

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ БЕСЧОКЕРНОГО
ТРЕЛЕВОЧНОГО АГРЕГАТА С ГИДРОПРИВОДОМ
РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ**

Дерепаско И.В., Попиков П.И., Четверикова И.В.

*Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия*

**MODELING OF WORKING PROCESSES OF A CHOKERLESS SKIDDING
UNIT WITH A HYDRAULIC DRIVE FOR ENERGY RECOVERY**

Derepasko, I.V., Popikov P.I., Chetverikova I.V.

*Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia*

Аннотация: В статье проведен анализ исследований динамики гидропривода технологического оборудования лесотранспортных машин для бесчокерной трелевки леса. Определены методы математического моделирования динамики предлагаемого усовершенствованного гидропривода лесотранспортных машин. Разработана математическая модель движения трактора с агрегатом по лесосеке. Проведена проверка адекватности модели при помощи лабораторного стенда, результаты которой подтвердили теоретические исследования. Построены зависимости функций вертикального перемещения, угла наклона агрегата и давления жидкости в системе рекуперации на основании проведенных расчетов. Доказано, что использование представленной в работе кинематической и гидравлической схемы трелевочного агрегата энергосбережение может составить до 48 кДж за один цикл трелевки, что говорит о снижении энергозатрат на 10%, что говорит об актуальности исследования.

Abstract: The article analyzes the research on the dynamics of the hydraulic drive of technological equipment for forest transport machines for choker-free logging. The methods of mathematical modeling of the dynamics of the proposed improved hydraulic drive for forest transport machines are determined. A mathematical model of the movement of a tractor with an aggregate through a logging area is developed. The adequacy of the model is verified using a laboratory bench, and the results confirm the theoretical studies. Based on the calculations, the functions of vertical movement, the angle of inclination of the aggregate, and the fluid pressure in the recovery system are constructed. It has been proven that the use of the kinematic and hydraulic scheme of the skidding unit presented in the work can result in energy savings of up to 48 kJ per skidding cycle, which corresponds to a 10% reduction in energy consumption. This highlights the relevance of the research.

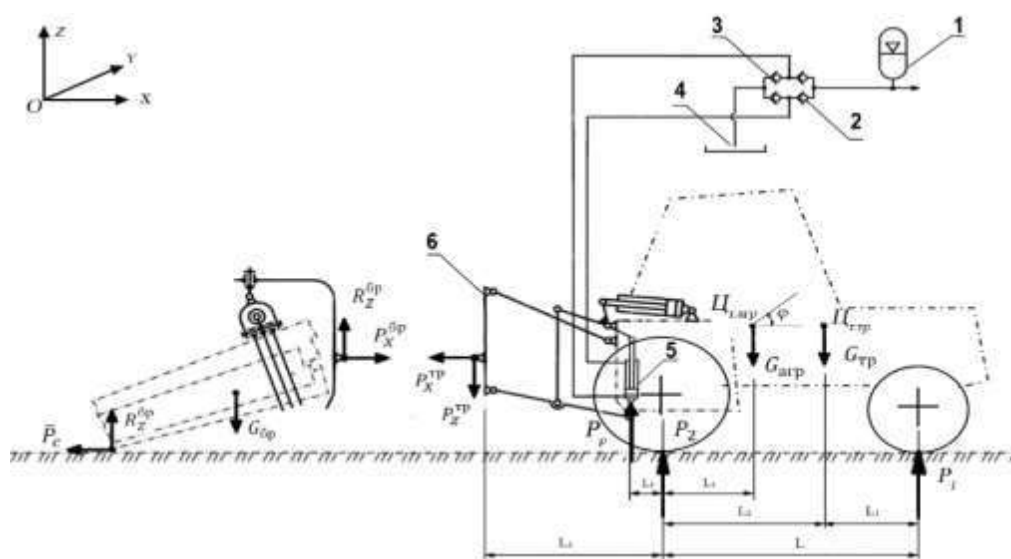
Ключевые слова: трелевочный захват, сортименты, моделирование, коэффициент податливости, гидроцилиндр рекуперации

Keywords: skidding gripper, sorting, modeling, compliance coefficient, hydraulic recovery cylinder.

Российская лесная промышленность активно внедряет механизацию лесозаготовок, повышая эффективность предприятий. С целью экономической эффективности особое внимание уделяется энергосбережению при трелевке леса. В России, наряду со специализированными машинами (харвестерами и форвардерами), широко используются трелевочные агрегаты на базе обычных тракторов. Последние более популярны среди небольших предприятий, поскольку использование специализированной техники для них экономически нецелесообразно. Их общим конструктивным недостатком является отсутствие возможности гасить колебания от перемещений по неровностям местности, аккумулировать энергию колебаний и направлять её на нужды гидропривода. Это стимулирует исследования по повышению энергоэффективности таких агрегатов.

