

DOI: 10.15393/j2.art.2021.5623

УДК 629.114.2

Статья

Математическая модель динамических режимов гидроманипуляторов автолесовозов с выравнителями опорно-поворотных устройств

Попиков Пётр Иванович

доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), porikovpetr@yandex.ru

Юдин Роман Викторович

кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), romanyudin1@yandex.ru

Танчук Павел Владимирович

аспирант, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), pavlentpv@mail.ru

Конюхов Андрей Валерьевич

аспирант, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), akonjukhov@gmail.com

Получена: 26 января 2021 / Принята: 26 марта 2021 / Опубликовано: 30 марта 2021

Аннотация: В статье рассматривается возможность применения автоматических креново-тангажных выравнителей в опорно-поворотных устройствах гидроманипуляторов автолесовозов с целью повышения их производительности и уровня безопасности погрузочно-разгрузочных работ в лесном комплексе. Дан анализ существующих и перспективных конструкций выравнителей опорно-поворотных устройств гидроманипуляторов лесозаготовительных машин. Рассмотрены результаты исследования рабочих режимов гидропривода выравнителя опорно-поворотного устройства валочно-пакетирующей машины ЛП-19 Б, в результате которых установлено, что в пуско-тормозных режимах наблюдаются частоты колебаний давления рабочей жидкости в гидроцилиндрах выравнителя в диапазоне $69,9—994,0 \text{ с}^{-1}$ для высоких частот и $2,5—2,8 \text{ с}^{-1}$ для низких частот, при этом коэффициент динамичности находился в пределах $1,00—4,53$. Полученные результаты исследования не могут быть в полной мере применены к выравнителям опорно-поворотных устройств гидроманипуляторов автолесовозов, потому что выравнивающие системы валочно-пакетирующих

машин контактируют с корпусом машины, а аутригеры автолесовозов опираются на грунт. Разработаны математические модели рабочих режимов гидропривода подъёма стрелы и аутригеров гидроманипулятора типа ЛВ-190 автолесовоза с подключением автоматического креново-тангажного выравнителя, которые позволяют получить временные зависимости давления в рабочих полостях гидроцилиндров стрелы и аутригеров при их отдельном и совместном подключении; текущее угловое перемещение опорно-поворотного устройства и стрелы манипулятора. Предварительный анализ математических моделей, проведённый с помощью компьютерной программы и экспериментальных исследований динамики гидропривода на стендовом гидроманипуляторе ЛВ-210, показал, что по временным зависимостям давления в полостях гидроцилиндров стрелы и аутригера, а также углам наклона опорно-поворотного устройства и подъёма стрелы манипулятора можно дать оценку влияния гидропривода автоматического выравнителя на динамические режимы и устойчивость гидроманипулятора автолесовоза при различных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: автолесовоз, гидроманипулятор, математическая модель, выравнитель, стрела, устойчивость, аутригер

DOI: 10.15393/j2.art.2021.5623

Article

Mathematical model of dynamic modes of hydraulic manipulators on timber carriers with slewing bearings levelers

Petr Popikov

D. Sc. in engineering, professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), popikovpetr@yandex.ru

Yudin Roman

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), romanyudin1@yandex.ru

Tanchuk Pavel

Graduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), pavlentpv@mail.ru

Koniukhov Andrey

Graduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), akoniukhov@gmail.com

Received: 26 January 2021 / Accepted: 26 March 2021 / Published: 16 March 2021

Abstract: The article discusses the possibility of using automatic pitch and roll levelers in the slewing bearings of hydraulic manipulators of timber carriers in order to increase their productivity and safety of loading and unloading operations in the forestry complex. The analysis of the existing and prospective designs of the slewing bearings levelers of the hydraulic manipulators of forestry machines is given. The study of the hydraulic drive operating modes of the slewing bearings levelers of the fellerbuncher LP-19 B revealed that in the starting and braking modes the frequencies of the pressure oscillations of the working fluid in the hydraulic cylinders of the equalizer were in the range 69.9-994.0 / s for high frequencies and in the range 2.5-2.8 1 / s for low frequencies, while the dynamic coefficient was in the range of 1.00-4.53. The obtained results cannot be fully applied to the aligners of the slewing bearings of truck hydraulic manipulators, because the leveling systems of fellerbunchers are in contact with the machine body, and the truck outriggers rest on the ground. Mathematical models of the operating modes of the hydraulic drive for lifting the boom and outriggers of a hydraulic manipulator of the LV-190 type of a timber carrier that are integrated with an automatic roll-pitch equalizer have been developed. The models allowed the authors to obtain time dependences of the pressure in the working cavities of the hydraulic cylinders of the boom and outriggers when they are

