

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6023

УДК 630*307

Статья

Математическая модель рабочих процессов бесчokerного трелёвочного захвата с энергосберегающим гидроприводом

Юдин Роман Викторович

кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), romanjudin1@yandex.ru

Попиков Пётр Иванович

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

Усков Владимир Игоревич

кандидат физико-математических наук, старший преподаватель, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), vut1@yandex.ru

Платонов Алексей Александрович

кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), paa7@rambler.ru

Попиков Виктор Петрович

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

Канищев Денис Александрович

инженер-конструктор I-й категории, филиал АО «Верофарм» (группа Abbott) в г. Воронеже (Российская Федерация), deniskanischeff@yandex.ru

Получена: 15 ноября 2021 / Принята: 14 марта 2022 / Опубликовано: 19 марта 2022

Аннотация: При рубках ухода за лесом в лесостепной зоне России нередко применяются бесчokerные трелёвочные устройства в агрегате с колёсными сельскохозяйственными тракторами. При этом во время движения трактора с вышеозначенным агрегатом по неровностям рельефа на вырубках зачастую

возникают негативные колебания, которые вызывают скачки рабочей жидкости в гидросистеме, и общие высокие динамические нагрузки, снижающие, в свою очередь, надёжность как технологического оборудования, так и тягового агрегата. Одним из вариантов снижения динамических нагрузок и энергозатрат является применение энергосберегающего (рекуперативного) гидравлического привода с гидроаккумулятором. Целью исследования является разработка нового бесчокерного трелёвочного захвата и математической модели, учитывающей внешние и внутренние силы, действующие на трелюемую пачку древесины, а также параметров энергосберегающего гидропривода, позволяющего обеспечить снижение динамической нагруженности и энергоёмкости рабочих процессов. Авторами статьи предложена новая конструктивно-технологическая схема бесчокерного трелёвочного захвата с энергосберегающим гидроприводом, защищённая патентом Российской Федерации на изобретение. Представлена математическая модель, учитывающая не только внешние и внутренние силы, действующие на трелюемую пачку древесины, но также и параметры энергосберегающего гидравлического привода. Рассмотрены рабочие процессы захвата вместе с пачкой древесины при переходных режимах разгона и торможения, которые описаны уравнением движения поршня гидроцилиндра рекуперации и уравнением расхода рабочей жидкости гидроцилиндра рекуперации с учётом перетечек в гидроаккумулятор при давлении выше предварительной зарядки. Рассмотрена задача Коши для нелинейной системы дифференциальных уравнений движения трелёвочного захвата с энергосберегающим гидроприводом. Получены теоретические временные зависимости давления рабочей жидкости и хода штока гидроцилиндра рекуперации, адекватность которых подтверждены результатами экспериментальных исследований на действующем лабораторном стенде бесчокерного захвата с энергосберегающим гидроприводом, со следующими проектными параметрами: давление предварительной зарядки гидроаккумулятора 5 МПа; рабочий объём гидроаккумулятора $0,005 \text{ м}^3$; диаметр поршня гидроцилиндра 0,1 м; диаметр штока гидроцилиндра 0,04 м. Установлено, что система рекуперации энергии трелёвочного захвата снижает всплески давления рабочей жидкости при переходных процессах в 1,4—1,7 раза и позволяет запасать мощность в пределах 1,7—2,1 кВт.

Ключевые слова: математическая модель, энергосберегающий гидропривод, бесчокерный захват, трелёвка, рекуперация, гидроаккумулятор, пачка древесины

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6023

Article

Mathematical model of working processes of a chokerless hauling grip with an energy-saving hydraulic drive

Roman Yudin

Ph. D. in engineering, associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), romanyudin1@yandex.ru

Petr Popikov

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

Vladimir Uskov

Ph. D. in physics and mathematics, senior lecturer, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), vum1@yandex.ru

Alexey Platonov

Ph. D. in engineering, associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), paa7@rambler.ru

Victor Popikov

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

Denis Kanishchev

engineer, branch of JSC «Veropharm» (Abbott group) in Voronezh (Russian Federation), deniskanischeff@yandex.ru

Received: 15 November 2021 / Accepted: 14 March 2022 / Published: 19 March 2022

Abstract: Chokerless hauling devices are often used in combination with wheeled agricultural tractors for thinning operations in the forest-steppe zone of Russia. Negative fluctuations often occur during the movement of the tractor with the above-mentioned unit along uneven terrain in clearings. They cause jumps in the working fluid in the hydraulic system and general high dynamic loads, which in turn reduce the reliability of both technological equipment and the traction unit. One of the options for reducing dynamic loads and energy consumption is the use of an energy-saving (recuperative) hydraulic drive with a hydraulic accumulator. The aim of the study was to develop a

