

УДК 630.377.1

DOI: 10.15393/j2.art.2019.4682

Статья

Некоторые вопросы динамики технологического оборудования челюстных погрузчиков

Вячеслав А. Борисов^{1,*}, Дмитрий В. Акинин¹

¹ Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1; E-Mails: vborisov@bmstu.ru (В. Б.); akinin.dmitrij2013@yandex.ru (Д. А.)

* Автор, с которым следует вести переписку; E-Mail: vborisov@bmstu.ru (В. Б.);
Tel.: +7(910)4201702

Получена: 17 июня 2019 / Принята: 28 июня 2019 / Опубликована: 4 июля 2019

Аннотация: в современных конструкциях лесозаготовительных машин и оборудования, в том числе челюстных лесопогрузчиков и навесных манипуляторов наиболее распространены гидромеханические устройства, в которых для механического привода поступательного действия используются гидроцилиндры. Для исследования динамики таких устройств требуется составление системы уравнений движения, нахождение реакций в механических шарнирах, определение давления рабочей жидкости в гидроцилиндрах и т.д. Такое исследование проводится для каждого конкретного устройства и является сложным и трудоёмким процессом.

Ключевые слова: погрузчик, манипулятор, устройства гидромеханические

DOI: 10.15393/j2.art.2019.4682

Article

Dynamics of grapple loaders equipment

Vyacheslav Borisov^{1*}, Dmitry Akinin¹

¹ Moscow State Technical University named after N. E. Bauman (Mytishchi branch), Russia, 141005, Moscow region, Mytishchi, st. 1-I Institutskaya, 1; E-Mails: vborisov@bmstu.ru (V. B.); akinin.dmitrij2013@yandex.ru (D. A.)

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: vborisov@bmstu.ru (V. B.); Tel.: +7(910)4201702

Received: 17 June 2019 / Accepted: 28 June 2019 / Published: 4 July 2019

Abstract: Logging machines, including grapple loaders and mounted manipulators, are commonly equipped with hydro-mechanical devices in which hydraulic cylinders are used for mechanical drive of reciprocal motion. To study the dynamics of such devices it is necessary to derive a system of motion equations, to find reactions in mechanical joints, to take into account the fluid pressure in hydraulic cylinders, etc. This study is carried out for each specific device and is a complex and time-consuming process.

Keywords: loader, manipulators, hydro-mechanical devices

1. Введение

Основной целью научно-технического прогресса в лесном комплексе является разработка и внедрение в производство прогрессивных технических и технологических решений, обеспечивающих повышение производительности, снижение материало- и энергоёмкости процессов и операций, уменьшающих вредное воздействие на окружающую среду и оператора. Это возможно при оснащении предприятий отрасли машинами высокого технического уровня.

Особое место в общей системе машин для лесного комплекса занимают машины манипуляторного типа [1—3]. Применение их позволило лесной отрасли перейти на индустриальную основу, заменить ручной труд машинным и тем самым повысить производительность труда и улучшить условия работы. Поэтому одним из приоритетных направлений в лесном машиностроении было и остаётся оснащение производства высокоэффективной техникой, оборудованной манипуляторами.

Для механизации работ по погрузке круглых лесоматериалов на лесовозный транспорт, штабелёвке, сброске на воду на нижних береговых складах лесозаготовительных и лесосплавных предприятий широкое применение получили челюстные лесопогрузчики.

По конструкции и применяемым схемам работ рабочих органов лесопогрузчики можно разделить на три основных вида: челюстные перекидного типа, челюстные фронтального типа (лесоштабелеры) и манипуляторы. Навесное оборудование лесопогрузчика состоит из рамы, поворотного основания, стрелы, нижней челюсти, двух стоек, механизма поворота нижней челюсти, гидравлической системы, установки карданных валов, дополнительного оборудования и системы электрооборудования.

Представленная статья является продолжением исследования [4], [5] и отражает вопросы формализованного математического описания движения технологического оборудования челюстных лесопогрузчиков и навесных манипуляторов.

