

DOI: 10.58168/PHBSc-IT2025_142-149

УДК УДК 630:62-91

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА СТРЕЛЫ ЛЕСНОГО ГИДРОМАНИПУЛЯТОРА С МАГНИТНЫМ ДЕМПФИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ

MATHEMATICAL MODEL OF THE BOOM LIFTING MECHANISM OF A FORESTRY
HYDROMANIPULATOR WITH A MAGNETIC DAMPING DEVICE

Полумиско А.А., аспирант, преподаватель
СПО, ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный лесотехнический
университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж,
Россия

Polumisko A.A., Postgraduate student, College
teacher, Voronezh State University of Forestry
and Technologies named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia

Евсиков И.Д., аспирант, ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный
лесотехнический университет им.
Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Evsikov I.D., Postgraduate student, Voronezh
State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Попиков В.П., кандидат технических наук,
доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный лесотехнический
университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж,
Россия

Popikov V.P., PhD in Technical Sciences,
Docent, Associate Professor, Voronezh State
University of Forestry and Technologies named
after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. Анализ научных и технических источников подтверждает, что проблема снижения динамических нагрузок и повышения надежности лесотранспортных машин остается актуальной для лесозаготовительной отрасли. В рамках исследования был предложен усовершенствованный грузоподъемный механизм гидроманипулятора, включающий в свою конструкцию магнитное демпфирующее устройство, предназначенное для уменьшения ударных нагрузок в процессе работы. Разработана математическая модель движения плунжера магнитного демпфера, позволяющая описать его динамику в системе гидропривода. Внедрение данной технологии способствует повышению надежности гидравлических систем лесных манипуляторов и снижению энергетических затрат, что делает эксплуатацию техники более эффективной.

Ключевые слова: магнитный демпфер; гидропривод; динамические нагрузки; гидроманипулятор; математическая модель.

Abstract. An analysis of scientific and technical sources confirms that the problem of reducing dynamic loads and increasing the reliability of forestry machines remains relevant for the logging industry. As part of the study, an improved lifting mechanism of a hydraulic manipulator was proposed, which includes a magnetic damping device in its design, designed to reduce impact loads during operation. A mathematical model of the movement of the magnetic damper plunger has been

developed, allowing us to describe its dynamics in the hydraulic drive system. The introduction of this technology helps to increase the reliability of hydraulic systems of forestry manipulators and reduce energy costs, which makes the operation of equipment more efficient.

Keywords: magnetic damper; hydraulic drive; dynamic loads; hydraulic manipulator; mathematical model.

Эффективность лесозаготовительных процессов во многом зависит от технического состояния и надежности оборудования, используемого при выполнении погрузочно-разгрузочных операций. Важной задачей является минимизация перегрузок в гидравлических системах, возникающих при резких изменениях режимов работы, что приводит к преждевременному износу узлов и снижению ресурса машин. Особенно актуальна эта проблема для манипуляторных механизмов, в конструкции которых предусмотрены гидроцилиндры, подверженные ударным нагрузкам при работе с древесиной.

Одним из методов повышения плавности работы грузоподъемных устройств является использование демпфирующих механизмов, способных компенсировать резкие изменения давления в системе. Перспективным решением в данной области является внедрение магнитных демпферов, обеспечивающих контролируемое гашение колебаний за счет взаимодействия магнитных полей. Подобные устройства могут не только снижать динамические нагрузки, но и уменьшать потребление энергии, особенно при манипуляциях с малогабаритными грузами. Нами предложен новый грузоподъемный механизм лесного манипулятора с магнитным демпфирующим устройством, защищенным патентом на полезную модель (рис. 1) [1].

