

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА РЕКУПЕРАЦИИ
ЭНЕРГИИ В СЕДЕЛЬНО-СЦЕПНОМ УСТРОЙСТВЕ ЛЕСОВОЗНОГО ТЯГАЧА
С ПОЛУПРИЦЕПОМ**

Посметьев В. И., проф., д.т.н. Никонов В. О., доц., к.т.н.,

Посметьев В. В., доц., к.ф.-м.н., Авдюхин А. В., асп.

ФГБОУ ВО Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова

(Воронеж, Россия), e-mail: 8888nike8888@mail.ru

**MATHEMATICAL MODEL OF THE WORKING PROCESS OF ENERGY
RECOVERY IN THE SADDLE-CHAIN DEVICE OF THE FOREST TRUCK
WITH A SEMI-TRAILER**

Posmetev V. I., Prof., D. Sc., Nikonov V. O., Assoc. Prof., PhD,

Posmetev V. V., Assoc. Prof., PhD, Avdyuhin A. V., postgraduate

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Voronezh State University of
Forestry and Technologies named after G. F. Morozov"

(Voronezh, Russia)

Аннотация. Приведена математическая модель рабочего процесса рекуперации энергии в седельно-сцепном устройстве лесовозного тягача с полуприцепом. Для задания возмущающего действия опорной поверхности на корпуса лесовозного тягача и полуприцепа использована упрощенная упруго-вязкая модель колеса. Решение дифференциальных уравнений выполняется на каждом шаге интегрирования численным методом. Интенсивное относительное движение лесовозного тягача и полуприцепа в математической модели описано движением по опорной поверхности со случайными неровностями и движением по ровной горизонтальной поверхности с переменной скоростью. На каждом шаге численного интегрирования определяются мгновенные значения рекуперированной мощности и продольного ускорения полуприцепа с дальнейшим усреднением их значений.

Ключевые слова: Математическая модель; лесовозный тягач; полуприцеп; рекуперация; гидравлическая энергия; седельно-сцепное устройство; сортименты; дорожные условия; производительность; накопление энергии

Abstract. A mathematical model of the energy recovery workflow in a fifth wheel trailer truck with a semitrailer is given. To specify the disturbing action of the supporting surface on the bodies of the forest tractor and semitrailer, a simplified elastic-viscous model of the wheel was used. Differential equations are solved at each integration step by numerical method. The intensive relative motion of the forest tractor and semitrailer in the mathematical model is described by movement along a supporting surface with random irregularities and movement along a flat horizontal surface with variable speed. At each step of numerical integration, the instantaneous values of the recovered power and the longitudinal acceleration of the semi-trailer are determined with further averaging of their values.

Key words: Mathematical model; timber truck; semitrailer; recovery; hydraulic energy; fifth wheel coupling; assortments; road conditions; performance; energy storage

Введение. Транспортирование сортиментов занимает важное место в процессе лесозаготовок. Это обусловлено тем, что затраты на эту операцию во многих случаях превышают половину издержек на выполнение всех лесозаготовительных работ. Для транспортирования сортиментов с верхнего склада к потребителю используются преимущественно лесовозные автопоезда, состоящие из лесовозного тягача и полуприцепа. На эффективность транспортирования сортиментов лесовозными тягачами с полуприцепами оказывает влияние совокуп-

ность присущих им свойств, которые в определенной мере зависят от конструктивного совершенства их основных узлов и, в частности седельно-сцепных устройств.

Выполненный авторами анализ существующих конструкций седельно-сцепных устройств выявил, что почти все конструкции не предусматривают использование кинетической энергии связанными с частыми торможениями и разгонами от взаимодействия сил инерции полуприцепа и лесовозного тягача в процессе движения автопоезда по дорогам низкого качества с частыми подъемами, спусками и поворотами. Эту рассеиваемую энергию целесообразно использовать путем ее преобразования в потенциальную энергию рабочей жидкости, накапливаемую в пневмогидравлических аккумуляторах для последующего использования в технологическом гидравлическом оборудовании. Это позволит повысить эффективность работы лесовозного тягача с полуприцепом за счет значительно снижения расхода топлива и соответственно сокращения количества выбрасываемых в окружающую среду вредных веществ от выхлопных газов.