new chokerless hauling grip and a mathematical model that took into account external and internal forces acting on a skidded bundle of wood, as well as the parameters of an energy-saving hydraulic drive that allowed reducing the dynamic loading and energy intensity of work processes. The authors of the article proposed a new design and technological scheme for a chokerless hauling grip with an energy-saving hydraulic drive, protected by a patent of the Russian Federation for an invention. A mathematical model is presented that takes into account not only the external and internal forces acting on the skidding pack of wood, but also the parameters of an energy-saving hydraulic drive. The working processes of gripping together with a pack of wood during transient acceleration and deceleration modes are described by the equation of motion of the recuperation hydraulic cylinder piston and by the equation of the hydraulic fluid consumption of the recuperation hydraulic cylinder, taking into account leakages into the accumulator at a pressure higher than the pre-charge one. The Cauchy problem for a nonlinear system of differential equations of a hauling grip motion with an energy-saving hydraulic drive was considered. Theoretical time dependences of the working fluid pressure and the stroke of the recuperation hydraulic cylinder were obtained, their adequacy was confirmed by the results of experimental studies on an operating laboratory stand for a chokerless gripper with an energy-saving hydraulic drive with the following design parameters: hydraulic accumulator pre-charge pressure 5 MPa; hydraulic accumulator working volume 0.005 m³; hydraulic cylinder piston diameter 0.1 m; hydraulic cylinder rod diameter 0.04 m. It has been established that the energy recovery system of the hauling grip reduced bursts of the working fluid pressure during transient processes by 1.4...1.7 times and allowed reserving power in the range of 1.7 ... 2.1 kW.

Keywords: mathematical model, energy-saving hydraulic drive, chokerless gripper, hauling, recuperation, hydraulic accumulator, timber stack

1. Введение

В настоящее время в России и в большинстве зарубежных стран применяется сортиментная технология заготовки древесины с использованием форвардеров и харвестеров. В России в основном применяются дорогие форвардеры тяжёлой серии на сплошных рубках. Грузоподъёмность форвардеров этой группы составляет 16—21 т [1]. При рубках ухода за лесом в лесостепной зоне РФ применяются бесчokerные трелёвочные устройства типа ПТН-0,8 в агрегате с колёсными сельскохозяйственными тракторами. Во время трелёвки сортиментов по неровностям рельефа возникают большие динамические нагрузки, которые приводят к снижению надёжности гидропривода технологического оборудования и производительности агрегата [2].

Анализ многих исследований отечественных и зарубежных специалистов показывает, что в основе рационализации должен лежать оптимальный выбор технологий и применяемых лесных машин [3—7]. В настоящее время почти все лесные машины оснащены гидравлическим оборудованием, поэтому повышение эксплуатационных характеристик гидропривода в целом позволит повысить эффективность и производительность лесных машин. Одним из вариантов снижения динамических нагрузок и энергозатрат является применение энергосберегающего (рекуперативного) гидропривода с гидроаккумулятором [8]. В настоящее время рекуперативный гидропривод с аккумулятором применяется в машинах циклического действия, манипуляторах, автокранах, экскаваторах. В лесном хозяйстве проведены исследования рекуперации гидравлической энергии в тягово-сцепном устройстве лесовозного автомобиля с прицепом [9—11].

Известные на данный момент теоретические и экспериментальные исследования рабочих процессов лесных машин, использующих в своей конструкции энергосберегающий гидропривод технологического оборудования, недостаточно полно описывают динамику процессов, возникающих в гидросистеме при взаимодействии трелёвочных захватов с пачкой древесины. Поэтому необходимо проведение теоретических и экспериментальных исследований новых конструкций трелёвочных захватов с энергосберегающим гидроприводом, позволяющих повысить эффективность рабочих процессов.

Целью исследования является разработка нового бесчokerного трелёвочного захвата и математической модели, учитывающей внешние и внутренние силы, действующие на трелеваемую пачку древесины, а также параметров энергосберегающего гидропривода, позволяющего обеспечить снижение динамической нагруженности и энергоёмкости рабочих процессов.

2. Материалы и методы

В качестве объекта исследования нами был выбран бесчokerный захват трелёвочный ПТН-0,8 в агрегате с трактором МТЗ-82, для усовершенствования которого разработана новая конструктивно-технологическая схема устройства для бесчokerной трелёвки леса

с энергосберегающим гидроприводом, защищённая патентом на изобретение [12]. На основе патента разработана расчётная схема бесчокерного захвата с энергосберегающим гидроприводом, который отделён от трактора вместе с пачкой по сферическому шарниру на подвижной раме 6 (рисунок 1). Во время трелёвки пачки брёвен 8 бесчокерным захватом 7 с энергосберегающим гидроприводом в агрегате с колёсным трактором при движении по неровностям рельефа 9 возникают колебания пачки брёвен и переходные процессы разгона и торможения в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Рабочая жидкость из полостей гидроцилиндра рекуперации 5 при колебаниях пачки брёвен 8 поочерёдно вытесняется в гидроаккумулятор 1 через напорные обратные клапаны 2, а через всасывающие обратные клапаны 3 рабочая жидкость из гидробака 4 поступает в полости гидроцилиндра, в которых создаётся разрежение.