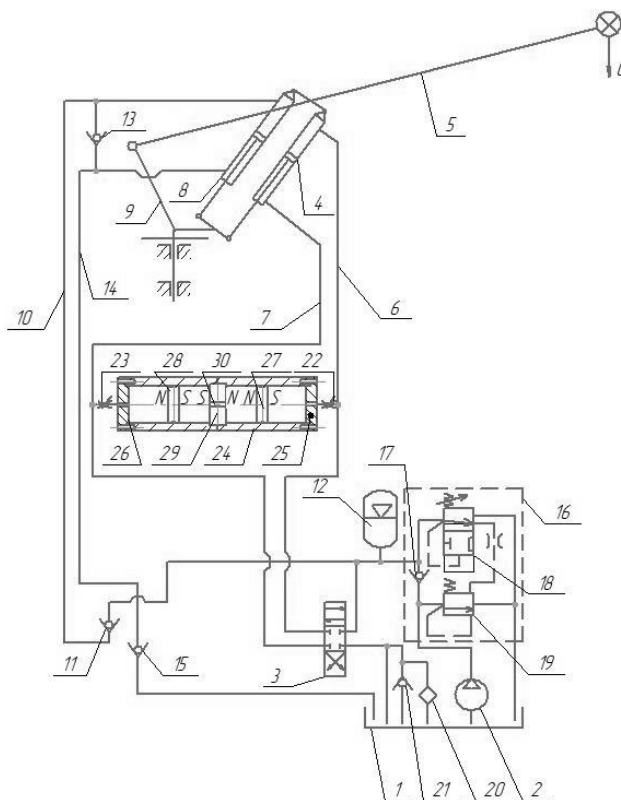


Рисунок 1 – Гидропривод механизма подъема стрелы лесного манипулятора с магнитным демпфирующим устройством

В данной работе представлена разработка математической модели магнитного демпфера, интегрируемого в гидропривод лесозаготовительных машин. Основное внимание уделяется принципу его действия, математическому описанию взаимодействующих сил и анализу влияния на рабочие характеристики манипулятора.

Составлена расчетная схема магнитного демпфирующего устройства гидропривода грузоподъемного механизма автосортиментовоза (рис. 2).

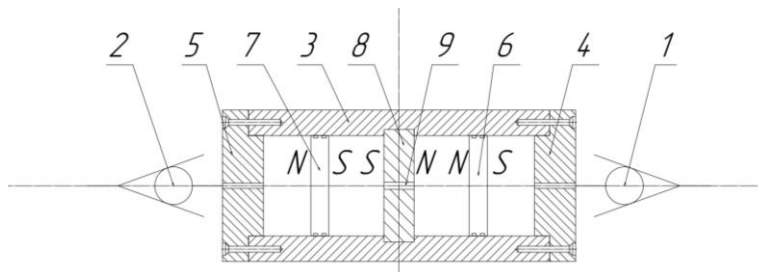


Рисунок 2 – Расчетная схема магнитного демпфирующего устройства в гидроприводе механизма подъема стрелы: 1, 2 – обратные клапаны; 3 – диэлектрический корпус; 4, 5 – диэлектрические крышки; 6, 7 – магнитные подвижные поршни; 8 – магнитная неподвижная перегородка; 9 – дроссельное отверстие.

Через обратные клапаны 1 и 2 подключено магнитное демпфирующее устройство 3, включающее корпус, крышки 4 и 5, подвижные поршни 6 и 7 и неподвижную перегородку 8, при этом корпус и крышки 4 и 5 магнитного демпфирующего устройства 3 выполнены из немагнитного материала, а его подвижные поршни 6 и 7 и неподвижная перегородка 8 – из магнитного материала, причем боковые стороны подвижных поршней 6 и 7 и неподвижной перегородки 8 обращены друг к другу одноименными полюсами *N* и *S* (рис. 1). В центре неподвижной перегородки 8 имеется дроссельное отверстие 9 для перетечки рабочей жидкости между полостями магнитного демпфирующего устройства 3.

Принцип работы нового демпфирующего устройства основан на описании процесса всплеска давления в гидролиниях [1]. В одной из них часть рабочей жидкости, равная объему деформации упругих элементов гидропривода, поступает через обратный клапан 1 в магнитное демпфирующее устройство 3, перемещая подвижный поршень 6 влево, при этом между одноименными полюсами *N* подвижного поршня 6 и неподвижной перегородки 8 возникает упругая отталкивающая сила, гасящая всплеск давления, и рабочая жидкость вытесняется через дроссельное отверстие 9 в полость между неподвижной перегородкой 8 и подвижным поршнем 7. При всплеске давления в противоположной гидролинии часть рабочей жидкости, равная объему деформации упругих элементов гидропривода, поступает через обратный клапан 2 в магнитное демпфирующее устройство 3, перемещая подвижный поршень 7 вправо, при этом между одноименными полюсами *S* подвижного поршня 7 и неподвижной перегородки 8 возникает упругая отталкивающая сила, гасящая всплеск давления, и рабочая жидкость вытесняется через дроссельное отверстие 9 в полость между неподвижной перегородкой 8 и подвижным поршнем 6.

Для рассмотрения процесса демпфирования используется математическая модель, включающая уравнения вращательного движения стрелы лесного манипулятора в процессе

подъема пачки сортиментов (1), расхода рабочей жидкости в гидроприводе механизма подъема стрелы (2), при этом зарядка гидроаккумулятора не происходит, и движения магнитного поршня внутри демпфера, выполненного из немагнитного материала, обеспечивающего минимальное влияние на магнитное поле (3).