2. Материалы и методы

Значительная доля повреждений элементов конструкции современных машин происходит вследствие напряжений, возникающих при колебаниях, возбуждаемых различными периодическими и внезапно приложенными нагрузками. Серьёзную опасность представляют резонансные режимы, возникающие в различных узлах машин. В связи с этим создание новых и совершенствование существующих машин должно осуществляться на основе тщательного теоретического и экспериментального изучения колебательных процессов и вызываемых ими нагрузок в деталях машин [6], [7].

Колебательные процессы имеют для навесного оборудования челюстных погрузчиков особое значение, поскольку цикличность, нестационарные режимы нагружения, большое количество выполняемых технологических операций обуславливают высокую динамическую напряжённость элементов конструкции [8], [9].

Зачастую погрузочно-разгрузочные работы выполняются при наклонных положениях базовой машины. Грузы самые разнообразные: единичные, длинномерные, а также пакеты сортиментов. Все это определяет трудности в проектировании и доводки конструкции лесных погрузчиков, а статические методы расчёта прочности не дают желаемой надёжности элементов навесного оборудования [10], [11].

На рисунке 1 представлена формализованная схема, осуществляющая перемещение сортиментов, для которой будет проведено исследование.

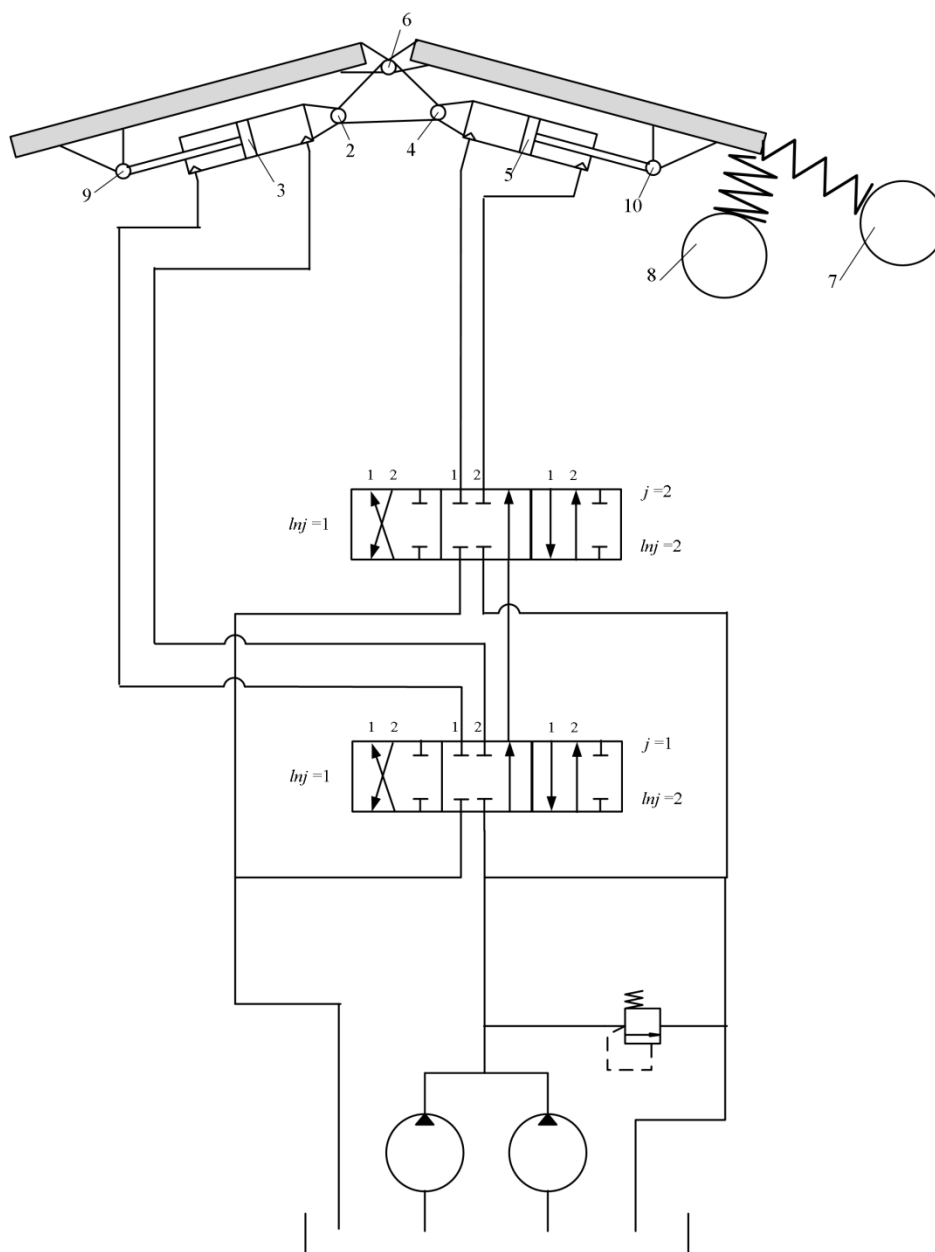


Рисунок 1. Технологическое оборудование с нумерацией звеньев и принципиальная схема его гидросистемы

Примем, что звенья являются абсолютно жёсткими, а в шарнирах отсутствуют силы сухого трения. Пачку сортиментов или хлыстов будем рассматривать в виде трёх сосредоточенных масс, одна из которых образует с захватом технологического оборудования одно общее тело, а две другие массы присоединены к нему с помощью упругих элементов. Звенья технологического оборудования и пачка сортиментов (хлыстов) образуют систему твёрдых тел с замкнутыми цепями [12].

Для преобразования такой системы виртуально разрежем шарниры, соединяющие штоки гидроцилиндров со звеньями технологического оборудования челюстного погрузчика. В результате получим приведённую систему.