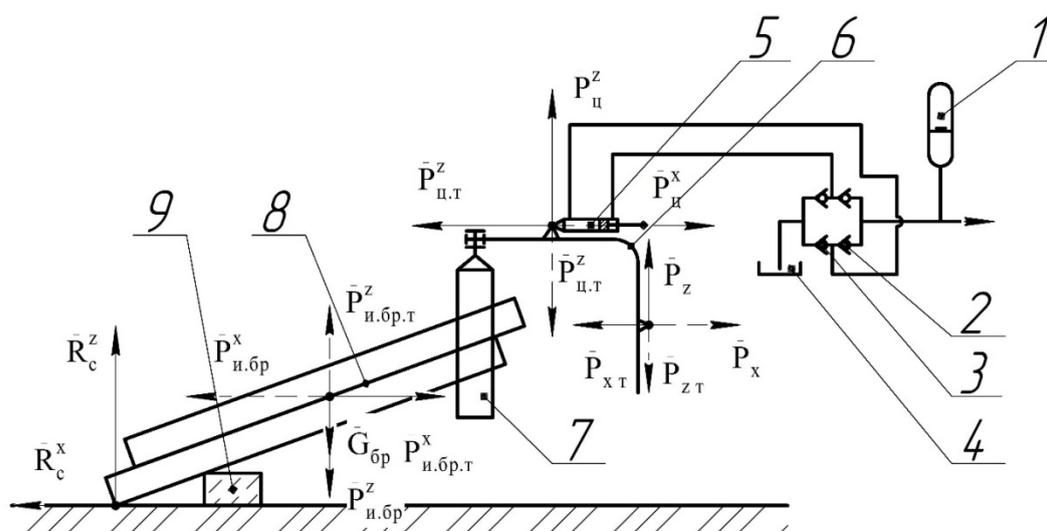


Рисунок 1. Расчётная схема бесчокерного захвата с энергосберегающим гидроприводом

Figure 1. Design diagram of a chokerless gripper with an energy-saving hydraulic drive

Рассмотрим рабочие процессы захвата вместе с пачкой при переходных режимах разгона и торможения, которые можно описать уравнением движения поршня гидроцилиндра рекуперации и уравнением расхода рабочей жидкости гидроцилиндра рекуперации с учётом перетечек в гидроаккумулятор при давлении выше предварительной зарядки. Поскольку система дифференциальных уравнений нелинейная, то решение может быть получено только в приближённом виде, в виде совокупности точек на заданном отрезке.

3. Результаты

Рассматривается задача Коши на $(0; t_{\max})$, где t_{\max} — конечная точка для нелинейной системы дифференциальных уравнений движения захвата с пачкой брёвен:

$$m_{\delta p} \frac{d^2 x}{dt^2} = pS + P_x - R_c^x, \quad (1)$$

$$S \frac{dx}{dt} = k\sqrt{|p - p_0|} + \frac{V_0}{E_{np}} \cdot \frac{dp}{dt}, \quad (2)$$

$$x(0) = x_0, \quad x'(0) = x_1, \quad p(0) = p_0, \quad (3)$$

где $m_{\delta p}$ — масса пачки брёвен в захвате, кг; S — рабочая площадь поршня гидроцилиндра рекуперации энергии, м²; p — давление жидкости в гидроприводе, Па; P_x — горизонтальная составляющая силы тяги, Н; R_c^x — горизонтальная составляющая силы сопротивления волочению пакета брёвен, Н; k — коэффициент дросселирования рабочей жидкости в гидролинии между гидроцилиндром рекуперации и гидроаккумулятором, м³·с·Па^{-1/2}; p_0 — давление предварительной зарядки гидроаккумулятора, Па; V_0 — рабочий объём гидроаккумулятора, м³; E_{np} — приведённый модуль упругости, Па.

В данной формуле введём обозначения.

В обозначениях $\alpha = S$, $\beta = \frac{V_0}{E_{np}}$, $F_c = P_x - R_c^x$ перепишем систему (1), (2):

$$m_{\delta p} \frac{d^2 x}{dt^2} = \alpha p - F_c, \quad (4)$$

$$\alpha \frac{dx}{dt} = k\sqrt{|p - p_0|} + \beta \frac{dp}{dt}. \quad (5)$$

Аппроксимируем производные их разностными аналогами. Для этого разобьём отрезок $(0; t_{max})$ точками t_i с шагом h : $t_{i+1} = t_i + h$, $i = 0, 1, \dots, n - 1$, с $h = \frac{t_{max} - 0}{n} = \frac{t_{max}}{n}$. Обозначив $x_i = x(t_i)$, $p_i = p(t_i)$, получим:

$$\frac{dx}{dt} \approx \frac{x_{i+1} - x_i}{h}; \quad \frac{d^2 x}{dt^2} \approx \frac{x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i}{h^2}; \quad \frac{dp}{dt} \approx \frac{p_{i+1} - p_i}{h}. \quad (6)$$

Замечание 1. Чем больше количество n точек разбиения отрезка, тем h ближе к 0, следовательно, аппроксимации производных точнее.