Уравнение вращательного движения стрелы лесного манипулятора в процессе подъема пачки сортиментов представляет собой сумму уравнений моментов сил инерции масс подвижных элементов, движущей силы на штоке гидроцилиндра и сил тяжести звеньев манипулятора и груза относительно шарнирного соединения стрелы и поворотной колонны:

$$(J_{бр} + J_c) \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \frac{\pi d_c^2 b_1 \sin \beta}{4} p - (G_{бр} L + G_c l_n) \cos \varphi, \quad (1)$$

где φ – угол подъема стрелы, рад; $J_{бр}$ – момент инерции пачки бревен относительно точки О, кг·м²; J_c – момент инерции стрелы относительно точки О, кг·м²; d_c – внутренний диаметр гидроцилиндра стрелы, м; b_1 – расстояние от центра тяжести стрелы до точки подвеса груза, м; β – угол наклона гидроцилиндра, рад; p – текущее значение давления в гидросистеме, Па; $G_{бр}$ – сила тяжести пачки бревен в захвате, Н; G_c – сила тяжести стрелы, Н; L – вылет манипулятора, м; l_n – расстояние от точки О до центра масс стреловой группы, м.

Уравнение расхода рабочей жидкости в гидроприводе механизма подъема стрелы, включает в себя подачу насоса в левой части уравнения, расходы рабочей жидкости основного гидроцилиндра, магнитного демпфера, утечек через зазоры и деформации упругих элементов:

$$q_n n_n = \frac{\pi d_c^2 l \sin \beta}{4} \cdot \frac{d\varphi}{dt} + \mu A_{др} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} + a_y p + K_p \cdot \frac{dp}{dt} \quad (2)$$

где q_n – рабочий объем насоса, $\frac{м^3}{об}$; n_n – частота вращения насоса, $\frac{об}{с}$; l – длина стрелы манипулятора, м; β – внутренний угол между осью гидроцилиндра и стрелы, рад; φ – угол подъема стрелы, рад; $A_{др}$ – площадь отверстия дросселя, м²; μ – коэффициент расхода; Δp – перепад давления на дросселе, Па; ρ – плотность рабочей жидкости, $\frac{кг}{м^3}$; a_y – коэффициент утечек в гидросистеме, $\frac{м^3}{Па·с}$; K_p – коэффициент податливости упругих элементов гидропривода, $\frac{м^5}{Н}$.

Уравнение движения поршня в корпусе демпфера, представляет собой силу инерции поршня, в правой части уравнения. А в левой – движущую силу поршня под воздействием давления рабочей жидкости и отрицательные силы сопротивления от противодействия дросселя, силы взаимодействия между одноименными полюсами подвижного магнитного поршня и неподвижной перегородки, и силы вязкого трения при перемещении магнитного поршня:

$$m_d \frac{d^2 x_d}{dt^2} = p A_{п} - \frac{B_r^2 A}{2\mu_0} \left(\frac{1}{(x_d + L)^2} - \frac{1}{x_d^2} \right) - k_d \frac{dx_d}{dt} \quad (3)$$

где m_d – масса плунжера демпфера, кг; p – давление рабочей жидкости, Па; $A_{п} = \frac{\pi d_{п}^2}{4}$ – площадь поршня демпфера, м²; B_r – остаточная индукция магнита, Тл; A – площадь торца магнита, м²; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, $\frac{Гн}{м}$; x_d – текущее расстояние между

магнитами (ход поршня), м; L — длина магнита, м; k_d — коэффициент вязкого трения подвижного поршня демпфера, $\frac{\text{Н}\cdot\text{с}}{\text{м}}$.

Для составления дифференциального уравнения (3) используется теория приближённого метода оценки силы взаимодействия между двумя соосными цилиндрическими магнитами основывается на анализе их магнитного поля и магнитной энергии [2]. Основная идея заключается в том, что два магнита взаимодействуют за счёт градиента магнитного поля и стремятся уменьшить свою потенциальную энергию [3].