На основании этого, авторами были предложен ряд перспективных конструкций рекуперативных седельно-сцепных устройств для использования в лесовозных тягачах с полуприцепами. Работа этих устройств основана на аккумулировании и использовании кинетической энергии, возникающей от силы инерции масс полуприцепа и тягача при торможении, разгоне, поворотах, переключении передач и наезде на препятствия в процессе движения. Они позволяют накапливать и повторно использовать гидравлическую энергию в технологическом оборудовании, установленном на лесовозном тягаче с полуприцепом. Для оценки возможности и целесообразности применения одного из предлагаемых седельно-сцепных устройств с системой рекуперации гидравлической энергии, поставлена задача, разработать математическую модель движения лесовозного тягача с полуприцепом, оснащенным системой рекуперации энергии в седельно-сцепном устройстве [1-3].

Материалы и методы. Лесовозный тягач с полуприцепом описывается в математической модели двумя абсолютно твердыми телами, контактирующими с опорной поверхностью за счет упругого взаимодействия в десяти точках, а также выполняющими в трехмерном пространстве поступательное и вращательное движение (рисунок 1). Лесовозный тягач в точке A и полуприцеп в точке B соединены друг с другом рекуперативным седельно-сцепным устройством. Моменты инерции лесовозного тягача J_T и полуприцепа J_{Π} определяются для текущего момента времени на основании их масс m_T и m_{Π} относительно оси вращения тела. Описание расположения в пространстве лесовозного тягача с полуприцепом выполняется координатами их центров тяжести (x_T, y_T, z_T) , $(x_{\Pi}, y_{\Pi}, z_{\Pi})$, а также углами отклонения локальной системы координат тел $(\varphi_{xT}, \varphi_{yT}, \varphi_{zT})$, $(\varphi_{x\Pi}, \varphi_{y\Pi}, \varphi_{z\Pi})$ от базовой системы координат [4-10].

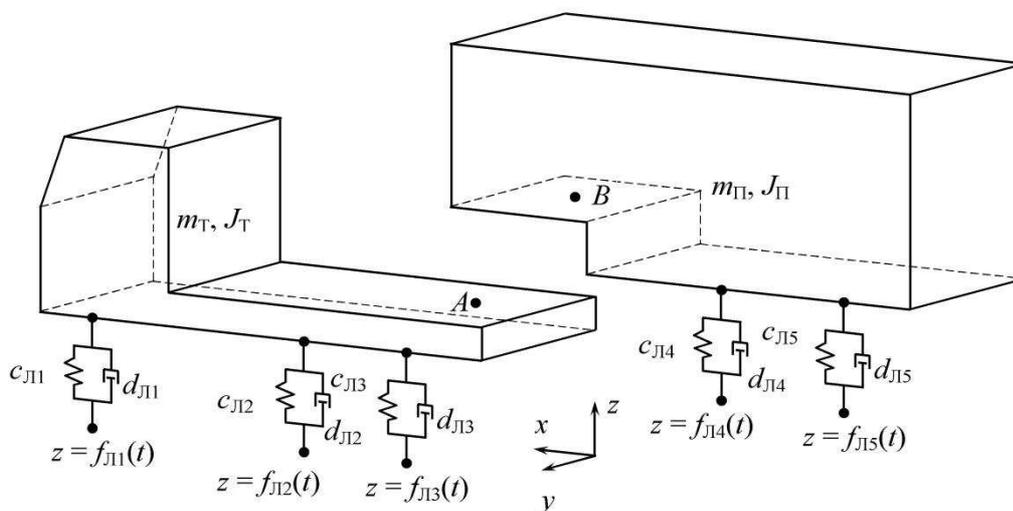


Рисунок 1 – Схема динамической модели лесовозного автопоезда

Движение лесовозного тягача с полуприцепом представлено в математической модели системой дифференциальных уравнений второго рода, составленных путем использования основных законов динамики поступательного и вращательного движения:

для лесовозного тягача: F

$$\left\{ \begin{array}{l} m_T \frac{\partial^2 x_T}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 F_{Лi}^x + \sum_{i=1}^3 F_{Пi}^x + F_{Ax} \\ m_T \frac{\partial^2 y_T}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 F_{Лi}^y + \sum_{i=1}^3 F_{Пi}^y + F_{Ay}; \\ m_T \frac{\partial^2 z_T}{\partial t^2} = -m_T \cdot g + \sum_{i=1}^3 F_{Лi}^z + \sum_{i=1}^3 F_{Пi}^z + F_{Az}; \\ J_{Tx} \frac{\partial^2 \phi_{xT}}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 M^x(F_{Лi}) + \sum_{i=1}^3 M^x(F_{Пi}) + M^x(F_A); \\ J_{Ty} \frac{\partial^2 \phi_{yT}}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 M^y(F_{Лi}) + \sum_{i=1}^3 M^y(F_{Пi}) + M^y(F_A); \\ J_{Tz} \frac{\partial^2 \phi_{zT}}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^3 M^z(F_{Лi}) + \sum_{i=1}^3 M^z(F_{Пi}) + M^z(F_A), \end{array} \right. \quad (1)$$