Подставим формулу (6) в систему:

$$m_{\delta p} \frac{x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i}{h^2} = \alpha p_i - F_c, \quad (7)$$

$$\alpha \frac{x_{i+1} - x_i}{h} = k\sqrt{|p_i - p_0|} + \beta \frac{p_{i+1} - p_i}{h}. \quad (8)$$

Преобразуем соотношение (7). Умножив его на h^2 и выделив старший член x_{i+2} , получим:

$$m_{\delta p} x_{i+2} = 2m_{\delta p} x_{i+1} - m_{\delta p} x_i + \alpha h^2 p_i - h^2 F_c. \quad (9)$$

Теперь преобразуем соотношение (8). Умножив его на h и перенеся слагаемое в левой части вправо, получим:

$$0 = -\alpha x_{i+1} + \beta p_{i+1} + \alpha x_i + kh\sqrt{|p_i - p_0|} - \beta p_i. \quad (10)$$

Дополнив соотношения (9), (10) недостающими слагаемыми с нулевыми коэффициентами, запишем эту систему в векторном виде:

$$Ay_{i+2} = By_{i+1} + F_i \quad (11)$$

с искомым вектором:

$$y_i = \begin{pmatrix} x_i \\ p_i \end{pmatrix}, \quad (12)$$

операторами:

$$A = \begin{pmatrix} m_{\delta p} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 2m_{\delta p} & 0 \\ -\alpha & \beta \end{pmatrix} \quad (13)$$

и вектором:

$$F_i = \begin{pmatrix} -m_{\delta p}x_i + \alpha h^2 p_i - h^2 R_c^x \\ \alpha x_i + kh\sqrt{|p_i - p_0|} - \beta p_i \end{pmatrix} \quad (14)$$

Дополнительно введём условие:

$$p'(0) = p_1. \quad (15)$$

Замечание 2. В постановке исходной задачи это условие не нужно: оно участвует в определении условия существования решения задачи для «восстановленной» системы (11).

Для соотношения (11) получим начальный вектор:

$$y_0 = \begin{pmatrix} x_0 \\ p_0 \end{pmatrix}, \quad y_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ p_1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

3.1. Об операторе $A = \begin{pmatrix} m_{\delta p} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$

Теорема 1. Оператор A линейный фредгольмов с нулевым индексом.

Доказательство. Линейность оператора очевидна. Докажем, что он фредгольмов с нулевым индексом (далее — фредгольмов). В соответствии с публикацией [13]

$$\text{er } A = \left\{ \begin{pmatrix} 0 \\ v_2 \end{pmatrix} \right\}, \quad \text{Coim } A = \left\{ \begin{pmatrix} v_1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\}, \quad \text{Im } A = \left\{ \begin{pmatrix} w_1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\}, \quad \text{Coker } A = \left\{ \begin{pmatrix} 0 \\ w_2 \end{pmatrix} \right\}. \quad (17)$$

$$Q = P = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Вычислим элементы $e \in \text{Ker } A$, $\varphi \in \text{Ker } A$:

$$e = \varphi = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Нетрудно видеть, что $\dim \text{Ker } A = \dim \text{Coker } A = 1$. Из решения уравнений $V_1 = V_2$, $W_1 = W_2$ с элементами $V_1 \in \text{Ker } A$, $V_2 \in \text{Coim } A$, $W_1 \in \text{Im } A$, $W_2 \in \text{Coker } A$ вытекает, что $\text{Ker } A \cap \text{Coim } A = \{0\}$, $\text{Im } A \cap \text{Coker } A = \{0\}$.

Между $\text{Coim } A$ и $\text{Im } A$ существует взаимно однозначное соответствие, что следует из уравнения $AV_2 = W_1$ и

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} m_{\delta p}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (20)$$

Всё это вместе и означает выполнение условий теоремы. Теорема доказана.

3.2. Регуляризация соотношения (11) при A, B, F_i — произвольные

Пусть A — линейный фредгольмов оператор, действующий из банахова пространства E_1 в банахово пространство E_2 . Рассматривается случай обладания им одномерным ядром. Скалярное произведение $\langle \cdot, \cdot \rangle$ в Сокег A вводится так, чтобы

$$\langle \varphi, \varphi \rangle = 1. \quad (21)$$

Лемма 1. В соответствии с данными работы [14] линейное уравнение

$$Av = w, \quad v \in E_1 \cap \text{dom } A, \quad w \in E_2 \quad (22)$$

равносильно системе

$$\begin{cases} v = A^{-1}w + c \cdot e & \text{для любых } c \in \mathbb{C} \\ \langle Qw, \varphi \rangle = 0 \end{cases}. \quad (23)$$

Для соотношения (11) используем метод декомпозиции, использованный в работе [8]. Это соотношение, как равенство вида, равносильно системе

$$y_{i+2} = A^{-1}By_{i+1} + A^{-1}F_i + c_i \cdot e \quad (24)$$

$$\langle QBy_{i+1}, \varphi \rangle + \langle QF_i, \varphi \rangle = 0, \quad (25)$$

где последовательность c_i надлежит вычислить.

