

EDN: GYGLJX

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-51-58



Научная статья

УДК 004.896



Нелинейное управление двухосевой платформой

Рихам Саад^{1,3},

инженер, аспирант, e-mail: rihamsaad126@gmail.com;

Авс Ахмад^{1,2},младший научный сотрудник, старший преподаватель,
e-mail: aws.ahmad318@gmail.com;Мохаммад Исса⁴,

магистрант, e-mail: engineer.93engineer@gmail.com;

Хани Халил^{1,3},

инженер, магистрант, e-mail: hani.khalil@yandex.com;

Игорь Геннадьевич Смирнов¹,доктор технических наук, доцент,
член-корреспондент Российской академии наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: rashn-smirnov@yandex.ru¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация;²Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Российская Федерация;³Московский государственный технологический университет Станкин, Москва, Российская Федерация;⁴Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что задачи повышения точности управления роботизированными платформами весьма актуальны, особенно при наличии механических нелинейностей. Одну из наиболее распространенных проблем представляет люфт, который приводит к отклонению платформы от прямолинейной траектории во время движения. Это негативно сказывается на общей стабильности и точности системы управления. (*Цель исследования*) Разработка системы управления двухосевой платформой с двумя степенями подвижности, которая эффективно учитывает и компенсирует влияние механического люфта. Для достижения этого была создана система, способная поддерживать стабильность движения платформы при минимизации последствий люфта. (*Материалы и методы*) В ходе исследований разработана математическая модель системы управления, в которой люфт представлен в виде гистерезиса. Были исследованы различные методы компенсации люфта. В качестве управляющих алгоритмов применены линейные контроллеры, такие как ПИД-регулятор и регулятор фазы сдвига, а также алгоритмы управления на основе нечеткой логики (*Fuzzy Logic Controller*). Модель системы и алгоритмы управления исследовались с помощью программного пакета *MATLAB* и библиотеки *Simulink*. (*Результаты и обсуждение*) Проведенное моделирование продемонстрировало, что разработанные методы управления эффективно компенсируют механический люфт, обеспечивая более стабильное и точное движение платформы. Этот результат подтвержден как в идеальных, так и в реальных условиях эксплуатации системы. (*Выводы*) Разработанная система управления позволяет существенно улучшить точность и устойчивость платформы, что открывает новые возможности для ее применения в различных робототехнических системах.

Ключевые слова: двухосевая платформа, люфт, трение, зубчатые колеса, нелинейное управление, алгоритмы управления на основе нечеткой логики.

■ **Для цитирования:** Саад Р., Ахмад А., Исса М., Халил Х., Смирнов И.Г. Нелинейное управление двухосевой платформой // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №3. С. 51-58. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-51-58. EDN: GYGLJX.

Scientific article

Nonlinear Control of Dual-Axis Platform

Riham Saad^{1,3},

Ph.D. student(Eng.), engineer,

e-mail: rihamsaad126@gmail.com;

Aws Ahmad^{1,2},

junior researcher, senior lecturer,

e-mail: engineer.93engineer@gmail.com;

Mohammad Issa⁴,

master's student;

Hani Khalil^{1,3},

engineer, master's student,

e-mail: hani.khalil@yandex.com;