для полуприцепа:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{П} \frac{\partial^2 x_{П}}{\partial t^2} = \sum_{i=4}^5 F_{Лi}^x + \sum_{i=4}^5 F_{Пi}^x + F_{Bx} \\ m_{П} \frac{\partial^2 y_{П}}{\partial t^2} = \sum_{i=4}^5 F_{Лi}^y + \sum_{i=4}^5 F_{Пi}^y + F_{By}; \\ m_{П} \frac{\partial^2 z_{П}}{\partial t^2} = -m_{П} \cdot g + \sum_{i=4}^5 F_{Лi}^z + \sum_{i=4}^5 F_{Пi}^z + F_{Bz}; \\ J_{Пx} \frac{\partial^2 \phi_{xП}}{\partial t^2} = \sum_{i=4}^5 M^x(F_{Лi}) + \sum_{i=4}^5 M^x(F_{Пi}) + M^x(F_B); \\ J_{Пy} \frac{\partial^2 \phi_{yП}}{\partial t^2} = \sum_{i=4}^5 M^y(F_{Лi}) + \sum_{i=4}^5 M^y(F_{Пi}) + M^y(F_B); \\ J_{Пz} \frac{\partial^2 \phi_{zП}}{\partial t^2} = \sum_{i=4}^5 M^z(F_{Лi}) + \sum_{i=4}^5 M^z(F_{Пi}) + M^z(F_B), \end{array} \right. \quad (2)$$

где t – время; $F_{Лi}$ и $F_{Пi}$ – силы, действующие на раму лесовозного тягача или полуприцепа от колес i -й оси через элементы подвески левого (индекс "Л") и правого (индекс "П") бортов; F_{Ax} , F_{Ay} , F_{Az} – декартовы составляющие силы, действующей на лесовозный тягач со стороны седельно-цепного устройства; F_{Bx} , F_{By} , F_{Bz} – декартовы компоненты сил, действующих на полуприцеп со стороны седельно-цепного устройства; M^i – моменты указанных сил относительно оси i .

Для задания возмущающего действия опорной поверхности на рамы лесовозного тягача и полуприцепа использовали упрощенную упруго-вязкую модель колеса, упрощая систему «колесо-подвеска» до одной, более простой, системы, характеризующейся двумя коэффициентами: жесткости и демпфирования. Сила, воздействующая со стороны колеса на раму лесовозного тягача, определялась по формуле:

$$F_i^z = c_i (z_{\Pi i}(x_i, y_i) + R_K - z_{Ki}) - d_i \left(\frac{\partial z_{\Pi i}(x_i, y_i)}{\partial t} - \frac{\partial z_{Ki}}{\partial t} \right), \quad (3)$$

где i – индекс колеса; c_i, d_i – коэффициенты жесткости и демпфирования упруго-вязкого взаимодействия; $z_{\Pi i}(x, y)$ – вертикальная координата поверхности под колесом, равная координате нижней точки колеса; z_{Ki} – вертикальная координата точки крепления колеса к раме; R_K – радиус колеса.

Система уравнений движения лесовозного тягача и полуприцепа представляет собой систему дифференциальных уравнений второго порядка. Численное решение дифференциальных уравнений заключается в дискретизации времени t на равные шаги величиной Δt , которые нумеруются переменной τ . На каждом шаге интегрирования необходимо рассчитать силы и моменты, действующие на корпуса лесовозного тягача и полуприцепа. Далее, по известным координатам и скоростям движения тел для текущего шага интегрирования выполняется расчет координаты и скорости тел для следующего шага интегрирования. В частности, для декартовой компоненты x численное интегрирование уравнений движения определенного тела в рамках рассматриваемого метода производится по формуле:

$$\begin{cases} x_{\tau+1} = x_{\tau} + v_{x\tau} \cdot \Delta t + \frac{F_{x\tau}}{m} \cdot \frac{(\Delta t)^2}{2}; \\ v_{x\tau+1} = v_{x\tau} + \frac{F_{x\tau}}{m} \cdot \Delta t, \end{cases} \quad (4)$$

где x_{τ} и $v_{x\tau}$ – координата и скорость движения тела массой m вдоль декартового направления x на предыдущем шаге интегрирования по времени τ ; x_{τ} и $v_{x\tau}$ – то же, на последующем шаге интегрирования по времени $\tau + 1$. Аналогично, численное интегрирование выполняется для остальных декартовых компонентов y и z , при этом интегрирование выполняется для обоих тел: корпуса лесовозного тягача и корпуса полуприцепа.