Примем $n + 1$ число тел системы, включая основание. Приведённая система будет иметь n шарниров. Число разрезанных шарниров обозначим через N .

Основание обозначается номером 0. Оставшиеся тела и предшествующие им шарниры обозначаются в порядке от 0 до n , а разрезанные шарниры — от $n + 1$ до $n + N$. С каждым телом системы свяжем векторные базисы:

$$e^{(s)} = \left[e_1^{(s)} \ e_2^{(s)} \ e_3^{(s)} \right]^T, \\ s = 0, \dots, n,$$

где T — показатель транспонированной матрицы.

Из всей совокупности шарниров, используемых в технологическом оборудовании челюстных лесопогрузчиков и навесных манипуляторов, выделяют пять групп однотипных шарниров. Для обозначения данных групп и идентификации входящих в каждую группу шарниров вводятся целочисленные функции $a_j(i)$ (j — номер группы, $j = 1 \dots 5$, i — номер шарнира в пределах группы, $i = 1 \dots n$). Примем, что в группы с номерами $j = 1, 2, 3$ входят цилиндрические шарниры, оси которых направлены вдоль базовых векторов соответственно $e_1^{(s)}$, $e_2^{(s)}$, $e_3^{(s)}$; в группы с номерами $j = 4, 5$ — соответственно поступательные шарниры гидроцилиндров и пружинные шарниры, соединяющие массы расчётной модели пачки сортиментов (хлыстов) с челюстным захватом. Для технологического оборудования челюстного лесопогрузчика $n_1 = n_2 = 0$; $n_3 = 4$; $n_4 = 2$; $n_5 = 2$; $a_3(i) = 1, 2, 4, 6$; $a_4(i) = 3, 5$; $a_5(i) = 7, 8$.

Обозначим через n_u общее число гидродвигателей, в которое входят гидроцилиндры с шарнирами $a_4(i)$, а также гидромоторы и механизмы поворота реечного типа с шарнирами $a_2(i)$. Будем считать, что на каждый гидродвигатель приходится отдельное распределительное устройство (РУ) с порядковым номером от 1 до n . Также присваиваются номера выходным окнам, причём окна, соединённые гидромагистралями с полостями 1 гидродвигателей, обозначим номером 1, с полостями 2 — номером 2. Далее вводится целочисленная функция $a_u(j)$, членами которой являются номера шарниров

гидродвигателей, работой которых управляют РУ с номерами $j = 1, \dots, n$. Для выбранного технологического оборудования (рисунок 1) $a_u(j) = 3, 5$.

