев, В.А. Зеликов, В.О. Никонов, В.В. Посметьев, А.С. Чуйков, А.В. Авдюхин // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12, № 4(48). – С. 114-129. – doi: <https://doi.org/10.34220/issn.2222.962/2022.4/8>. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50018837>.
3. Ворожцов, О.В. Гидропривод рекуперации энергии транспортного средства / О.В. Ворожцов // Математическое моделирование систем и процессов: материалы Международной научно-практической конференции. Псковский государственный университет, Псков, 10-11 ноября 2022 г. / редакторы: Ю.В. Бруттан, Т.К. Антал, В.В. Фролов, В.Н. Мельник; ПсковГУ. – Псков, 2022. – С. 57-62. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50241741&pf=1>.
4. Piskunov, M. Investigation of Structure of Technology Cycle Time of Hydraulic Manipulators in the Process of Loading Forwarders with Logs / M. Piskunov // Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering. – 2021. – Vol. 42, No. 3. – P. 391-403. – doi: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.863>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47079669>.
5. Effects of semi-trailer modifications on HGV fuel consumption / A. K. Madhusudhanan, D. Ainalis, X. Na, I. V. Garcia, M. Sutcliffe, D. Cebon // Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2021. – Vol. 92. – Art. No. 102717. – DOI: <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2021.102717>.
6. Исследование эффективности перераспределения мощности силового привода нефтедобывающего комплекса на малодебитных скважинах при внедрении конструкции электрогидроцилиндра рекуперативного действия / В.В. Савинкин, А.В. Санду, Т.Ю. Ратушная, П. Визуриане, С.В. Колисниченко, М.Ш. Омаров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332, № 2. – С. 229–244. – DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/2/3058>. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44911298>.
7. Смирнов, А.Н. Рекомендации по повышению энергоэффективности одноковшовых фронтальных погрузчиков при эксплуатации / А.Н. Смирнов, П.В. Авраменко // Минск: БГАТУ, 2020. – 76 с. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/mfkkct>.
8. Смирнов, А.Н. Научно-технические основы проектирования фронтальных погрузчиков: монография / А.Н. Смирнов, П.В. Авраменко. – Минск: БГАТУ, 2021. – 172 с. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/motusd>.
9. Трехскоростной гидромеханический привод возвратно-поступательного движения с рекуперацией энергии / С.А. Вялов, А.Т. Рыбак, И.К. Цыбрий, А.Ю. Пелипенко / Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2021. – № 9. – С. 397-401. – DOI: 10.36652/0202-3350-2021-22-9-397-401. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46538270>.
10. Stand for Life Tests of Plunger Hydraulic Cylinders. Modeling and Calculation / A. Pelipenko, A. Rybak, D. Sarkisian, S. Saakian, A. Zhyravlyova // XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021”. Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry, Volume 1 : Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry, Rostov-on-Don, 24-26 февраля 2021 года. – Rostov-on-Don: Springer Verlag, 2022. – P. 198-206. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-81619-3_22.
11. Стенд для испытаний грузоподъемных механизмов лесных манипуляторов с рекуперацией энергии / П.И. Попиков, А.В. Конюхов, С.К. Попиков, А.В. Попикова // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе : материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 06-07 июня 2022 года. Часть II. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2022. – С. 105-110. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49868071&pf=1>.

12. Анализ работы гидравлического манипулятора лесной машины с цикловой системой управления / Е.Н. Власов, А.В. Сергеевичев, Ю.А. Добрынин, В.В. Сергеевичев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2022. – № 238. – С. 99-112. – DOI: 10.21266/2079-4304.2022.238.99-112. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48186417>.
13. Uskov, V.I. Initial-Boundary Value Problem for Perturbed Third Order Partial Differential Equations / V.I. Uskov // Journal of Mathematical Sciences. – 2021. – Vol. 255, No. 6255. – P. 779–789. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10958-021-05415-1>
14. Головина, Е.В. Математическое моделирование процессов в гидроприводе сучкорезных лесных машин / Е. В. Головина // Теория и практика современной науки : сборник статей IX Международной научно-практической конференции, Пенза, 23 августа 2022 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2022. – С. 17-21. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49327170>
15. К методике проектирования манипулятора, обеспечивающего безопасное функционирование машины в чрезвычайных ситуациях / У.П. Юнкина, М.Ю. Яковенко, Д.В. Кушляев, О.В. Кушляева, В.Ф. Кушляев // Надежность и долговечность машин и механизмов : сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции, Иваново, 14 апреля 2022 года. – Иваново: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 2022. – С. 452-469. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48538675&pff=1>
16. Морозов, Л.А. 3D-моделирование гидравлических параметров шестеренчатого насоса с внешним зацеплением / Л.А. Морозов, О.В. Блинов, В.А. Годлевский // Надежность и долговечность машин и механизмов: сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции, Иваново, 14 апреля 2022 года. – Иваново: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 2022. – С. 395-399. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=oulqdh>
17. Кирсанов, М.Н. Формула для основной частоты собственных колебаний внешне статически неопределимой фермы / М.Н. Кирсанов, С. Цзясюань // Строительная механика и конструкции. – 2023. – № 2(37). – С. 27-34. – DOI: <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.37.2.003>. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53960729>.
18. Визуализация взаимосвязи между динамикой системы и ее базовыми характеристиками / Г.В. Крейнин, С.Ю. Мисюрин, А.П. Нелюбин, Н.Ю. Носова // Научная визуализация, 2020. – Т. 12, № 2. – С. 9-20. – DOI: <https://doi.org/10.26583/sv.12.2.02>. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42901144>
19. Билалов, Р.Р. Многоковшовый траншейный экскаватор как объект управления / Р.Р. Билалов, И.В. Дуданов // Механизация и автоматизация строительства : сборник статей / Самарский государственный технический университет. – Самара : Самарский государственный технический университет, 2022. – С. 130-133. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53944534&pff=1>
20. Патент № 2789167 С1 Российская Федерация, МПК В66С 13/42. Гидропривод грузоподъемного механизма лесного манипулятора / Попиков Петр Иванович, Черных Александр Сергеевич, Богданов Дмитрий Сергеевич, Попиков Сергей Константинович, Поздняков Евгений Владиславович, Попикова Алина Викторовна ; патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова" : № 2022119768 : заявл. 19.07.2022 ; опубл. 30.01.2023, Бюл. № 12. – 2023. – режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_50267016_38701455.PDF.