В результате решения дифференциальных уравнений численным методом получают таблично заданные функции зависимости от времени координат и углов взаимной ориентации лесовозного тягача и полуприцепа. Эти функции анализируются далее для оценки эффективности системы рекуперации. Для воспроизведения работы системы рекуперации седельно-сцепного устройства необходимо в модели создать интенсивное относительное движение лесовозного тягача и полуприцепа. В разработанной модели это делается двумя способами: движением по опорной поверхности со случайными неровностями, движением по ровной горизонтальной поверхности с переменной скоростью. Случайные неровности в модели задаются исходя из реальных условий эксплуатации лесовозного тягача с полуприцепом. Значительная доля пути лесовозного тягача с полуприцепом приходится на подъездные асфальтированные дороги низкого качества, грунтовые лесовозные дороги, зимники. Для передачи в модели сложного случайного рельефа поверхности, считали, что возмущающая функция колес каждого борта состоит из набора выступов гауссовой формы. Высота и протяженность гауссовых пиков задаются случайным образом и изменяются в широких пределах: от «препятствий» (имитирующих камни, пни, выступающие корни и т.п.), имеющих малую протяженность (порядка 0,2–0,5 м), до «холмов», имеющих большую протяженность (порядка 2–5 м) (рисунок 2).



Рисунок 2 – Пример опорной поверхности для исследования нагрузок на седельно-сцепное устройство лесовозного тягача с полуприцепом: фрагменты функций $z(x)$ для колес левого (синяя линия) и правого (красная линия) бортов (длина фрагментов 20 м)

Опорная поверхность задавала функцию высоты поверхности от координат точки контакта $z(x, y)$, как суперпозицию гауссовских пиков с параметрами (x_i, y_i) (положение выступа), H_i (высота выступа) и σ_i (среднеквадратическое отклонение, задающее ширину выступа):

$$z(x) = \sum_{i=1}^{N_X} H_{X_i} \exp\left(-\frac{(x - x_{X_i})^2}{\sigma_{X_i}^2}\right) + \sum_{i=1}^{N_{\Pi}} H_{\Pi_i} \exp\left(-\frac{(x - x_{\Pi_i})^2}{\sigma_{\Pi_i}^2}\right), \quad (5)$$

где N_X и N_{Π} – количество холмов и препятствий; H_{X_i} и H_{Π_i} – высоты холмов и препятствий; x_{X_i} и x_{Π_i} – координаты расположения центра холмов и препятствий; σ_{X_i} и σ_{Π_i} – характерная полуширина холмов или препятствий.

Гауссовы пики распределялись по длине контрольного участка 500 м случайным образом по равномерному закону. При этом параметры H_i и σ_i также выбирались случайным образом по равномерному закону из интервалов: от 0 до 0,6 м для H_i и от 0,2 до 4,0 м для σ_i . Число гауссовых пиков, имитирующих холмы и препятствия, рассчитывалось в соответствии с таблицами параметров для различных типов дорожно-грунтовых условий.

Рассматриваемая система рекуперации преобразует неблагоприятные колебания расстояния между лесовозным тягачом и полуприцепом в месте соединения (седельно-сцепном устройстве) в полезную энергию, запасаемую пневмогидравлическим аккумулятором, и используемую далее, например, при работе гидравлического манипулятора. В одном из вариантов модель позволяет оценить среднюю величину рекуперированной мощности N_p без учета конструкции системы рекуперации и гидравлической подсистемы, лежащей в ее основе. В этом случае оценка N_p производится по величине рассеиваемой мощности в условном демпфере седельно-сцепного устройства: через коэффициент вязкого трения в приближении упруго-вязкого контакта точек A и B .

В процессе моделирования рассчитываются характеристики, которые позволяют определить как рекуперативный эффект, так и неблагоприятные последствия оснащения седельно-сцепного устройства системой рекуперации. В качестве основных показателей эффективности системы рекуперации выбраны рекуперированная мощность (мгновенная и средняя) и среднее ускорение полуприцепа (мгновенное и среднее). На каждом шаге численного интегрирования определялось мгновенное значение рекуперированной мощности N_p по изменению расстояния между точками A и B седельно-сцепного устройства в продольном направлении:

$$N_p(\tau) = d_0 \left(\frac{D_{24}}{D_{240}} \right)^2 \left(\frac{|x_A^\tau - x_A^{\tau-1}|}{\Delta t} - \frac{|x_B^\tau - x_B^{\tau-1}|}{\Delta t} \right)^2, \quad (6)$$

где d_0 – эффективный коэффициент демпфирования от рекуперативных гидроцилиндров; D_{240} – рабочий диаметр рекуперативных гидроцилиндров (в основных расчетах использовалось оптимальное его значение 50 мм); D_{24} – рабочий диаметр используемых рекуперативных гидроцилиндров; x_A и x_B – продольная координата точки седельно-сцепного устройства тягача и полуприцепа соответственно; индексы τ и $\tau-1$ обозначают текущий и предыдущий шаги интегрирования по времени дифференциальных уравнений движения.