В соответствии с [5] для систем твёрдых тел с замкнутыми цепями уравнения движения будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \ddot{q} &= A^{-1}[B + B^* - H^T(HA^{-1}H^T)^{-1}(HA^{-1}[B + B^*] + F^*)], \\ A &= W \cdot mW^T + (pT) \cdot J \cdot (pT)^T, \\ W &= p \times T(C + Z)T - kT, \\ B &= W \cdot (F - mU) - pT(M + J \cdot (T^T - \omega_0 1_n) - V) - kX - pY, \\ B^* &= -[pT \times (C^* + Z^* - (C + Z)TS^*) + kTS^*] \cdot X^* - pTS^* \cdot Y^*. \end{aligned} \quad (1)$$

В соответствии с работой [4] в вышеуказанной системе матрицы F и M являются специфическими для технологического оборудования челюстного лесопогрузчика, остальные матрицы имеют общий характер, а показатель 1 означает обращение матрицы [5].

Матрицы F и M являются матрицами-столбцами, элементами которых являются соответственно главные векторы и главные моменты инерции внешних сил.

На звенья технологического оборудования челюстного лесопогрузчика из внешних сил действуют только силы тяжести и силы, создаваемые давлением рабочей жидкости в гидроцилиндрах. В соответствии с этим матрица F принимает вид:

$$F = F_1 + F_2.$$

Элементы матрицы F_1 определяются по соотношению

$$F_1 = (m_1, \dots, m_n)^T \cdot g,$$

где m_i — массы тел звеньев технологического оборудования челюстного лесопогрузчика и пачки сортиментов (хлыстов), $i = 1, \dots, n$; g — ускорение свободного падения.

Определение элементов матрицы F_2 осуществляется из следующего выражения:

$$\begin{aligned} &-\lambda n_{zj}(P_{1j}S_{1j} - P_{2j}S_{2j})e_1^{(i)} \text{ для } i = i^+(a), \\ &\lambda n_{zj}(P_{1j}S_{1j} - P_{2j}S_{2j})e_1^{(i)} \text{ для } i = i^-(a), \\ &F_{2i} = 0, \\ &i = 1, \dots, n, a = a_u(j), j = j_p(k), k = 1, \dots, n_p, \\ &a \neq a_2(m), m = 1, \dots, n_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где n_{zj} — число параллельных гидроцилиндров в шарнире a ; P_{1j}, P_{2j} — давления рабочей жидкости соответственно в полостях 1 и 2 гидроцилиндров; S_{1j}, S_{2j} — площади поршня

в данных плоскостях; $i^+(a), i^-(a)$ — целочисленные функции, описывающие структуру взаимосвязей тел динамической системы [4]; $j_p(k)$ — функция, членами которой являются номера РУ, золотники которых в рассматриваемый момент времени находятся в рабочем положении; n_p — число данных РУ.

Величина коэффициента λ определяется следующим образом:

при $l_{zj} = 1$,

$$\lambda = j = j_p(k), k = 1, \dots, n_p,$$

при $l_{zj} = 2$, где l_{zj} — функция, определяющая рабочее положение золотника РУ, $j = 1, \dots, n_u$.

Если золотник РУ с номером j находится в положении, при котором рабочая жидкость поступает от насосной станции в полость 1 гидроцилиндра, то $l_{zj} = 1$, если в полость 2, то $l_{zj} = 2$.

Внешние моменты действуют на технологическое оборудование челюстного лесопогрузчика в шарнирах типа $a_2(i)$ при работе механизмов поворота рабочего органа. Если механизм поворота речного типа, то моменты внешних сил определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} & -0,5d_j n_{zj} (P_{1j} S_{1j} - P_{2j} S_{2j}) e_2^{(i)} \text{ для } i = i^+(a), \\ & 0,5d_j n_{zj} (P_{1j} S_{1j} - P_{2j} S_{2j}) e_2^{(i)} \text{ для } i = i^-(a), \\ & i = 1, \dots, n, a = a_u(j), j = j_p(k), k = 1, \dots, n_p, \\ & a \neq a_4(m), m = 1, \dots, n_4, \end{aligned} \quad (3)$$

где d_j — диаметр делительной окружности вала-шестерни речной передачи.