separately and jointly connected; as well as the current angular displacement of the rotary support and the manipulator boom. A preliminary analysis of mathematical models carried out using a computer program and experimental studies of a hydraulic drive dynamics on a bench hydraulic manipulator LV-210 showed that the time dependences of the pressure in the cavities of the hydraulic cylinders of the boom and outrigger, as well as the angles of inclination of the supporting-slewing device and the lifting of the manipulator boom, can be used to assess the influence of the hydraulic drive of the automatic leveler on the dynamic modes and stability of the truck hydraulic manipulator under various operating conditions.

Keywords: timber truck, hydraulic manipulator, mathematical model, leveler, boom, stability, outrigger

1. Введение

В настоящее время в лесном комплексе РФ при лесозаготовках широко применяются автолесовозы с установкой гидроманипулятора за кабиной автомобиля или в конце рамы. Лесные манипуляторы ЛВ-185-14, ЛВ-190, ОМТЛ-97 устанавливаются на базовые автомобили: КамАЗ, Урал, МАЗ, КрАЗ, имеют механизмы опорно-поворотных устройств в виде поперечной балки 1, закреплённой на раме лесотранспортной машины и выдвижных опор аутригеров 2, что в значительной мере облегчило труд оператора и повысило устойчивость базового автомобиля 3 (фото 1). При работе автолесовозов манипуляторного типа устойчивость уменьшается в связи с креном опорно-поворотного устройства при проседании грунта под аутригерами в сторону уклона погрузочной площадки, а также под воздействием сил инерции, возникающих при подъёме и опускании груза, в т. ч. при вращении поворотной колонны манипулятора [3], [6].

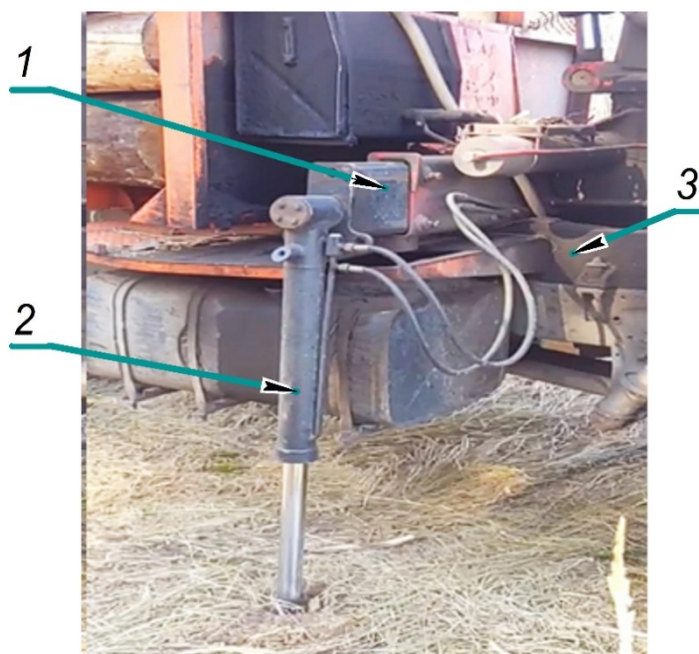


Фото 1. Опорно-поворотное устройство гидроманипулятора ЛВ-190 автолесовоза:
1 — поперечная балка; 2 — аутригер; 3 — базовый автомобиль КамАЗ

Foto 1. Slewing support of the LP-190 hydraulic manipulator of the timber carrier:
1 — transverse beam; 2 — outrigger; 3 — base vehicle KamAZ

Однако выравнивание в горизонтальной плоскости опорно-поворотных устройств гидроманипуляторов отечественных автолесовозов осуществляется вручную с помощью гидрозолотников гидравлических опор (аутригеров), при этом на подготовку манипулятора к работе затрачиваются большие промежутки времени. Зарубежные машины отличаются от отечественных гораздо большей степенью наукоёмкости, автоматизации, комфорта,

универсальностью. Однако конструкции отечественных гидроманипуляторов отличаются надёжностью, простотой эксплуатации и ремонта, гораздо более низкой ценой. Например, на лесотранспортной машине МПТ-461 вместо зарубежного манипулятора предлагается установить отечественный манипулятор ЛВ-184 с грузовым моментом $M_{гр} = 40$ кН [2]. Известны патентные материалы, касающиеся разработки новых опорно-поворотных устройств гидроманипуляторов лесозаготовительных машин.