Igor G. Smirnov¹,

Dr.Sc.(Eng.), associate professor,

corresponding member of the Russian Academy

of Sciences, chief researcher,

e-mail: rashn-smirnov@yandex.ru

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation;²Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation;³Moscow State Technological University STANKIN, Moscow, Russian Federation;⁴Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract. Improving control accuracy in robotic platforms remains a highly relevant challenge, particularly in the presence of mechanical nonlinearities. One of the most common issues is backlash, which causes deviations from a straight trajectory during motion, and adversely affects the overall stability and precision of the control system. (*Research purpose*) The objective of this study is to develop a control system for a dual-axis platform with two degrees of mobility that effectively recognizes and compensates for the mechanical backlash effects. To achieve this, a system was designed to ensure stable platform motion while minimizing the impact of backlash on trajectory accuracy. (*Materials and methods*) A mathematical model of the control system was developed, representing backlash as a hysteresis effect. Several backlash compensation methods were investigated. The implemented control algorithms included linear controllers such as the Proportional–Integral–Derivative (PID) controller and a phase-shift controller, as well as nonlinear algorithms based on fuzzy logic (Fuzzy Logic Controller). The system model and control algorithms were simulated using MATLAB and the Simulink library. (*Results and discussion*) Simulation results demonstrate that the proposed control methods effectively compensate for mechanical backlash, ensuring more stable and accurate platform motion. The effectiveness of these methods was confirmed under both idealized and real-world operating conditions. (*Conclusions*) The developed control system significantly improves platform accuracy and stability, broadening its applicability across a wide range of robotic applications.

Keywords: dual-axis platform, backlash, friction, gears, gear wheels, nonlinear control, fuzzy logic control algorithms.

■ **For citation:** Saad R., Ahmad A., Issa M., Khalil H., Smirnov I.G. Nonlinear control of dual-axis platform. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N3. 51-58 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-51-58. EDN: GYGLJX.

Двухосевые платформы находят широкое применение во многих промышленных системах: робототехнических установках, системах слежения, космических аппаратах, а также в сельскохозяйственных машинах, которые в последнее время претерпели значительное развитие [1]. В частности, это относится к сельскохозяйственным машинам и оборудованию, производимым во ФНАЦ ВИМ [2]. Эти области применения предъявляют высокие требования к точности механического проектирования.

Однако в реальных условиях невозможно избежать некоторых нелинейных явлений, в частности механического люфта. Люфт может возникать по целому ряду причин: ошибки в конструкции механических узлов, воздействие высоких нагрузок, а также износ зубчатых передач [3, 4], все это приводит к образованию зазоров между зубчатыми элементами, известных как механический люфт.

Современные роботизированные устройства, применяемые в сельском хозяйстве, такие как роботы для сбора урожая [5] и специализированные роботы для сбора яблок [6], требуют высокой точности как в перемещении, так и в системе управления. Это, в свою очередь, требует внедрения методов компенсации люфта для обеспечения стабильной и надежной работы.

Цель исследования. Разработка системы управления двухосевой платформой с двумя степенями подвижности, которая эффективно учитывает и компенсирует влияние механического люфта.

Материалы и методы. Люфты, возникающие между зубчатыми колесами и другими системами трансмиссии, считаются наиболее опасным нелинейным явлением, поскольку иногда это приводит к потере передаваемого движения [7, 8]. Теорети-

чески величина люфта должна быть равна нулю, что, однако, на практике не достигается. Зазор между зубьями необходим для защиты зубчатых колес от давления и деформации, но превышение значения этого зазора до критического приводит к нежелательным последствиям и возникновению нелинейностей в системе. Как правило, люфт влияет на производительность систем, особенно когда требуется высокая точность в случае управления положением и скоростью (Khalil H.K. Nonlinear Control. 2015. Pearson). Появление нелинейностей в системе приводит к задержке времени отклика и нестабильным предельным циклам [9].

Компенсация люфта составляет серьезную задачу для многих систем. Предложены различные решения, в которых реализованы механические подходы [10, 11] и методы контроля [12]. В данном исследовании представлена разработка и реализация алгоритма линейного и нелинейного управления двухосевой платформой с нагрузкой до 50 кг.

Платформа состоит из двух механических частей. Первая часть может вращаться вокруг вертикальной оси (ось направления) под углом, называемым азимутальным, или углом направления, от 0 до 180°. На этой оси закреплен абсолютный энкодер. Ось направления, в свою очередь, содержит вращающуюся деталь, которая может перемещаться вокруг горизонтальной оси (ось возвышения) под углом, называемым углом возвышения, в пределах углового сектора от –10 до 90°, также на этой оси закреплен абсолютный энкодер.