Давления P_{1j} и P_{2j} в зависимостях (2) и (3) неизвестны, следовательно, чтобы проинтегрировать уравнения движения (1), необходимо определить зависимости между данными величинами и кинематическими параметрами технологического оборудования челюстного лесопогрузчика, а также характеристиками элементов их гидросистем [13], [14].

В соответствии с работой [6] можно записать:

$$\begin{aligned} \dot{P}_{1j} &= \frac{E_{1j}}{V_{1j}} (Q_{p1j} - Q_{1j}), \\ \dot{P}_{2j} &= -\frac{E_{2j}}{V_{2j}} (Q_{p2j} - Q_{2j}), \\ j &= j_p(k), k = 1, \dots, n_p, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\dot{P}_{1j}, \dot{P}_{2j}$ — первые производные по времени от P_{1j} и P_{2j} ; Q_{1j}, Q_{2j} — расходы рабочей жидкости в полостях 1 и 2 гидроцилиндра с номером j ; Q_{p1j}, Q_{p2j} — расходы рабочей жидкости в окнах 1 и 2 РУ; V_{1j}, V_{2j} — суммарные объёмы соответственно полостей 1 и 2

гидроцилиндра и прилегающих к ним гидромагистралей; E_{1j}, E_{2j} — приведённые модули объёмной упругости смеси жидкости с воздухом, находящиеся в упругих оболочках с объёмами V_{1j} и V_{2j} .

Величины Q_{p1j} и Q_{p2j} являются следующими функциями:

$$\begin{aligned} Q_{p1j} &= f_1(P_{p1j}, h_j, l_{uj}), \\ Q_{p2j} &= f_2(P_{p2j}, h_j, l_{uj}), \end{aligned} \quad (5)$$

где P_{p1j}, P_{p2j} — давления рабочей жидкости в окнах 1 и 2 РУ; h_j — функция положения j -го золотника РУ в зависимости от времени t .

Уравнения (5) для РУ (рисунок 1) получены в явном виде.

Давления P_{p1j} и P_{p2j} определяют с помощью равенств

$$\begin{aligned} P_{p1j} &= P_{1j} + \lambda \Delta P_{1j}, \\ P_{p2j} &= P_{2j} + \lambda \Delta P_{2j}, \end{aligned}$$

где $\Delta P_{1j}, \Delta P_{2j}$ — потери давления рабочей жидкости в гидромагистралах, соединяющих полости 1 и 2 гидроцилиндра с окнами 1 и 2 РУ.

Величины Q_{1j} и Q_{2j} заменяют зависимостями

$$\begin{aligned} Q_{1j} &= n_{uj} S_1 \dot{q}_a, \\ Q_{2j} &= n_{uj} S_2 \dot{q}_a, \end{aligned}$$

для $a = a_u(j), j = j_p(k), k = 1, \dots, n_p, a \neq a_2(m), m = 1, \dots, n_2;$

$$\begin{aligned} Q_{1j} &= 0,5 d_j n_{zj} S_{1j} \dot{q}_a, \\ Q_{2j} &= 0,5 d_j n_{zj} S_{2j} \dot{q}_a, \end{aligned}$$

для $a = a_u(j), j = j_p(k), k = 1, \dots, n_p, a \neq a_4(m), m = 1, \dots, n_4,$

где \dot{q}_a — первая производная по времени от обобщённой координаты в шарнире a .

Таким образом, все величины, входящие в правые части уравнений (1) и (4), определены как функции от q, \dot{q} и t . Здесь q, \dot{q} — матрицы, членами которых являются соответственно обобщённые координаты технологического оборудования челюстного лесопогрузчика и их первые производные по времени. Задаваясь начальными условиями, уравнения (1) и (4) можно проинтегрировать.

При интегрировании определяются q, \dot{q}, P_{1j} и $P_{2j}, j = j_p(k), k = 1, \dots, n_p$ в зависимости от времени [15].

Для проверки результатов теоретических исследований выполнен динамический анализ технологического оборудования лесопогрузчика ПЛ-2, на котором производились

экспериментальные исследования. Механизм рассматривался в процессе разбега и установившегося движения. Общий интервал времени при этом составил от 0 до 3 с.