В известном опорно-поворотном устройстве (ОПУ) гидроманипулятора лесозаготовительной машины [8] механизм выравнивания выполнен за счёт дополнительных гидроцилиндров, установленных по Х-образной схеме с помощью шарниров между рамой и поворотной платформой. Наклонная конструкция технологического оборудования сопряжена с рамой по криволинейным поверхностям, выполненным по одинаковым радиусам. Механизм выравнивания опорно-поворотного устройства гидроманипулятора лесозаготовительной машины позволяет при ручном управлении гидрораспределителем выравнивать поворотную платформу вперёд и назад в зависимости от уклона местности.

Другой известный механизм выравнивания (ОПУ) манипулятора лесозаготовительной машины [9] содержит крестовину шарнира Гука и дополнительные гидроцилиндры. В центре крестовины шарнира Гука выполнена полусфера, сопряжённая с шаровой опорой, смонтированной на раме самоходного шасси. Одни гидроцилиндры имеют шарнирное соединение с первой осью крестовины шарнира Гука и с рамой самоходного шасси. Другие гидроцилиндры имеют шарнирное соединение со второй осью крестовины и с нижней неподвижной частью опоры поворотной роликовой. Для наклона поворотной платформы производят переключение гидроцилиндров на выталкивание штока, на втягивание или «заперто» за счёт различных позиций гидрораспределителя.

Рассмотренные конструкции механизмов выравнивания опорно-поворотных устройств манипуляторов лесозаготовительных машин не позволяют работать в автоматическом режиме и снижают производительность машин.

Известно креново-тангажное отвесное устройство автоматического выравнивания опорной платформы подъёмных механизмов [7]. Оно содержит подвесные элементы, работающие в продольной и поперечной плоскостях автомобильной рамы, данные элементы контактируют с линейками, имеющими обмотку, работающими по принципу реостата и изготовленными из материала, не проводящего электричество, которые крепятся на раме автомобиля. Электрические сигналы с подвесных элементов и реостатных линеек с обмоткой идут в модуль-регулятор, исполненный в качестве усилителя. Из модуля-регулятора сигналы поступают на пульт управления работой гидроцилиндров аутригеров, посредством электромагнитных распределителей. Технический результат заключается в повышении скорости выравнивания опорно-поворотных устройств грузоподъёмных механизмов.

Однако исследований по применению устройств для выравнивания опорно-поворотных устройств гидроманипуляторов лесозаготовительных машин пока проведено недостаточно [12].

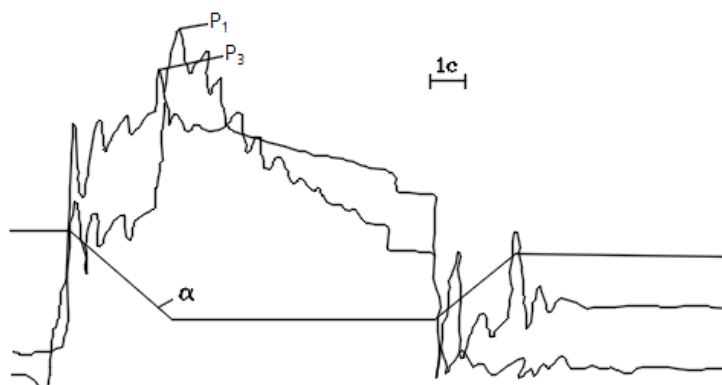


Рисунок 2. Осциллограмма процесса подъёма (опускания) груза-дерева выравнителем платформы на вылете манипулятора $L_{min} = 3.5$ м

Figure 2. The oscillogram of the process of lifting (lowering) the load-wood of the platform's leveler with the manipulator operating radius $L_{min}=3.5$ м

Таким образом, целью исследования является повышение производительности и уровня безопасности погрузочно-разгрузочных работ в лесном комплексе за счёт применения автоматических выравнителей опорно-поворотных устройств гидроманипуляторов автолесовозов и оценки их влияния на динамические режимы и устойчивость работы при различных условиях эксплуатации.