Оснащение седельно-сцепного устройства системой рекуперации может ухудшить демпфирующие свойства седельно-сцепного устройства и привести к неблагоприятным колебаниям полуприцепа относительно лесовозного тягача. Поэтому в разработанной модели наряду с рекуперированной мощностью оценивается ускорение полуприцепа в продольном направлении. Мгновенное продольное ускорение полуприцепа на шаге интегрирования τ рассчитывалось по формуле:

$$a_{\Pi}(\tau) = \frac{x_{\Pi}^{\tau+1} + x_{\Pi}^{\tau-1} - 2x_{\Pi}^{\tau}}{(\Delta t)^2}, \quad (7)$$

где $x_{\Pi}^{\tau-1}$, x_{Π}^{τ} , $x_{\Pi}^{\tau+1}$ – координаты центра тяжести полуприцепа вдоль продольной декартовой оси OX в предыдущий $\tau-1$, текущий τ и последующий $\tau+1$ шаги интегрирования по времени дифференциальных уравнений.

После выполнения расчетов по функциям $N_p(t)$ и $a_{\Pi}(t)$ определялись два показателя N_{pc} и a_{pc} , усредненных по достаточно длительному временному интервалу:

$$N_{pc} = \frac{1}{\tau_k - \tau_n} \sum_{i=\tau_n}^{\tau_k} N_p(\tau), \quad (8)$$

$$a_{pc} = \frac{1}{\tau_k - \tau_n} \sum_{i=\tau_n}^{\tau_k} |a_{\Pi}(\tau)|, \quad (9)$$

где τ_n и τ_k – шаги интегрирования времени, в которые начинается и заканчивается усреднение.

В данном случае рассматриваемое усреднение производится не от начала компьютерного эксперимента, так как в первые моменты времени механическая система приходит в состояние равновесия и не до конца компьютерного эксперимента, так как в конце лесовозный тягач с полуприцепом может покинуть участок со случайным рельефом.

Результаты. Разработанная математическая модель рабочего процесса рекуперации энергии в седельно-сцепном устройстве лесовозного тягача с полуприцепом, позволяет оценить работоспособность системы рекуперации энергии с различными задаваемыми параметрами в изменяющихся условиях движения лесовозного тягача с полуприцепом. Также она позволяет выявить закономерности влияния основных конструктивных параметров седельно-сцепного устройства на показатели эффективности системы рекуперации гидравлической энергии, с целью определения их оптимальных значений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Посметьев, В. И. Перспективная конструкция рекуперативного седельно-сцепного устройства лесовозного тягача с полуприцепом / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев // Лесотехнический журнал. 2019. № 3. С. 180-192.
2. Никонов, В. О. Анализ конструктивных особенностей седельно-сцепных устройств тягачей с полуприцепами / В. О. Никонов, В. И. Посметьев, Т. Н. Фомин // Воронежский научно-технический вестник. 2019. Т. 1. № 1 (27). С. 20-32.
3. Посметьев, В. И. Перспективная конструкция рекуперативного пружинно-гидравлического седельно-сцепного устройства лесовозного тягача с полуприцепом / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, А. В. Авдюхин // Актуальные направления научных исследований XXI века : теория и практика, 2020 № 1(48). С. 299-305.
4. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем : учебное пособие – М. : Высш. шк., 1998. 319 с.
5. Посметьев, В. И. Результаты компьютерного моделирования рекуперативного тягово-сцепного устройства лесовозного автомобиля с прицепом / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев // Лесной журнал. 2019, № 4. С. 108-123.
6. Румшинский, Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента : справочное руководство / Л. З. Румшинский – М. : Наука, 1971. 192 с.
7. Грановский, В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях : учеб. пособие / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 288 с.
8. Расчет и проектирование строительных и дорожных машин на ЭВМ / Под ред. Е. Ю. Малиновского. – М. : Машиностроение, 1980. 216 с.
9. Инженерные расчеты на ЭВМ : Справочное пособие / Под ред. В. А. Троицкого. – Л. : Машиностроение, 1979. 288 с.
10. Дегтярев, Ю. И. Методы оптимизации : Учеб. пособие для вузов. – М. : Сов. радио, 1980. 272 с.