В вакууме плотность энергии магнитного поля определяется как:

$$\omega = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (4)$$

Цилиндрические магниты с поперечным сечением A обладают общей энергией магнитного поля (4) в некотором объёме V :

$$W = \frac{B^2}{2\mu_0} \cdot V, \text{ где } V = A \cdot l \quad (5)$$

Взаимодействие магнитов связано с изменением энергии системы в зависимости от расстояния между ними. Основной закон механики гласит, что сила связана с градиентом потенциальной энергии:

$$F = -\frac{dW}{dx} \quad (6)$$

Данная сила означает то, что, если магниты приближаются или удаляются друг от друга, их потенциальная энергия (5) изменяется, а возникающая сила пропорциональна скорости этого изменения [4]. Применительно к магнитному демпферу рассматривается случай двух цилиндрических магнита длиной L и диаметром D , расположенных соосно с расстоянием r между ними. Их взаимодействие можно описать через изменение энергии магнитного поля. Полная энергия взаимодействия будет определяться:

$$W = \frac{B_r A}{2\mu_0} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r+L} \right) \quad (7)$$

Найти силу (6) можно продифференцировав энергию W (7) по расстоянию r :

$$F = -\frac{dW}{dx} = \frac{d}{dx} \left\{ -\frac{B_r A}{2\mu_0} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r+L} \right) \right\} = \frac{B_r^2 A}{2\mu_0} \left(\frac{1}{(r+L)^2} - \frac{1}{r^2} \right) \quad (8)$$

Параметр r в формуле (8) обозначим как x_d так как расстояние между магнитами будет являться ходом магнитного плунжера. Данная формула представлена в соотношении (3), которое определяет силу отталкивания одноименных магнитов:

$$F = \frac{B_r^2 A}{2\mu_0} \left(\frac{1}{(x_d+L)^2} - \frac{1}{x_d^2} \right) \quad (9)$$

Уравнение (9) описывает силу отталкивания двух однополярных магнитов, размещенных друг против друга. Основой для этого выражения является закон взаимодействия магнитных полей [5] и их зависимость от расстояния между магнитами. Если x_d уменьшается, то $\frac{1}{x_d^2}$ растёт, разность в скобках увеличивается из-за чего сила возрастает. Если же x_d увеличивается, то $\frac{1}{x_d^2}$ уменьшается, и сила ослабевает. Таким образом, при сближении магнитов сила отталкивания резко увеличивается, что предотвращает полный контакт магнитов и обеспечивает демпфирующий эффект.

Применительно к гидравлическому демпферу лесного манипулятора, представленная формула описывает противодействие движению поршня, вызванное магнитным отталкиванием. Чем ближе поршень к неподвижному магниту, тем большее усилие требуется для его дальнейшего перемещения. Также это уравнение объясняет стабилизацию движения поршня: при падении давления жидкости, поршень под действием магнитной силы отходит назад, вытесняя жидкость в магистраль.

С применением среды программирования MATLAB были получены графики изменения угла поворота стрелы, давления и перемещения магнитного поршня демпфера от времени (рис. 3).

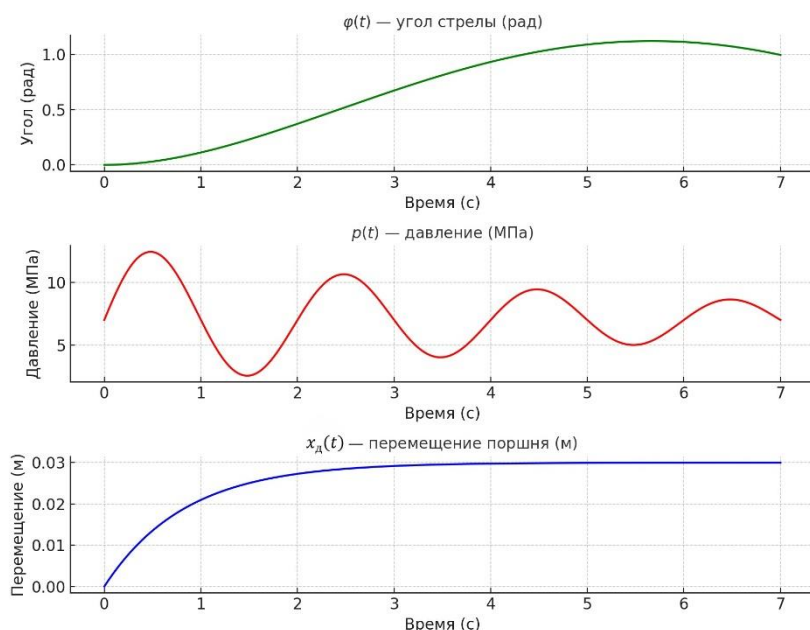


Рисунок 3 – График зависимости угла подъёма стрелы φ от времени t ; график зависимости давления в напорном трубопроводе p от времени t ; график зависимости хода плунжера демпфера x_d от времени t

На первом графике показано, как угол подъёма стрелы $\varphi(t)$ возрастает от 0 до примерно 1.3 радиан за 6–7 секунд, достигая пика и затем плавно снижается. Это поведение соответствует реальным условиям работы лесного манипулятора: подъём стрелы осуществляется под действием давления рабочей жидкости в гидроцилиндре, после чего начинается стабилизация под действием внешних и демпфирующих сил, включая сопротивление от магнитного демпфера.