Гидропривод – ключевой элемент лесозаготовительной техники, нуждающийся в модернизации для увеличения её эффективности. Следовательно, целью данного исследования является снижение гидравлических нагрузок и повышение энергоэффективности бесчокерного трелевочного агрегата путем изменения в его конструкции, а также обоснование параметров гидропривода с системой рекуперации энергии с помощью математического моделирования [1-3].

Объектом исследования является бесчокерный трелевочный захват ПТН-0,8, работающий в составе агрегата с трактором МТЗ-82. Была разработана кинематическая расчетная схема (рис. 1), которая позволит смоделировать и оптимизировать работу захвата с учетом параметров энергосберегающей гидросистемы, что в конечном итоге должно привести к повышению эффективности трелевочных работ. Разработка такой схемы предполагает учет особенностей конструкции захвата ПТН-0,8 и характеристик трактора МТЗ-82, а также принципов работы и параметров энергосберегающего гидропривода [4].



Конструктивное отличие от существующей системы заключается в применении дополнительного гидроцилиндра 5, связанного с гидроаккумулятором 1, через блок клапанов 2. Соответственно, физическая сущность применяемой конструкции заключается в том, что при движении агрегата по микронеровностям рельефа возникают колебания в вертикальной плоскости, которые вызывают перемещения поршня со штоком гидроцилиндра рекуперации 5, и рабочая жидкость поочередно вытесняется в гидроаккумулятор 1 через напорные обратные клапаны 2. Через всасывающие обратные клапаны 3 рабочая жидкость из гидробака 4 поступает в полости гидроцилиндра, в которых создается разрежение.

На основе расчетной модели (рис. 1) разработана математическая модель рабочего процесса бесчokerного трелевочного агрегата с гидроприводом рекуперации, она состоит из следующих дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_{\text{тр}} \ddot{Z} = P_1 + P_2 - G_{\text{агр}} - P_z + S \cdot p. \\ J_{\text{трз}} \ddot{\varphi} = P_1 (L_1 + L_2 - L_4) - P_2 \cdot L_4 + P_z (L_3 + L_4) - S \cdot p \cdot (L_5 + L_4) \\ S \frac{dz}{dt} = k \cdot \sqrt{p - p_0} + k_p \cdot \frac{dp}{dt} + a_y p \end{cases} \quad (1)$$

где: $m_{\text{тр}}$ – масса трелевочного агрегата, кг;

P_1 – реакция на переднем мосту, Н;

P_2 – реакция на заднем мосту трактора. Н;

P_z – вертикальная составляющая силы тяги, Н;

S – рабочая площадь поршня гидроцилиндра рекуперации энергии, м²;

p – давление жидкости в гидросистеме рекуперации, Па;

$J_{\text{трз}}$ – момент инерции трелевочного агрегата относительно центра масс агрегата, кгм²

$R_{\text{агр}}^z$ – вертикальная составляющая силы сопротивления волочению пакета бревен на агрегате, 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;

k_p – коэффициент податливости гибких элементов гидропривода можно определить по эмпирической зависимости, м⁵/(Н·с).

Полученная система дифференциальных уравнений является нелинейной, что исключает возможность получения точного аналитического решения. Допущения, принятые при составлении и решении математической модели: не учитывались горизонтальные колебания стрелы; не учитывалось возможные вращения трактор вокруг оси ОХ; неровности рельефа представлены в виде моментального увеличения значения сил реакции.

Начальные условия для решения системы (2):

$$\begin{aligned} Z(0) &= Z^0, \quad \frac{dZ}{dt}(0) = Z^1, \\ \varphi(0) &= \varphi^0, \\ p(0) &= p_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Подставив их в систему, выделив главные члены, и произведя математические действия, получим систему рекуррентных формул для нахождения искомых функций, на основании которых возможно проводить численный эксперимент:

$$Z_{i+2} = 2Z_{i+1} - Z_i + \sigma_1 h^2 \cdot p_i + \sigma_2 h^2, \quad (3)$$

$$\varphi_{i+1} = \varphi_i + \sigma_3 h \cdot p_i + \sigma_4 h, \quad (4)$$

$$p_{i+1} = (1 + \sigma_6 h) \cdot p_i + \sigma_5 h \sqrt{|p_i - p_0|} + \sigma_7 \cdot (Z_{i+1} - Z_i) \quad (5)$$

где $i=0,1,2,\dots$.