Пусть выполнено следующее условие.

Условие 1. Выражение $\langle QF_i, \varphi \rangle$ определено при всех $i = 0, 1, \dots, n + 1$.

В равенстве (25) заменим i на $i + 1$:

$$\langle QBy_{i+2}, \varphi \rangle + \langle QF_{i+1}, \varphi \rangle = 0 \quad (26)$$

и вместо y_{i+2} подставим выражение (24):

$$\langle QBA^{-1}By_{i+1}, \varphi \rangle + \langle QBA^{-1}F_i, \varphi \rangle + c_i \langle QBe, \varphi \rangle + \langle QF_{i+1}, \varphi \rangle = 0. \quad (27)$$

Пусть выполнено следующее условие 2:

$$d \stackrel{\text{des}}{=} \langle QBe, \varphi \rangle \neq 0. \quad (28)$$

Тогда из выражения (27), выразив c_i и подставив в формулу (24), получим соотношение

$$y_{i+2} = Ky_{i+1} + \Phi_i \quad (29)$$

в обозначениях:

$$K(\cdot) = A^{-1}B(\cdot) - d^{-1} \langle QBA^{-1}B(\cdot), \varphi \rangle e, \quad (30)$$

$$\Phi_i = A^{-1}F_i - d^{-1}(\langle QBA^{-1}F_i, \varphi \rangle + \langle QF_{i+1}, \varphi \rangle)e. \quad (31)$$

Тем самым получено следующее утверждение.

Лемма 2. Пусть выполнены условия 1, 2. Тогда соотношение (11) равносильно выражению (29) и равенству (25).

Теперь рассмотрим задачу (11) с заданными с начальными значениями y_0, y_1 .

Из леммы 2 вытекает следующий результат.

Теорема 2. Пусть выполнены условия 1, 2. Тогда начальная задача для соотношения (11) имеет решение при выполнении условия

$$\langle QBy_1, \varphi \rangle + \langle QF_0, \varphi \rangle = 0. \quad (32)$$

Это условие вытекает из выражения (25) при $i = 0$.

3.3. Решение задачи (1), (2), (3)

Для решения задачи воспользуемся полученными выше результатами. Вычисления показывают следующее. Условия 1, 2 выполнены:

$$d = \langle QBe, \varphi \rangle = \left\langle \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -\alpha & \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\rangle = \beta \neq 0, \quad (33)$$

т. к. $V_0 \neq 0$. Далее:

$$Ky_{i+1} = \begin{pmatrix} 2x_{i+1} \\ \frac{2\alpha}{\beta}x_{i+1} \end{pmatrix} \quad (34)$$

$$\Phi_i =$$

$$= \begin{pmatrix} -x_i + m_{\delta p}^{-1} \cdot \alpha \cdot h^2 \cdot p_i - m_{\delta p}^{-1} \cdot h^2 \cdot R_c^x \\ -\frac{\alpha \cdot x_i}{\beta} + \frac{m_{\delta p}^{-1} \cdot \alpha^2 \cdot h^2 \cdot p_i}{\beta} - \frac{\alpha \cdot m_{\delta p}^{-1} \cdot h^2 \cdot R_c^x}{\beta} - \frac{\alpha \cdot x_{i+1}}{\beta} - \frac{k \cdot h \cdot \sqrt{|p_{i+1} - p_0|}}{\beta} + p_{i+1} \end{pmatrix} \quad (35)$$

Таким образом, регуляризованная система для выражения (11) после перестановки слагаемых во втором соотношении имеет вид:

$$x_{i+2} = 2 \cdot x_{i+1} - x_i + \frac{\alpha}{m_{\delta p}} \cdot h^2 \cdot p_i - \frac{1}{m_{\delta p}} \cdot h^2 \cdot Fc. \quad (36)$$

$$p_{i+2} = p_{i+1} - \frac{k \cdot h \cdot \sqrt{|p_{i+1} - p_0|}}{\beta} + \frac{\alpha^2}{m_{\delta p} \cdot \beta} \cdot h^2 \cdot p_i + \frac{\alpha}{\beta} \cdot (x_{i+1} - x_i) - \frac{\alpha}{m_{\delta p} \cdot \beta} \cdot h^2 \cdot R_c^x, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n-2, \quad (37)$$

где $\alpha = S$, $\beta = \frac{V_0}{E_{np}}$.

Вычислим значение p_1 из равенства (32):

$$p_1 = \frac{\alpha}{\beta} \cdot (x_1 - x_0) + p_0. \quad (38)$$

Решим отдельно линейное рекуррентное соотношение (36) относительно x_i , для чего докажем следующее утверждение.