2. Материалы и методы

Нами предлагается применение автоматического креново-тангажного выравнителя опорно-поворотного устройства [7] на автолесовозе с гидроманипулятором ЛВ-190 на базе автомобиля КамАЗ, которое позволяет, на наш взгляд, повысить качественные характеристики производительности и безопасности работ во время погрузки и разгрузки в лесном хозяйстве. На рисунке 3 представлена гидрокинематическая схема автоматического выравнителя, разработанная применительно к гидроманипулятору автолесовоза, оборудованному опорно-поворотным устройством с двумя аутригерами.

На поперечной балке аутригеров установлен отвесный датчик автоматического выравнителя (рисунок 3а), включающий шарнир 1, подвес 2, щёточный узел 3, реостатную направляющую 4. На рисунке 3б представлена схема гидропривода выравнителя, включающая следующие элементы: гидроцилиндры аутригеров 5 и 12, ёмкость рабочей жидкости 6, гидронасос 7, фильтрующий элемент 8, трёхпозиционный распределитель 9 и двухпозиционные распределители 10 и 11 с электромагнитным управлением, гидроцилиндры 12 и 13 аутригеров. Выравнивание опорно-поворотного устройства в горизонтальной поперечной плоскости осуществляется посредством сигналов отвесного датчика, возникающих в зависимости от движения щёточного узла по реостатной направляющей, в связи с чем в её обмотке меняется сила тока, возникающего в зависимости

от движения щёточного узла по реостатной направляющей, в связи с чем в её обмотке меняется сила тока, это оказывает воздействие на движение гидроцилиндров.

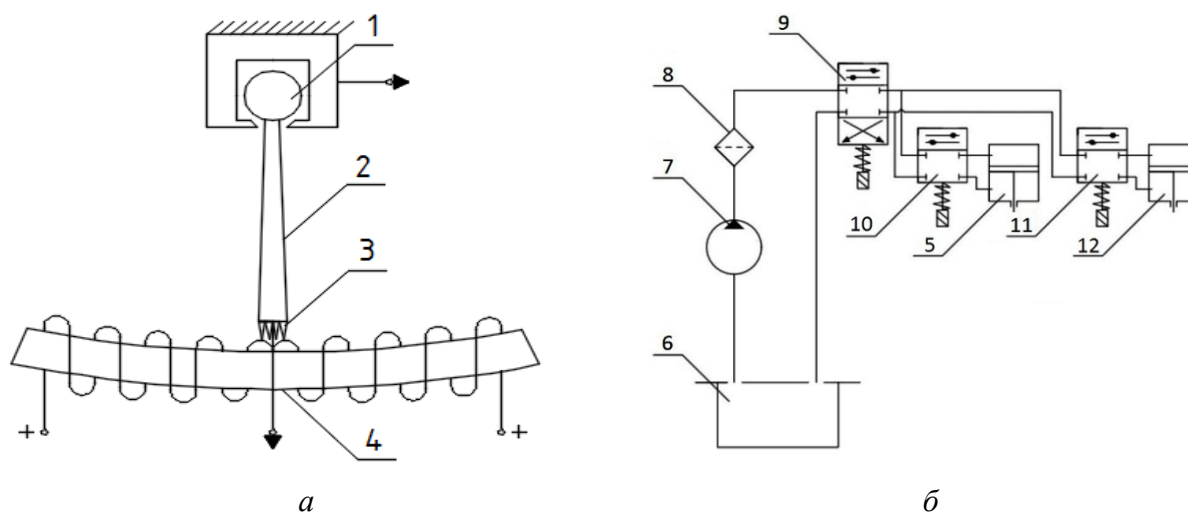


Рисунок 3. Общая схема автоматического выравнителя опорно-поворотного устройства манипулятора автолесовоза: *а* — отвесный датчик; *б* — принципиальная гидравлическая схема автоматического выравнителя

Figure 3. The general scheme of the automatic pitch and roll levelers of supporting platform of forest transport machines` manipulator: **(a)** steep sensor; **(b)** the principled hydraulic scheme of the automatic leveler

Для оценки влияния параметров разработанного гидропривода выравнителя опорно-поворотных устройств на динамические режимы и устойчивость гидроманипуляторов автолесовозов на уклонах необходимо разработать математическую модель рабочих процессов гидропривода механизма подъёма стрелы и гидропривода аутригеров для наиболее неблагоприятных расчётных случаев.