При анализе было принято $n_p = 1, j_p(k) = 1, l_{uj} = 1, n_5 = 0$. Значения масс звеньев челюстного захвата, геометрические характеристики и параметры гидросистемы были взяты с лесопогрузчика ПЛ-2. Для построения матриц H и F предварительно было получено пять уравнений связей, из них четыре уравнения относятся к разрезным шарнирам 9 и 10. Пятое уравнение служит для стабилизации при интегрировании величины q_5 , которая является обобщённой координатой в рассматриваемый момент времени гидроцилиндра [16], [17].

3. Результаты и выводы

Результаты теоретических вычислений и экспериментальных данных представлены на рисунке 2.

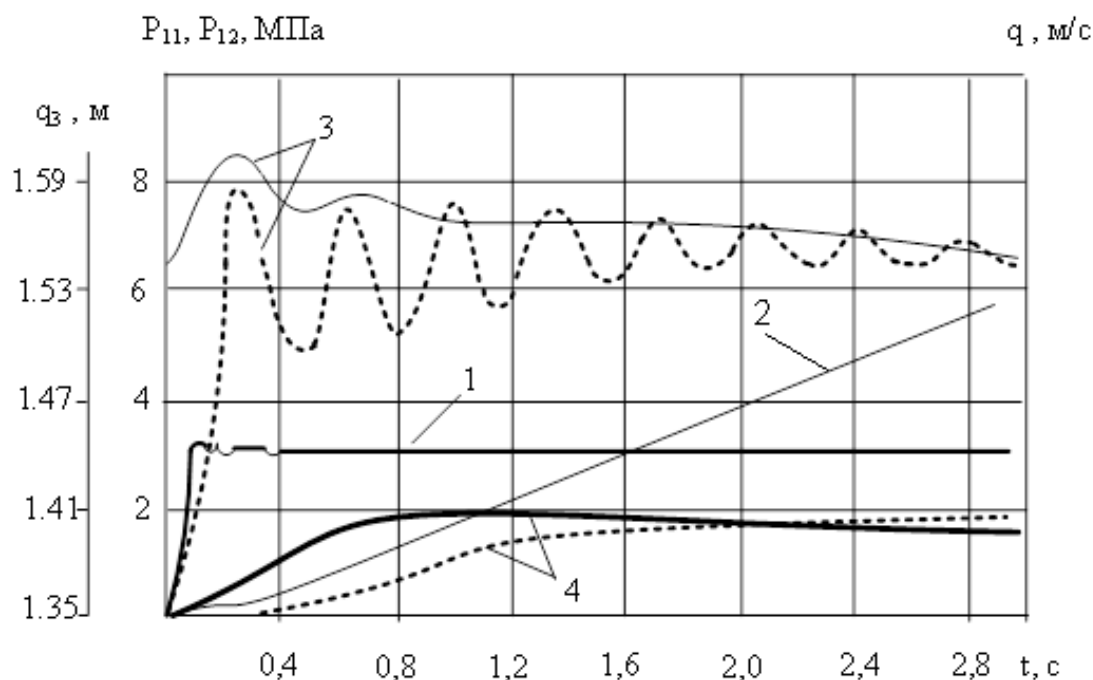


Рисунок 2. Зависимости скорости штока, перемещения штока и давления в полостях работающего гидроцилиндра от времени при работе рычажного механизма: 1 — относительная скорость штока; 2 — перемещение штока; 3, 4 — давление рабочей жидкости соответственно в напорной и сливной полостях; ————— — расчётные зависимости; - - - - - — экспериментальные зависимости

Отклонение расчётных (теоретических) максимальных значений давления от экспериментальных составляет от 5 до 15 %, что является в зоне допустимых отклонений.

Полученные при исследовании уравнения движения позволяют проводить динамический анализ технологического оборудования челюстных лесопогрузчиков, а также навесных

манипуляторов с произвольными кинематическими схемами при минимальном объёме подготовительной работы, имеющей формальный характер.

Сравнение значений давления в полостях гидроцилиндров, полученных расчётным и экспериментальным путём, подтверждают достаточную адекватность разработанных математических моделей реальным динамическим процессам в технологическом оборудовании лесопогрузчиков [2], [6].