Лемма 3. Решение x_i линейного рекуррентного соотношения

$$x_{i+2} = 2 \cdot x_{i+1} - x_i + g_i, \quad i = 0, 1, \dots, \quad (39)$$

где g_i — заданная последовательность, равно:

$$x_i = x_0 + (x_1 - x_0) \cdot i + \sum_{j=0}^{i-2} (i - j - 1) \cdot g_j, \quad i = 2, 3, \dots, n. \quad (40)$$

Лемма доказывается непосредственной подстановкой. Таким образом, решение соотношения (36) равно:

$$x_i = x_0 + (x_1 - x_0) \cdot i + \frac{h^2}{m_{\delta p}} \cdot \sum_{j=0}^{i-2} (i - j - 1) \cdot (\alpha \cdot p_j - Fc), \quad (41)$$

где $i = 2, 3, \dots, n$.

Таким образом, решение задачи (1), (2), (3) записывается в виде совокупности значений $x_i = x(t_i)$, $p_i = p(t_i)$ на отрезке $(0; t_{max})$ в точках $t_i = 0 + i \cdot h$ с шагом $h = \frac{t_{max} - 0}{n} = \frac{t_{max}}{n}$, где x_i определяются формулой (41), а p_i определяются из итерационного процесса (37), (38), где x_0, x_1, p_0 — начальные значения.

Для нахождения символьного вида данной системы можно воспользоваться программой wxMaxima. Предварительные теоретические графики зависимостей от времени давления рабочей жидкости и хода штока гидроцилиндра рекуперации энергии торможения представлены на рисунке 2. Приняты следующие исходные значения параметров энергосберегающего гидропривода p_0 — давление предварительной зарядки гидроаккумулятора, 5 МПа; V_0 — рабочий объём гидроаккумулятора, 0,005 м³; D — диаметр поршня гидроцилиндра, 0,1 м; $d_{шт}$ — диаметр штока гидроцилиндра, 0,04 м.

Решение системы уравнений позволяет получить зависимость положения поршня в гидроцилиндре рекуперации от времени $x(t)$, с учётом которой можно определить среднюю мощность рекуперации N_{Pcp} по формуле

$$N_{Pcp} = \frac{1}{t_{кэ}} \int_0^{t_{кэ}} N_P(t) dt = \frac{d_P}{t_{кэ}} \int_0^{t_{кэ}} \left(\frac{dx(t)}{dt} - v_a \right)^2 dt, \quad (42)$$

где $t_{кэ}$ — длительность компьютерного эксперимента, в течение которого усредняется рекуперированная мощность; $N_P(t)$ — мгновенная рекуперированная мощность; d_P — эффективный коэффициент демпфирования колебаний бесчокерного устройства.

Адекватность математической модели рабочих процессов энергосберегающего гидропривода подтверждена нами в процессе экспериментальных исследований на действующем лабораторном стенде бесчокерного захвата с подключением гидроаккумулятора [15]. В результате проведённых экспериментальных исследований получены осциллограммы зависимости давления рабочей жидкости от времени

и установлено, что система рекуперации энергии снижает всплески давления рабочей жидкости при переходных процессах в 1,4—1,7 раза и позволяет запастись мощностью в пределах 1,7—2,1 кВт.

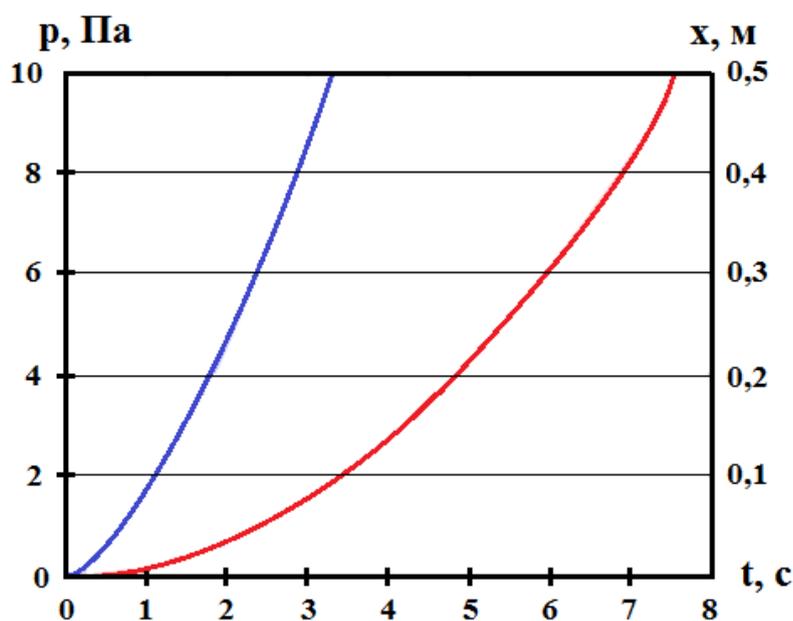


Рисунок 2. Теоретические графики зависимостей от времени давления рабочей жидкости ($p = f(t)$; синяя кривая) и хода штока гидроцилиндра рекуперации энергии торможения ($x = f(t)$; красная кривая)

Figure 2. Theoretical graphs of time dependences of the working fluid pressure (blue curve) and the stroke of the rod of the brake energy recovery hydraulic cylinder (red curve)

4. Обсуждение и заключение

1. Предложена новая конструктивно-технологическая схема бесчокерного трелёвочного захвата с энергосберегающим гидроприводом.