3. Результаты

Рассмотрим расчётный случай, когда внезапно просел грунт под правым аутригером в точке А и рама наклонилась на угол α при максимальном вылете манипулятора L с максимальным грузом $G_{бр}$ (рисунок 4).

$$\left\{ \begin{array}{l} (J_{\bar{op}} + J_p + J_c) \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = F_{у.с.} a \sin \beta - (G_{\bar{op}} L + G_p l_{у.з.} + G_c l_{у.с.}) \cos \varphi \cos \alpha - \\ - (G_{\bar{op}} L + G_p l_{у.з.} + G_c l_{у.с.}) \sin \alpha \sin \varphi; \\ \sin \beta = \frac{b_1 \sin(\gamma + \varphi)}{\sqrt{a^2 + b_1^2 - 2ab_1 \cos(\gamma + \varphi)}}; \\ F_{у.с.} = \frac{\pi d_c^2}{4} p; \\ q_n n_n = \frac{\pi d_c^2}{4} \alpha \sin \beta \frac{d\varphi}{dt} + a_y p + K_p \frac{dp}{dt}; \\ K_p = \frac{10^{-5}}{7,28p + 106}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $J_{\bar{op}}, J_p, J_c$ — момент инерции брёвен, рукояти и стрелы манипулятора относительно точки O_1 , кгм²;

$G_{\bar{op}}, G_p, G_c$ — силы тяжести пачки брёвен в захвате рукояти стрелы, Н;

d_c — внутренний диаметр гидроцилиндра стрелы, м;

a_y — коэффициент, учитывающий утечки жидкости, м⁵/(Н·с);

K_p — коэффициент податливости гидропривода, м⁵/(Н·с); определяется по эмпирической формуле;

q_n — рабочий объём насоса, м³/об.;

n_n — частота вращения насоса, с⁻¹;

p — текущее значение давления в гидроприводе, Па.

Обозначения остальных параметров, входящих в уравнения, ясны из рисунка 4.

Формулы для вычисления моментов инерции брёвен, рукояти, стрелы относительно точки O_1 для уравнений подъёма стрелы (1):

$$J_{\bar{op}} = \frac{G_{\bar{op}}}{g} L^2; \quad (2)$$

$$J_p = \frac{G_p}{g} l_{у.з.}^2; \quad (3)$$

$$J_c = \frac{G_c}{g} l_{у.с.}^2. \quad (4)$$

При наклоне рамы автомобиля на угол α подвес 2 (рисунок 4а) также отклоняется от вертикали на угол α и перемещается по реостатной направляющей 4, при этом

электрический сигнал подаётся на двухпозиционный гидрораспределитель 11, который включает правый гидроцилиндр 12 аутригера на подъём, происходит выравнивание рамы автомобиля в поперечной плоскости до горизонтального положения. Математическая модель процесса выравнивания опорно-поворотного устройства гидроманипулятора включает уравнение моментов сил относительно точки О и уравнение расходов рабочей жидкости с учётом гидроцилиндра аутригера:

$$\left\{ \begin{array}{l} (J_{\bar{op}1} + J_{\bar{z}1} + J_{\bar{c}1} + J_A) \frac{d^2 a}{dt^2} = F_y (B + 2C_A) - G_{\bar{op}} \cos \alpha (L \cos \varphi + \frac{B}{2} + C_A) - \\ - G_p \cos \alpha (l_{u.p.} \cos \varphi + \frac{B}{2} + C_A) - G_c \cos \alpha (l_{u.p.} \cos \varphi + \frac{B}{2} + C_A) - \\ - G_A \cos \alpha (\frac{B}{2} + C_A) - G_{\bar{op}} \sin \alpha [L \sin \varphi + H_k + (B + C_A) \operatorname{tg} \alpha] - \\ - G_p \sin [l_{u.p.} \sin \varphi + H_k + (B + C_A) \operatorname{tg} \alpha] - G_c [l_{u.p.} \sin \varphi + H_k + (B + C_A) \operatorname{tg} \alpha] \cdot (5) \\ - G_A \sin [h_y + (B + C_A) \operatorname{tg} \alpha]; \\ q_n n_n = \frac{\pi d^2}{4} (B + 2C_A) \frac{da}{dt} + a_y p + K_p \frac{dp}{dt}; \\ F_y = \frac{\pi d^2}{4} p, \end{array} \right.$$

где $J_A, J_{\bar{op}1}, J_{\bar{p}1}, J_{\bar{c}1}$ — моменты инерции автомобиля, пачки брёвен, рукояти, стрелы относительно точки О, кг·м²;

α — угол уклона, град.;

t — время, с;

F_y — сила на штоке гидроцилиндра аутригера, Н;

$G_A, G_{\bar{op}}$ — силы тяжести манипулятора, пачки брёвен в захвате автомобиля, Н;

h_m — высота расположения центра тяжести манипулятора;

h_y — высота расположения центра тяжести машины;

d — внутренний диаметр гидроцилиндра аутригера, м.