21. Yudina, N.Yu. Simulation of loading dynamics and hydrodynamics of drives of forest machine working bodies / N.Yu. Yudina, R.V. Yudin, A.I. Maksimenkov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing Ltd, 2021. – Vol. 875, Iss. 1. – Art. No. 12060. – doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012060>.

References

1. Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Manukovskii A.Yu., Posmetyev V.V. (2022) Computer Simulation of the Operation of the Recuperative Swivel Bunk Device of a Hauling Tractor with a Timber Drug. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], No. 5, pp. 85–99 (in Russian). doi: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-85-99>. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49610591>.
2. Posmetev V.I., Zelikov V.A., Nikonov V.O., Posmetev V.V., Chuikov A.S., Avdyuhin A.V. (2022) Influence of the modes of motion of a logging road train during the hauling of timber on the efficiency of energy recovery in a pneumohydraulic fifth wheel coupling device. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 12, No. 4 (48), pp. 114-129 (in Russian). doi: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/8>. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50018837>.
3. Vorozhtsov O.V. (2022) Hydraulic drive for vehicle energy recovery. *Mathematical Modeling of Systems and Processes: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* (Pskov State University, Pskov, November 10-11, 2022), editors: Yu.V. Bruttan, T.K. Antal, V.V. Frolov, V.N. Miller; PskovGU. Pskov, pp. 57-62 (in Russian). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50241741&pf=1>
4. Piskunov M. (2021) Investigation of Structure of Technology Cycle Time of Hydraulic Manipulators in the Process of Loading Forwarders with Logs. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, Vol. 42, No. 3, pp. 391-403. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47079669>
5. Madhusudhanan A. K., Ainalis D., Na X., Garcia I. V., Sutcliffe M., Cebon D. (2021) Effects of semi-trailer modifications on HGV fuel consumption. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 92, 102717. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2021.102717>
6. Savinkin V.V., Sandu A.V., Ratushnaya T.Yu., Vizuriane P., Kolisnichenko S.V., Omarov M.Sh. (2021) Study of redistribution of the oil complex power drive effectiveness for marginal wells when installing construction of recuperative action electro hydro cylinder. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineerin*, Vol. 332, No. 2, pp. 229–244 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/2/3058>
7. Smirnov A.N., Avramenko P.V. (2020) Recommendations for improving the energy efficiency of single-bucket frontal loaders during operation. Minsk: BSATU. 76 p. (in Russian). URL: <file:///C:/Users/User/Downloads/rekomendacii-po-povysheniyu-ehnergoehffektivnosti-pogruzchikov.pdf>
8. Smirnov A.N., Avramenko P.V. (2021) Scientific and technical foundations for the front loaders design: monograph. Minsk: BSATU. 172 p. (in Russian). URL: <https://rep.bsatu.by/bitstream/doc/14518/1/nauchno-tekhnicheskie-osnovy-proektirovaniya-frontalnyh-pogruzchikov.pdf>
9. Vyalov S.A., Rybak A.T., Tsybriy I.K., Pelipenko A.Yu. (2021) Three-speed hydromechanical reciprocating drive with energy recovery. *Assembling in mechanical engineering and instrument-making*, No. 9, pp. 397-401 (in Russian). DOI: 10.36652/0202-3350-2021-22-9-397-401. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46538270>
10. Pelipenko A., Rybak A., Sarkisian D., Saakian S., Zhyravlyova A. (2022) Stand for Life Tests of Plunger Hydraulic Cylinders. Modeling and Calculation. *XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021". Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry, Volume 1 : Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry* (Rostov-on-Don, February 24-26, 2021). Rostov-on-Don: Springer Verlag, pp. 198-206. DOI: [10.1007/978-3-030-81619-3_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81619-3_22).
11. Popikov P.I., Konyukhov A.V., Popikov S.K., Popikova A.V. Stand for testing lifting mechanisms of forest manipulators with energy recovery. *Energy efficiency and energy saving in modern production and society: materials of the international scientific and practical conference* (Voronezh, June 06-07, 2022. Part II). Voronezh: Voronezh State