2. Разработана и решена математическая модель рабочих процессов бесчокерного трелёвочного захвата с энергосберегающим гидроприводом, рассмотрена задача Коши для нелинейной системы дифференциальных уравнений движения вышеуказанного захвата.

3. Получены теоретические временные зависимости давления рабочей жидкости и хода штока гидроцилиндра рекуперации, адекватность которых подтверждены результатами экспериментальных исследований на действующем лабораторном стенде бесчокерного захвата с энергосберегающим гидроприводом со следующими проектными параметрами: давление предварительной зарядки гидроаккумулятора 5 МПа; рабочий объём

гидроаккумулятора 0,005 м³; диаметр поршня гидроцилиндра 0,1 м; диаметр штока гидроцилиндра 0,04 м. Установлено, что система рекуперации энергии трелёвочного захвата снижает всплески давления рабочей жидкости при переходных процессах в 1,4—1,7 раза и позволяет запасать мощность в пределах 1,7—2,1 кВт.

Список литературы

1. Бухтояров Л. Д., Абрамов В. В., Просужих А. А., Рудов С. Е., Куницкая О. А., Григорьев И. В. Анализ конструкций и технологий работы форвардеров на лесозаготовках // *Resources and Technology*. 2020. Т. 17, № 3. С. 1—35. DOI: 10.15393/j2.art.2020.5283.
2. Попиков П. И., Посметьев В. И., Черных А. С., Канищев Д. А., Посметьев В. В. Обоснование выбора схемы и моделирование устройства для бесчokerной трелёвки леса с энергосберегающим гидроприводом // *Лесотехнический журнал*. 2016. Т. 6, № 4 (24). С. 216—224. DOI: 10.12737/23460.
3. Шегельман И. Р., Будник П. В., Баклагин В. Н. Оценка рейсовой нагрузки лесного трактора как важнейшего фактора проектирования и создания прогрессивных лесных машин // *Современные наукоёмкие технологии*. 2018. № 11. С. 78—83. DOI: 10.17513/snt.37241.
4. Янь Ш. Повышение эффективности деятельности лесопромышленных предприятий на территории Российской Федерации // *Системы. Методы. Технологии*. 2018. № 1 (37). С. 130—135. DOI: 10.18324/2077-5415-2018-1-130-135.
5. Шегельман И. Р., Будник П. В. Особенности оценки расчётной рейсовой нагрузки на antecedentной стадии проектирования бесчokerной трелёвочной системы на основе машинного эксперимента // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2019. № 3 (369). С. 82—96. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.3.82.
6. Orlovsky L. Time study analyses of skidding with cable-grapple skidder equus 175N // *Logging industry: problems and solutions: Материалы II Международной научно-технической конференции*. Минск, 2021. С. 137—142.
7. Platonov A. A. Modern state of technical means to remove uncontrolled vegetation // *Lesnoy Vestnik. Forestry Bulletin*. 2021. Vol. 25, No 1. P. 115—122. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-115-122.
8. Rybak A., Tsibiry I. Simulation of the pump-battery power supply control system based on the unloading machine // *E3S Web of Conferences. Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE-2019*. 2020. P. 01004. DOI: 10.1051/e3sconf/202016401004.
9. Посметьев В. И., Никонов В. О., Посметьев В. В. Компьютерное моделирование рекуперативного тягово-цепного устройства лесовозного автомобиля с прицепом // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2019. № 4 (370). С. 108—123. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.108.
10. Никонов В. О., Посметьев В. И., Яковлев К. А. Рекуперация гидравлической энергии в тягово-цепном устройстве лесовозного автомобиля с прицепом // *Лесотехнический журнал*. 2018. Т. 8, № 4 (32). С. 230—239. DOI: 10.12737/article_5c1a323b1d0433.96668845.
11. Никонов В. О., Посметьев В. И., Журавлев Р. В. Анализ конструктивных особенностей тягово-цепных устройств грузовых автомобилей с прицепами // *Воронежский научно-технический вестник*. 2018. Т. 4, № 4 (26). С. 13—24.