Обозначения остальных параметров, входящих в уравнения, изображены на рисунке 4.

Для вычисления моментов инерции брёвен, рукояти, стрелы и базового автомобиля относительно точки О для уравнения гидроцилиндра аутригера использовались следующие формулы:

$$J_{\bar{op}1} = \frac{G_{\bar{op}}}{g} \left\{ \left(\frac{B}{s} + C_A + L \right)^2 + [H_k + (B + C_A) \operatorname{tg} \alpha]^2 \right\}; \quad (6)$$

$$J_{\sigma p1} = \frac{G_p}{g} \left\{ \left(\frac{B}{2} + C_A + l_{u.z.} \right)^2 + [H_k + (B + C_A)tg\alpha]^2 \right\}; \quad (7)$$

$$J_{c1} = \frac{G_c}{g} \left\{ \left(\frac{B}{2} + C_A + l_{u.c.} \right)^2 + [H_k + (B + C_A)tg\alpha]^2 \right\}; \quad (8)$$

$$J_A = \frac{G_A}{g} \left\{ \left(\frac{B}{2} + C_A \right)^2 + [h_y + (B + C_A)tg\alpha]^2 \right\}. \quad (9)$$

Необходимо также рассмотреть совмещение рабочих процессов гидроцилиндра подъёма стрелы манипулятора и гидроцилиндра аутригера при включении автоматического выравнителя при этих же углах уклона и положениях манипулятора при изменении углов подъёма стрелы от 0 до 70°. В этом случае давление рабочей жидкости будет одинаково в гидроцилиндрах стрелы и аутригера при их совместной работе, а уравнение расходов рабочей жидкости будет включать расходы гидроцилиндров стрелы и аутригера одновременно:

$$\left\{ \begin{aligned} & \left(\frac{G_{\sigma p}}{g} L^2 + \frac{G_p}{g} l_{u.z.}^2 + \frac{G_c}{g} l_{u.c.}^2 \right) \cos^2 \varphi \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \frac{\pi d^2 c}{4} p a \frac{b_1 \sin(\gamma + \varphi)}{\sqrt{a^2 + b_1^2 - 2ab_1 \cos(\gamma + \varphi)}} - \\ & - (G_{\sigma p} L + G_p l_{u.z.}) \cos \alpha \cos \varphi - (G_{\sigma p} L + G_p l_{u.z.} + G_c l_{u.c.}) \sin \alpha \sin \varphi; \\ & (J_{\sigma p1} + J_{p1} + j_{c1} + j_A) \frac{d^2 a}{dt^2} = \frac{\pi d^2}{4} p (B + 2C_A) - G_{\sigma p} \cos \alpha \left(L \cos \varphi + \frac{B}{2} + C_A \right) - \\ & - G_p \cos \alpha \left(l_{u.p.} \cos \varphi + \frac{B}{2} + C_A \right) - G_c \cos \alpha \left(l_{u.c.} \cos \varphi + \frac{B}{2} + C_A \right) - G_A \cos \alpha \left(\frac{B}{2} + C_A \right) - \\ & - G_{\sigma p} \sin \alpha [L \sin \varphi + H_k + (B + C_A)tg\alpha] - G_p \sin \alpha [l_{u.p.} \sin \varphi + H_k + (B + C_A)tg\alpha] - \\ & - G_c [l_{u.c.} \sin \varphi + H_k + (B + C_A)tg\alpha] - G_A \sin \alpha [h_y + (B + C_A)tg\alpha]; \\ & q_n n_n = \frac{\pi d^2 c a b_1 \sin(\gamma + \varphi)}{4 \sqrt{a^2 + b_1^2 - 2ab_1 \cos(\gamma + \varphi)}} \frac{d\varphi}{dt} + \frac{\pi d^2}{4} (B + 2C_A) \frac{da}{dt} + a_y p + \frac{10^{-5}}{7,28p + 106} \frac{dp}{dt} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Адекватность математических моделей динамических режимов гидропривода манипуляторов автолесовозов подтверждена ранее проведёнными нами теоретическими исследованиями с помощью компьютерной программы, а также экспериментальными исследованиями динамики гидропривода на стендовом гидроманипуляторе ЛВ-210 [2], [6], [11].