Второй график отражает характер колебаний давления в гидросистеме. Амплитуда колебаний уменьшается с течением времени, что объясняется действием магнитного демпфера. Он создаёт отталкивающую силу между одноимёнными полюсами магнитов, которая эффективно гасит резкие всплески давления, перераспределяя энергию в системе и стабилизируя её работу.

На третьем графике показано, как перемещение магнитного поршня $x_d(t)$ увеличивается от 0 до 0.03 м (3 см), а затем выходит на установившийся уровень. Экспоненциальная форма кривой обусловлена работой магнитного демпфера: при резком

росте давления подвижный магнитный поршень сталкивается с увеличивающимся сопротивлением со стороны неподвижной магнитной перегородки с одноимённым полюсом. Это создаёт отталкивающую силу, предотвращающую дальнейшее движение и тем самым обеспечивает стабилизацию – ключевой эффект демпфирования.

Использование данной модели позволяет оптимизировать конструкцию магнитного демпфера, выбирая соответствующие параметры магнитов, оценивать динамику работы устройства и определять граничные условия для управления его работой, а также повышать эффективность демпфирования в гидравлических системах манипуляторов.

Работа выполнена при поддержке внутреннего гранта ВГЛТУ, выделенного в 2025 г. на проект «Выявление закономерностей режимов работы магнитного демпфирующего устройства гидропривода лесного манипулятора»; руководитель – преподаватель СПО, аспирант Полумиско А.А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент № 230802 U1 Российская Федерация, МПК В66С 13/42. Гидропривод механизма подъема стрелы лесного манипулятора с магнитным демпфирующим устройством: № 2024127518 : заявл. 18.09.2024 : опубл. 19.12.2024 / А.А. Сидоров, П.И. Попиков, Е.В. Поздняков, И.Д. Евсиков, А.А. Полумиско, П.А. Путятин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова".

2. Буряк, А.А. Исследование процесса самостабилизации вертикальных колебаний в системе электродинамической левитации / А.А. Буряк, В.А. Дзензерский, Э.А. Зельдина // Вестник Днепропетровского университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. – Днепропетровск, 2006. – С. 152–154.

3. Ячиков, И.М. Определение динамических параметров постоянного магнита при его удержании в импульсном магнитном поле / И.М. Ячиков, В.И. Ширяев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 111–122. – DOI: 10.14529/ctcr200312.

4. Саранин, В.А. Экспериментальное исследование движения магнитного диполя по проводящей поверхности / В.А. Саранин // Вестник Пермского университета. Физика. – 2017. – № 3 (37). – С. 48-53. – DOI: 10.17072/1994-3598-2017-3-48-53.

5. Исмагилов, Ф.Р. Электромагнитные процессы в электромеханических демпфирующих элементах / Ф.Р. Исмагилов, Р.Р. Саттаров // Электричество. – 2008. – №10. – С. 47–52.

REFERENCES

1. Patent No. 230802 U1 Russian Federation, IPC B66C 13/42. Hydraulic drive of the boom lifting mechanism of a forestry manipulator with a magnetic damping device: No. 2024127518: declared 18.09.2024: published 19.12.2024 / A.A. Sidorov, P.I. Popikov, E.V. Pozdnyakov, I.D. Evsikov, A.A. Polumisko, P.A. Putyatin; applicant Federal State Budgetary Educational

Institution of Higher Education "Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov".

2. Buryak, A.A. Study of the process of self-stabilization of vertical oscillations in the electrodynamic levitation system / A.A. Buryak, V.A. Dzenzersky, E.A. Zeldina // Bulletin of the Dnepropetrovsk University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. – Dnepropetrovsk, 2006. – P. 152-154.

3. Yachikov, I.M. Determination of dynamic parameters of a permanent magnet when it is held in a pulsed magnetic field / I.M. Yachikov, V.I. Shiryaev // Bulletin of SUSU. Series "Computer technologies, control, radio electronics". – 2020. – Vol. 20, No. 3. – P. 111-122. – DOI: 10.14529/ctcr200312.

4. Saranin, V.A. Experimental study of the motion of a magnetic dipole along a conducting surface / V.A. Saranin // Bulletin of Perm University. Physics. – 2017. – No. 3 (37). –P. 48-53. – DOI: 10.17072/1994-3598-2017-3-48-53.

5. Ismagilov, F.R. Electromagnetic processes in electromechanical damping elements / F.R. Ismagilov, R.R. Sattarov // Electricity. – 2008. – No. 10. – P. 47–52.