Agrarian University named after Emperor Peter the Great, pp. 105-110 (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49868071&pff=1>

12. Vlasov E.N., Sergeevichev A.V., Dobrynin Yu.A., Sergeevichev V.V. (2022) The analysis of the work of a hydraulic manipulator of a forest machine with a cyclic control system. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, Iss. 238, pp. 99–112 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.238.99-112. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48186417>.

13. Uskov V.I. (2021) Initial-Boundary Value Problem for Perturbed Third Order Partial Differential Equations. *Journal of Mathematical Sciences*, Vol. 255, No. 6255, pp. 779–789. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10958-021-05415-1>

14. Golovina E.V. (2022) Mathematical modeling of processes in the hydraulic drive of delimiting machines. *Theory and practice of modern science: collection of articles of the IX International Scientific and Practical Conference* (Penza, August 23, 2022). Penza: Science and Education (IP Gulyaev G.Yu.), pp. 17-21 (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49327170>

15. Yunkina U.P., Yakovenko M.Yu., Kushlyaev D.V., Kushlyaeva O.V., Kushlyaev V.F. (2022) To the method of designing a manipulator that ensures the safe operation of the machine in emergency situations. *Reliability and durability of machines and mechanisms: collection of materials of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference* (Ivanovo, April 14, 2022). Ivanovo: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Disaster Relief", pp. 452-469 (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48538675&pff=1>

16. Morozov L.A., Blinov O.V., Godlevsky V.A. (2022) 3D modeling of hydraulic parameters of an external gear pump. *Reliability and durability of machines and mechanisms: collection of materials of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference* (Ivanovo, April 14, 2022). Ivanovo: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Disaster Relief", pp. 395-399 (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=oulqdh>

17. Kirsanov M.N., Jiaxuan S. (2023) Formula for the fundamental natural frequency of an externally statically indeterminate truss. *Structural mechanics and structures*, No. 2(37), pp. 27-34 (in Russian). DOI: <https://doi:10.36622/VSTU.2023.37.2.003>. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53960729>

18. Kreinin G.V., Misyurin S.Yu., Nelyubin A.P., Nosova N.Yu. (2020) Visualizing the relationship between system dynamics and its underlying characteristics. *Scientific visualization*, Vol. 12, No. 2, pp. 9-20 (in Russian). DOI: <https://doi:10.26583/sv.12.2.02>. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42901144>

19. Bilalov R.R., Dudanov I.V. (2022) Bucket trench excavator as a control object. *Mechanization and automation of construction: collection of articles (Samara State Technical University)*. Samara: Samara State Technical University, pp. 130-133 (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53944534&pff=1>

20. Popikov Petr Ivanovich, Chernykh Alexander Sergeevich, Bogdanov Dmitry Sergeevich, Popikov Sergey Konstantinovich, Pozdnyakov Evgeny Vladislavovich, Popikova Alina Viktorovna (2023) Hydraulic drive of the load-lifting mechanism of the forest manipulator. Patent No. 2789167 C1 Russian Federation, IPC B66C 13/42. Patentee: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov": No. 2022119768: Appl. 07/19/2022; publ. 01/30/2023, Bull. No. 12. (in Russian) URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_50267016_38701455.PDF

21. Yudina N.Yu, Yudin R.V., and Maksimenkov A.I. (2021) Simulation of loading dynamics and hydrodynamics of drives of forest machine working bodies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing Ltd, 2021. Vol. 875, Iss. 1. Art. No. 12060. doi: 10.1088/1755-1315/875/1/012060.

Сведения об авторах

✉ *Евсиков Иван Дмитриевич* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-3388-3275>, e-mail: evsfan1997@gmail.com.

Богданов Дмитрий Сергеевич – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4179-8189>, e-mail: bogdanov_s69@mail.ru.

Попикова Алина Викторовна – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9387-4254>, e-mail: poalinka@mail.ru.

Конюхов Андрей Валерьевич – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1828-3673>, e-mail: akoniukhov@gmail.com.

Information about the authors

✉ *Ivan D. Evsikov* – postgraduate student, FSBEI HE “Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov”, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-3388-3275>, e-mail: evsfan1997@gmail.com.

Dmitry S. Bogdanov – postgraduate student, FSBEI HE “Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov”, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4179-8189>, e-mail: bogdanov_s69@mail.ru.

Alina V. Popikova – postgraduate student, FSBEI HE “Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov”, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9387-4254>, e-mail: poalinka@mail.ru.

Andrey V. Konyukhov – postgraduate student, FSBEI HE “Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov”, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1828-3673>, e-mail: akoniukhov@gmail.com.

✉ – Для контактов/Corresponding author