Предварительный анализ математических моделей показал, что по временным зависимостям давления в полостях гидроцилиндров стрелы и аутригера, а также углам наклона опорно-поворотного устройства и подъёма стрелы манипулятора можно дать оценку

влияния гидропривода автоматического выравнителя на динамические режимы гидроманипулятора автолесовоза при различных условиях эксплуатации.

4. Обсуждение и заключение

Применение креново-тангажных выравнителей опорно-поворотных устройств на автосортиментовозах манипуляторного типа расширяет технологические возможности и производительность при погрузочно-разгрузочных работах, а также существенно влияет на характер и уровень динамических нагрузок на шасси и технологическое оборудование, что создаёт удобства в работе оператора и повышает устойчивость автолесовоза при лесозаготовках на склонах. Разработанные математические модели рабочих режимов гидропривода подъёма стрелы и аутригеров с подключением креново-тангажного выравнителя позволяют получить временные зависимости давления в рабочих полостях гидроцилиндров стрелы и аутригеров при их отдельном и совместном подключении; текущее угловое перемещение опорно-поворотного устройства и угол подъёма стрелы манипулятора. Предварительный анализ математических моделей, проведённый с помощью компьютерной программы и экспериментальных исследований динамики гидропривода на стендовом гидроманипуляторе ЛВ-210, показал, что по временным зависимостям давления в полостях гидроцилиндров стрелы и аутригера, а также углам наклона опорно-поворотного устройства и подъёма стрелы манипулятора можно дать оценку влияния гидропривода автоматического выравнителя на динамические режимы и устойчивость гидроманипулятора автолесовоза при различных условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Александров В. А., Александров А. В. Моделирование технологических процессов лесных машин: учебник. 3-е изд., перераб. СПб.: Лань, 2016. 368 с.
2. Гидроманипуляторы и лесное технологическое оборудование: [монография] / [И. М. Бартенев и др.]; под ред. И. М. Бартенева. М.: Флинта; Наука, 2011. 408 с.
3. Долженко С. В. Разработка методики экспериментальных исследований гидропривода механизма поворота лесного манипулятора сортиментовоза // Лесотехнический журнал. 2013. № 1. С. 127—137.
4. Лозовецкий В. В. Гидро- и пневмосистемы транспортно-технологических машин: учеб. пособие. СПб.; М.: Лань, 2012. 560 с.
5. Павлов А. И., Тарбеев А. А., Вдовин С. Л. Надёжность, диагностика и защита гидроприводов транспортно-технологических машин: [монография]. Йошкар-Ола: ПСТУ, 2017. 374 с.
6. Попиков П. И., Малюков С. В., Юдин Р. В. Исследование динамических режимов гидроприводов лесных манипуляторов: учеб. пособие. Воронеж: ВГЛТУ, 2018. 109 с.
7. Патент № 2340543 РФ, МПК В66С 5/00. Креново-тангажное отвесное устройство автоматического выравнивания опорной платформы подъёмных механизмов / А. В. Великанов, П. В. Танчук, П. И. Иванищев, В. А. Нилов; заявитель

- и патентообладатель ГОУ ВПО «Воронежское ВВАИУ». № 2007114657/11; заявл. 18.04.2007; опубл. 10.12.2008, Бюл. № 34. 5 с.
8. Патент № 2243650 РФ, МПК А01G23/00, 23/08, //В66С 23/84. Опорно-поворотное устройство манипулятора / Ю Н. Сидыганов, П. Д. Шергов, Я. И. Шестаков; заявитель и патентообладатель Марийский государственный технический университет. № 2004103449/12; заявл. 05.02.2004; опубл. 10.01.2005, Бюл. № 1.
 9. Патент № 2201391 РФ, МПК В66С 23/84, А01G 23/00, А01G 23/08. Опорно-поворотное устройство манипулятора лесозаготовительной машины / Я. И. Шестаков, П. Д. Шергов, И. Н. Багаутдинов, В. А. Грязин; заявитель и патентообладатель Марийский государственный технический университет. № 20011174/13; заявл. 21.06.2001; опубл. 27.03.2003.
 10. *Трусовцев Д. С.* Оценка возможности с позиций нагруженности введения в опорно-поворотные устройства ВПМ выравнителей платформы: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. СПб.: Санкт-Петерб. гос. лесотехн. академия им. С. М. Кирова, 2001. 19 с.
 11. *Popikov P., Drapalyuk M., Druchinin D.* Reducing Amplitude of Load Swinging During Operation of Hydraulic Manipulators of Forest Transport Machines // International Conference on Industrial Engineering. Springer, Cham, 2019. P. 595—608.
 12. *Rybak A., Tsibriy I.* Simulation of the pump-battery power supply control system based on the unloading machine // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 164. P. 01004.
 13. *Kobzev K., Vyalov S., Rybak A.* Learning the basics of a battery pack control system // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 164. P. 13006.