Начальные значения для них:

$$\begin{aligned} Z_0 &= Z^0, \quad Z_1 = Z^0 + hZ^1, \\ \varphi_0 &= \varphi^0, \\ p_0 &= p_0. \end{aligned} \quad (6)$$

Решить данную математическую модель можно путем построения циклического алгоритма в программном продукте Excel. Данная программа позволит построить зависимости функций 2, 3, 4 на основании проведенных расчетов.

Условиями проведения расчетов являются плотность пней на вырубке 200 шт./км, возможность возникновения до 60 столкновений трелюемой пачки сортиментов при среднем расстоянии трелевки 300 м при массе трелюемой пачки 600 кг и амплитуде колебаний агрегата 0,2 м.

Исходными данными для расчета принимаются геометрические и гидродинамические параметры трактора МТЗ-82 и ПНТ «Муравей». Расчетные графики зависимостей имеют вид (рис. 2, 3):

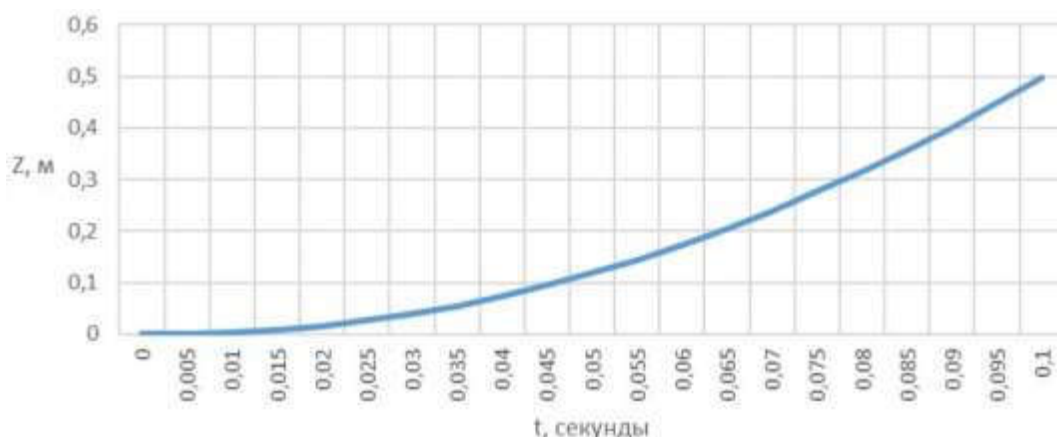


Рисунок 2 – Зависимость перемещения агрегата от времени $Z_i = Z(t_i)$

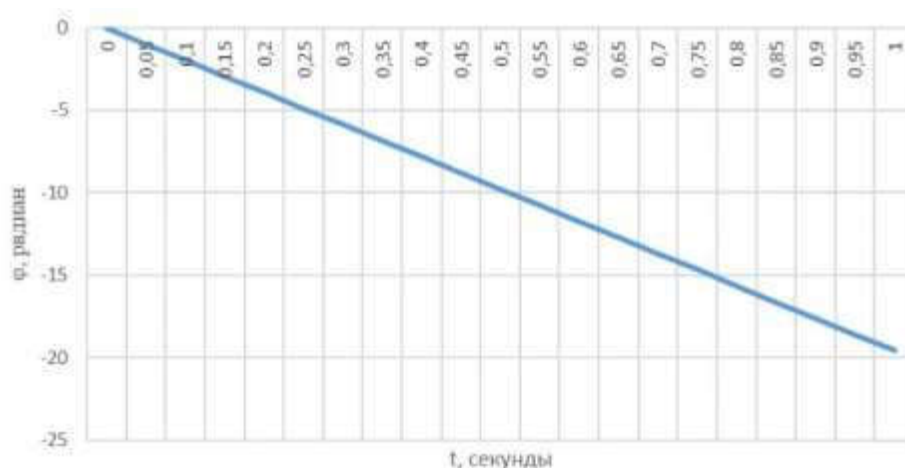


Рисунок 3 – Зависимость угла поворота строительной оси трактора от времени $\varphi_i = \varphi(t_i)$

При проведении расчетов с математической моделью было получено, что давление в системе при возникновении колебаний превышает давление гидроаккумулятора, что способствует его зарядке.