Оси платформы независимы, управление может осуществляться в ручном либо автоматическом режиме. Зубчатые колеса передают момент осям высоты и направления с помощью редукторов с передаточным отношением Ne и Nd. Платформа приво-

дится в движение с помощью двигателей постоянного тока, на оси каждого закреплен инкрементный энкодер.

Механический люфт. Зубчатое колесо, непосредственно соединенное с двигателем, называется ведущим, а непосредственно соединенное с нагрузкой – ведомым. Ведущее зубчатое колесо передает движение на ведомое. Длина зазора между ведомым колесом и ведущим кодируется в формате 2D. Когда происходит контакт между противоположными поверхностями зубчатых колес, движение передается точно между поверхностями зубчатых колес.

Модель обратной связи. В случае, когда зубчатые колеса не контактируют, передача движения происходит с задержкой. Следовательно, крутящий момент равен нулю. За пределами этого случая крутящий момент линеен. Люфт моделируется с запаздыванием. Зазор моделируется как гистерезис между входом (положение ведущего зубчатого колеса) и выходом (положение ведомого колеса). В общем случае механический люфт асимметричен, т.е. мертвая зона передаваемого крутящего момента асимметрична.

Возможные причины механического люфта показаны на *рисунке 1*.

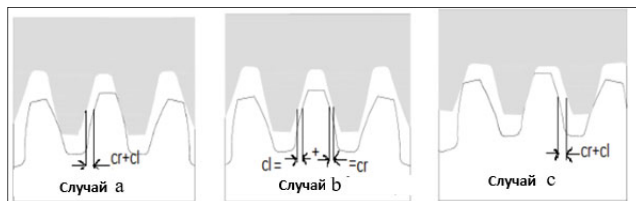


Рис. 1. Причины механического люфта: cr – отклонение профиля ведущего колеса; cl – отклонение профиля ведомого колеса

Fig. 1. Causes of mechanical backlash: cr – deviation in the profile of the driving gear; cl – deviation in the profile of the driven gear

Отклонения обоих колес направлены в одну сторону, т.е. происходит их сложение ($cr + cl$). Результатом становится значительный люфт между зубьями из-за усиленного суммарного отклонения (*рис. 1, а*). Отклонения имеют противоположное направление: $cl = -cr$. Они взаимно компенсируют друг друга, в результате чего люфт практически отсутствует.

В некоторых случаях возможно даже плотное прилегание зубьев без зазора (*рис. 1, б*). По направлению отклонений ($cr + cl$) это аналогично случаю а, но отличается их распределением или положением. Это также приводит к появлению люфта, однако его форма и распределение могут быть иными (*рис. 1, в*).

Математическое описание люфта. Функцию, описывающую механический люфт, в нелинейной

теории управления (Khalil H.K. Nonlinear Control. 2015. Pearson) используют для анализа амплитуды (a) и частоты колебаний (ω). Это зависит от нахождения функции преобразования между входом (обычно синусоидальным сигналом) и первой гармоникой входного сигнала на выходе (люфт).

Для моделирования механического люфта в данной работе используется аппроксимация в виде гистерезисной петли с наклоном, как это принято в [6]. Такой подход позволяет адекватно отразить поведение системы при изменении направления движения, моделируя как симметричный, так и асимметричный люфт.

Функция люфта задается следующим уравнением:

$$N(a) = \frac{1}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin \arcsin \left(1 - \frac{2D}{a} \right) + \left(1 - \frac{2D}{a} \right) \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2D}{a} \right)^2} \right] - j \frac{4D}{\pi} \left[1 - \frac{D}{a} \right]. \quad (1)$$

На *рисунке 2* показано, как люфт влияет на выходной сигнал в ответ на синусоидальный вход, в соответствии с вышеуказанным выражением.

Основная идея заключается в достижении контура управления, показанного на *рисунке 2*.