Использование результатов исследования даёт возможность сократить не только сроки, но и повысить качество проектирования технологического оборудования и избавиться от необходимости тензометрирования их конструкции.

Список литературы

1. Некоторые вопросы, связанные с трелёвкой хлыстов / А. А. Камусин, В. А. Борисов, Д. В. Акинин, Н. И. Казначеева // Resources and Technology. — 2019. — № 16 (1). — С. 52—67.
2. Повышение эффективности насосных установок лесосечных машин на примере ЛПП-19 / В. А. Борисов, Д. В. Акинин, Д. П. Илюхин, Д. П. Попутчиков // International Journal of Advanced Studies. — 2018. — Т. 8, № 4-2. — С. 11—21.
3. Некоторые вопросы управляемости лесных колёсных тракторов при износе механизма управления с гидроусилителем / Е. А. Фокина, Н. И. Казначеева, Д. В. Акинин, Д. М. Левушкин, В. А. Борисов // Успехи современной науки и образования. — 2017. — Т. 4, № 4. — С. 159—161.
4. Борисов, В. А. Анализ характеристик динамических воздействий на лесные машины при погрузочных и других технологических операциях / В. А. Борисов, Д. В. Акинин, Н. И. Казначеева // Проблемы и перспективы технических наук: сборник статей Международной научно-практической конференции; отв. ред. А. А. Сукиасян. — Уфа, 2015. — С. 28—34.
5. Исследование гидропривода технологического оборудования лесозаготовительных машин / А. А. Камусин, Н. И. Казначеева, В. А. Борисов, Д. В. Акинин // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. — 2014. — Т. 18, № S2. — С. 119—121.
6. Виттенбург, Й. Динамика систем твёрдых тел / Й. Виттенбург. — Москва : Мир, 1980. — 292 с.
7. Цуханова, Е. А. Динамический синтез дроссельных управляющих устройств гидроприводов / Е. А. Цуханова. — Москва : Наука, 1978. — 255 с.
8. Алябьев, В. И. Создание систем погрузо-разгрузочных и штабелёвочных машин для лесозаготовительной промышленности / В. И. Алябьев // Тр. ЦНИИМЭ. — Москва, 1975.
9. Алябьев, В. И. Экспериментально-кинематические показатели и динамика исполнительных органов лесопогрузчиков / В. И. Алябьев. — Москва : МЛТИ, 1970.
10. Анилович, В. Я. Метод расчёта колебаний скоростных тракторов при езде по неровностям / В. Я. Анилович // Тракторы и сельхозмашины. — 1961. — № 10.
11. Антонюк, Е. Я. Динамика механизмов переменной структуры / Е. Я. Антонюк; АН УССР, Институт механики. — Киев : Наукова думка, 1988.
12. Верхов, Ю. И. Теоретические основы проектирования лесных погрузочно-транспортных машин / Ю. И. Верхов. — Красноярск : Изд-во КрасГАУ, 1984. — 224 с.

13. *Abracham, H.* Finding fundamental natural Frequencies for Common beam configuration / H. Abracham // Machine Design. — Maret, 1986.
14. *Beneche, X. A.* Hewte desigt a seg-optimisting Vibration. Denper. / X. A. Beneche, B. Finding, I. C. Bollienger // Machine Design. — Februar, 1988.
15. *Blacrmann, R. B. and Tukey, Y. W.* The Bell Sustem Technical Y. V. / R. B. Blacrmann and Y. W. Tukey // The Bell Sustem Technical Y. V. XXX VII. — 1978. — No 12.
16. *Gross, Sigfried.* Hablatbetweret fur Hudraulikkraner / Gross Sigfried // Fordern und Heben. — 1991. — No 21. — P. 877—883, A-1 1, A-13.
17. *Miles, Y.* On the structural fatigue under random loading / Y. Miles // Journal of the Aeronautical Science. — 1974. — No 11. — P. 109.