Сравнительный анализ работы трелёвочного агрегата по производительности до и после изменения его конструкции показал, что объем выпадаемой из захвата древесины за час работы МТЗ-82 + ПТН-0,8 составляет 0,933 м³. В результате реализации предложенных решений по совершенствованию его конструкции наблюдается рост часовой (с 3,47 м³ до 4,2 м³) и сменной производительности (с 22,27 м³ до 26,9 м³) при расстоянии трелёвки 270 м на уровне 17 %. Кроме этого, уменьшение объема выпадаемой древесины снижает количество рейсов трелевочного средства (от 1 до 2 рейсов). Также наблюдается снижение динамических нагрузок, увеличение усилия зажима сортиментов в захвате. Это приводит к уменьшению или полному исключению случаев выскакивания некоторых сортиментов из пачки в процессе трелёвки, а значит увеличению объема трелюемой пачки и уменьшению количества циклов работы трелёвочной техники на лесосеке, что в итоге повысит производительность работы с одновременным уменьшением затрат на процесс трелевки. Кроме этого, при плотности пней на вырубке 200 шт/км количество наездов трелюемой пачки сортиментов при среднем расстоянии трелевки 300 м достигает около 60 столкновений, а следовательно энергосбережение при массе трелюемой пачки 600 кг и амплитуде колебаний агрегата 0,2 м может составить 48 кДж за один цикл трелевки, т.е. произойдёт снижение энергозатрат на 10%. При возвращении накопленной энергии в гидросистему обеспечивается поджатие сортиментов в захвате и предупреждается потеря сортиментов из трелюемой пачки и самопроизвольное опускание навесной системы трактора вследствие утечек рабочей жидкости. Таким образом, при применении гидропривода рекуперации в трелевочном агрегате сокращаются энергетические и транспортные затраты на трелевку древесины, увеличивается производительность агрегата и снижается техногенное воздействие на лесную среду.

Список литературы

1. Юдин Р.В. Моделирование процессов в системе гидравлического привода лесозаготовительных машин / Р.В. Юдин, А.И. Максименков, А.А. Аксенов // Современный лесной комплекс страны: проблемы и тренды развития. – Воронеж: ВГЛУ, 2022. – С. 81-85. DOI 10.58168/MFCCPTD2022_81-85.
2. Рыбак А.Т. Моделирование работы механизма поворота колонны манипулятора автосортиментовоза с учетом объемной жесткости энергосберегающего гидропривода / А.Т. Рыбак, П.И. Попиков, Д.Ю. Дручинин // Лесотехнический журнал. – 2024. – № 2(54). – С. 280-294. DOI 10.34220/issn.2222-7962/2024.2/16.
3. Голякевич С.А. Математическая модель динамики манипуляторов комбинированного типа для многооперационных лесозаготовительных машин / С.А. Голякевич, Р.А. Карсюк, В.Н. Лой // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн. – Минск: БГТУ, 2024. – С. 14-18.
4. Дерепаско И.В. Математическая модель колебаний трелевочного агрегата с системой рекуперации в продольно-вертикальной плоскости / И.В. Дерепаско, И.В. Четверикова, А.В. Болгов // В сборнике: Современный лесной комплекс страны: инновационные разработки и исследования, материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж, 2024. С. 117-121.

References

1. Yudin R.V. Modeling of processes in the hydraulic drive system of logging machines / R.V. Yudin, A.I. Maksimenkov, A.A. Aksenov // The modern forest complex of the country: problems and development trends. – Voronezh: VGLTU, 2022. – pp. 81-85. DOI 10.58168/MFCCPTD2022_81-85.
2. Rybak A.T. Modeling of the operation of the rotation mechanism of the manipulator column of a timber truck taking into account the volumetric rigidity of the energy-saving hydraulic drive / A.T. Rybak, P.I. Popikov, D.Yu. Druchinin // Forestry journal. – 2024. – № 2 (54). – pp. DOI 10.34220/issn.2222-7962/2024.2/16.
3. Golyakevich S.A. Mathematical model of the dynamics of combined-type manipulators for multi-functional logging machines / S.A. Golyakevich, R.A. Karsyuk, V.N. Loy // Forest engineering, materials science and design. – Minsk: BSTU, 2024. – pp. 14-18.
4. Derepasko I.V. Mathematical model of oscillations of a skidding unit with a recuperation system in the longitudinal-vertical plane / I.V. Derepasko, I.V. Chetverikova, A.V. Bolgov // In the collection: Modern forest complex of the country: innovative developments and research, materials of the All-Russian scientific and practical conference. – Voronezh: 2024. – pp. 117-121.