References

1. Alexandrov V. A., Alexandrov A. V. *Modeling of technological processes of forest machines: textbook*. 3 rd ed., reprint. St. Petersburg, Lan, 2016. 368 p. (In Russ.)
2. [Bartenev I. M. et al.]. *Hydromanipulators and forest technological equipment: [monograph]*. Ed. by I. M. Bartenev. Moscow, Flinta, Nauka, 2011. 408 p. (In Russ.)
3. Dolzhenko C. B. Development of a methodology for experimental studies of the hydraulic drive of the rotation mechanism of the forest manipulator of the sortimentovoz. *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2013, no. 1, pp. 127—137. (In Russ.)
4. Lozovetsky V. V. *Hydro-and pneumatic systems of transport and technological machines: a textbook*. St. Petersburg, Moscow, Lan, 2012. 560 p. (In Russ.)
5. Pavlov A. I., Tarbeev A. A., Vdovin S. L. *Reliability, diagnostics and protection of hydraulic drives of transport and technological machines: [monograph]*. Yoshkar-Ola, PSTU, 2017. 374 p. (In Russ.)
6. Popikov P. I., Malyukov S. V., Yudin R. V. *Research of dynamic modes of hydraulic drives of forest manipulators: textbook*. Voronezh, VGLTU, 2018. 109 p. (In Russ.)
7. Velikanov A. V., Tanchuk P. V., Ivanishchev P. I., Nilov V. A. Patent No. 2340543 of the Russian Federation, IPC B66C 5/00. Krenova-tangaroa sheer device for automatic alignment of a basic platform of lifting mechanisms; applicant and patentee of the GOU VPO «Voronezh waiu». No. 2007114657/11; application No. 18.04.2007; Publ. 10.12.2008, Byul. No. 34. 5 p. (In Russ.)
8. Sidiganov Yu. N., Shergov P. D., Shestakov Ya. I. Patent No. 2243650 RF, IPC A01G23 / 00, 23/08, // B66C 23/84. Support-rotary device of the manipulator; applicant and patentee Mari State Technical University. № 2004103449 / 12; application form 05.02.2004; publ. 10.01.2005, Byul. No. 1. (In Russ.)
9. Shestakov Ya. I., Shergov P. D., Bagautdinov I. N., Gryazin V. A. Patent No. 2201391 RF, IPC B66C 23/84, A01G 23/00, A01G 23/08. Support-rotary device of the logging machine

- manipulator; applicant and patentee Mari State Technical University. No. 20011174 / 13; application 21.06.2001; publ. 27.03.2003. (In Russ.)
10. Trusova D. C. *Evaluation of the possibility from the standpoint of loading the introduction of supporting-rotary device VPM equalizers platforms*: abstract diss. ... cand. of technical sciences: 05.21.01. St. Petersburg, St. Petersburg. state leatehr. Academy of Sciences named after S. M. Kirov, 2001. 19 p. (In Russ.)
 11. Popikov P., Drapalyuk M., Druchinin D. Reducing Amplitude of Load Swinging During Operation of Hydraulic Manipulators of Forest Transport Machines. *International Conference on Industrial Engineering*. Springer, Cham, 2019, pp. 595—608.
 12. Rybak A., Tsibriy I. Simulation of the pump-battery power supply control system based on the unloading machine. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 164, pp. 01004.
 13. Kobzev K., Vyalov S., Rybak A. Learning the basics of a battery pack control system. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 164, pp. 13006.

© Попиков П. И., Юдин Р. В., Танчук П. В., Конюхов А. В., 2021