References

1. Nekotory`e voprosy`, svyazanny`e s trelyovkoj xly`stov / A. A. Kamusin, V. A. Borisov, D. V. Akinin, N. I. Kaznacheeva // Resources and Technology. — 2019. — No 16 (1). — S. 52—67.
2. Povy`shenie e`ffektivnosti nasosny`x ustanovok lesosechny`x mashin na primere LP-19 / V. A. Borisov, D. V. Akinin, D. P. Ilyuxin, D. P. Poputchikov // International Journal of Advanced Studies. — 2018. — T. 8, No 4-2. — S. 11—21.
3. Nekotory`e voprosy` upravlyaemosti lesny`x kolyosny`x traktorov pri iznose mexanizma upravleniya s gidrosilitelem / E. A. Fokina, N. I. Kaznacheeva, D. V. Akinin, D. M. Levushkin, V. A. Borisov // Uspexi sovremennoj nauki i obrazovaniya. — 2017. — T. 4, No 4. — S. 159—161.
4. *Borisov, V. A.* Analiz xarakteristik dinamicheskix vozdeystvij na lesny`e mashiny` pri pogruzochny`x i drugix texnologicheskix operacijax / V. A. Borisov, D. V. Akinin, N. I. Kaznacheeva // Problemy` i perspektivy` texnicheskix nauk: sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii; otv. red. A. A. Sukiasyan. — Ufa, 2015. — S. 28—34.
5. Issledovanie gidroprivoda texnologicheskogo oborudovaniya lesozagotovitel`ny`x mashin / A. A. Kamusin, N. I. Kaznacheeva, V. A. Borisov, D. V. Akinin // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa — Lesnoj vestnik. — 2014. — T. 18, No S2. — S. 119—121.
6. *Vittenburg, J.* Dinamika sistem tvyordy`x tel / J. Vittenburg. — Moskva : Mir, 1980. — 292 s.
7. *Czuxanova, E. A.* Dinamicheskij sintez drossel`ny`x upravlyayushhix ustrojstv gidroprivodov / E. A. Czuxanova. — Moskva : Nauka, 1978. — 255 s.
8. *Alyab`ev, V. I.* Sozdanie sistem pogruzo-razgruzochny`x i shtablyovochny`x mashin dlya lesozagotovitel`noj promy`shlennosti / V. I. Alyab`ev // Tr. CzNIIME`. — Moskva, 1975.
9. *Alyab`ev, V. I.* E`ksperimental`no-kinematcheskie pokazateli i dinamika ispolnitel`ny`x organov lesopogruzhchikov / V. I. Alyab`ev. — Moskva : MLTI, 1970.
10. *Anilovich, V. Ya.* Metod raschyota kolebanij skorostny`x traktorov pri ezde po nerovnostyam / V. Ya. Anilovich // Traktory` i sel`xozmashiny`. — 1961. — No 10.
11. *Antonyuk, E. Ya.* Dinamika mexanizmov peremennoj struktury` / E. Ya. Antonyuk; AN USSR, Institut mexaniki. — Kiev : Naukova dumka, 1988.
12. *Verxov, Yu. I.* Teoreticheskie osnovy` proektirovaniya lesny`x pogruzochno-transportny`x mashin / Yu. I. Verxov. — Krasnoyarsk : Izd-vo KrasGAU, 1984. — 224 s.
13. *Abracham, H.* Finding fundamental natural Frequencies for Common beam configuration / H. Abracham // Machine Design. — Maret, 1986.

14. *Beneche, X. A.* Hewte desigt a seg-optimisting Vibration. Denper. / X. A. Beneche, B. Finding, I. C. Bollienger // Machine Design. — Februar, 1988.
15. *Blacрман, R. B. and Tukey, Y. W.* The Bell Sustem Technical Y. V. / R. B. Blacрман and Y. W. Tukey // The Bell Sustem Technical Y. V. XXX VII. — 1978. — No 12.
16. *Gross, Sigfried.* Hablatbetweret fur Hudraulikkrane / Gross Sigfried // Fordern und Heben. — 1991. — No 21. — P. 877—883, A-1 1, A-13.
17. *Miles, Y.* On the structural fatigue under random loading / Y. Miles // Journal of the Aeronautical Science. — 1974. — No 11. — P. 109.

© Борисов В. А., Акинин Д. В., 2019