12. Патент на изобретение RU 2579776 С1, 10.04.2016. Устройство для бесчокерной трелёвки леса / Посметьев В. И., Попиков П. И., Зеликов В. А., Канищев Д. А., Посметьев В. В. Заявка № 2014147430/13 от 25.11.2014.
13. Зубова С. П., Усков В. И. Асимптотическое решение задачи Коши для уравнения первого порядка с малым параметром в банаховом пространстве. Регулярный случай // Математические заметки. 2018. Т. 103, № 3. С. 392—403. DOI: 10.4213/mzm11199.
14. Баев А. Д., Зубова С. П., Усков В. И. Решение задач для дескрипторных уравнений методом декомпозиции // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. 2013. № 2. С. 134—140.
15. Попиков П. И., Канищев Д. А., Сутолкин А. В. Результаты экспериментальных исследований рабочих процессов бесчокерного трелёвочного захвата с энергосберегающим гидроприводом // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2020. Т. 8, № 1 (48). С. 123—128. DOI: 10.34220/2308-8877-2020-8-1-123-128.

References

1. Bukhtoyarov L. D., Abramov V. V., Prosuzhikh A. A., Rudov S. E., Kunitskaya O. A., Grigoriev I. V. Analysis of structures and technologies of work of forwarders in logging. *Resources and Technology*, 2020, vol. 17, no 3, pp. 1—35. doi: 10.15393/j2.art.2020.5283. (In Russ.)
2. Popikov P. I., Posmetiev V. I., Chernykh A. S., Kanishchev D. A., Posmetiev V. V. Substantiation of the choice of scheme and modeling of a device for chokerless forest hauling with an energy-saving hydraulic drive. *Lesotechnical journal*, 2016, vol. 6, no 4 (24), pp. 216—224. doi: 10.12737/23460. (In Russ.)
3. Shegelman I. R., Budnik P. V., Baklagin V. N. Evaluation of the trip load of a forest tractor as the most important factor in the design and creation of progressive forest machines. *Modern science-intensive technologies*, 2018, no 11, pp. 78—83. doi: 10.17513/snt.37241. (In Russ.)
4. Yan Sh. Improving the efficiency of timber industry enterprises on the territory of the Russian Federation. *Systems. Methods. Technology*, 2018, no 1 (37), pp. 130—135. doi: 10.18324/2077-5415-2018-1-130-135. (In Russ.)
5. Shegelman I. R., Budnik P. V. Peculiarities of Estimating the Design Trip Load at the Antecedent Stage of Designing a Chokerless Skidding System Based on a Machine Experiment. *Forest journal*, 2019, no 3 (369), pp. 82—96. doi: 10.17238/issn0536-1036.2019.3.82. (In Russ.)
6. Orlovsky L. Time study analyzes of skidding with cable-grapple skidder equus 175N. *In the collection: Logging industry: problems and solutions. materials of the II International Scientific and Technical Conference*. Minsk, 2021, pp. 137—142. (In Russ.)
7. Platonov A. A. Modern state of technical means to remove uncontrolled vegetation. *Lesnoy Vestnik. Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no 1, pp. 115—122. doi: 10.18698/2542-1468-2021-1-115-122.
8. Rybak A., Tsibriy I. Simulation of the pump-battery power supply control system based on the unloading machine. *In the collection: E3S Web of Conferences. Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE-2019*, 2020, p. 01004. doi: 10.1051/e3sconf/202016401004.
9. Posmet'ev V. I., Nikonov V. O., Posmet'ev V. V. Computer simulation of a recuperative towing device for a logging vehicle with a trailer. *Forest journal*, 2019, no 4 (370), pp. 108—123. doi: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.108. (In Russ.)

10. Nikonov V. O., Posmetiev V. I., Yakovlev K. A. Recuperation of hydraulic energy in the towing device of a logging vehicle with a trailer. *Forestry journal*, 2018, vol. 8, no 4 (32), pp. 230—239. doi: 10.12737/article_5c1a323b1d0433.96668845. (In Russ.)
11. Nikonov V. O., Posmetiev V. I., Zhuravlev R. V. Analysis of design features of towing devices for trucks with trailers. *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*, 2018, vol. 4, no 4 (26), pp. 13—24 (In Russ.)
12. Posmetiev V. I., Popikov P. I., Zelikov V. A., Kanishchev D. A., Posmetiev V. V. *Device for chokerless skidding of the forest*. Patent for invention RU 2579776 C1, 10.04.2016. Application no 2014147430/13 dated 11/25/2014. (In Russ.)
13. Zubova S. P., Uskov V. I. Asymptotic solution of the Cauchy problem for a first-order equation with a small parameter in a Banach space. Regular case. *Mathematical notes*, 2018, vol. 103, no 3, pp. 392-403. doi: 10.4213/mzm11199. (In Russ.)
14. Baev A. D., Zubova S. P., Uskov V. I. Problem solving for descriptor equations by the decomposition method. *Bulletin of the Voronezh State University. Series: Physics. Maths*, 2013, no 2, pp. 134—140. (In Russ.)
15. Popikov P. I., Kanishchev D. A., Sutolkin A. V. The results of experimental studies of the working processes of a chokerless skidder with an energy-saving hydraulic drive. *Actual directions of scientific research of the 21st century: theory and practice*, 2020, vol. 8, no 1 (48), pp. 123—128. doi: 10.34220/2308-8877-2020-8-1-123-128. (In Russ.)