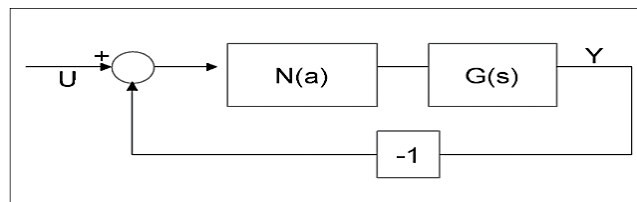


Рис. 2. Контур управления

Fig. 2. Control loop

Условием появления колебаний в системе является выполнение следующего равенства:

$$G(s) = -\frac{1}{N(a)_d},$$

где $G(s)$ – передаточная функция разомкнутой системы; $N(a)$ – описательная функция, моделирующая влияние нелинейности.

Исследование основано на построении диаграммы Найквиста для функций $G(s)$ и $1/N(a)$, а также на определении точек их пересечения. Эти точки указывают на возможность возникновения автоколебаний, которые могут привести к потере устойчивости системы. Для устранения таких колебаний и обеспечения устойчивости рекомендуется использовать специальные алгоритмы управления, направленные на исключение точек пересечения между $G(s)$ и $1/N(a)$ как указано в источнике [9].

Метод компенсации люфта. Компенсацию люфта осуществляют либо механическими методами [13, 14], либо методами контроля [15, 16].

Механические методы зависят от точности механической конструкции, использования опреде-

ленных типов зубчатых колес и материалов. Методы управления заключаются в разработке и реализации алгоритмов управления с целью минимизации эффекта люфта.

Методы контроля – основная часть данного научного исследования. Один из предлагаемых методов – гибридное управление, которое играет важную роль в таких механических системах, поскольку оно обеспечивает возможность применения более одного метода управления вокруг конкретной рабочей точки.

В соответствии с целевым применением, такие методы сводят к минимуму влияние люфта с помощью двух подходов управления:

- *действия внутри зоны люфта.* Этот подход основан на стремлении сократить время, в течение которого система находится в пределах люфта, насколько это возможно;

- *слабое управление в пределах люфта.* Предполагает использование двух контроллеров, где первый обеспечивает устойчивость системы в зоне люфта, а второй – отвечает за достижение требуемой производительности системы после выхода из зоны люфта.

Методы управления включают в себя два способа: применение линейного или нелинейного регулятора или достижение обратного люфта.

Линейный контроллер применяется для минимизации эффекта люфта. В этом случае исследование будет проводиться путем применения линейных регуляторов после добавления модели люфта в систему, а затем работы над тем, чтобы система как можно быстрее пересекла зону люфта, с контролем величины люфта в каждый момент времени и подачей сигнала пропорционально этому значению.

Обратный люфт эффективен, если люфт находится на «системном входе». Этот способ основан на смещении входного сигнала на максимальную величину люфта $2D$, когда выходной сигнал меняет направление движения.

Обратный люфт достигается применением линейного и нелинейного контроллера в качестве адаптивного управления с использованием нечеткой логики [11].

Моделирование системы

Ось направления передачи в идеальном случае. Исходя из уравнений двигателя постоянного тока, механических показателей вала, показателей двигателя, передаточного числа редуктора и с учетом технических характеристик, можно составить передаточную функцию. Передаточную функцию положения оси направления в идеальном случае можно описать уравнением:

$$\frac{\theta_d}{U(P)} = \frac{\frac{k_i}{k_i \cdot k_v + f_{total-d} \cdot R}}{N_d \left(1 + \frac{L}{R} P\right) \left(1 + \frac{R \cdot J_{total-d}}{k_i \cdot k_v + f_{total-d} \cdot R} P\right)} = \quad (2)$$

$$= \frac{k}{N_d(1 + \tau_{ed}P)(1 + \tau_{md}P)P} =$$

$$= \frac{3.85}{(1 + 0.0171P)P} \text{ rad.volt}^{-1}, \text{ рад/В.}$$

Функция передачи положения оси оценки в идеальном случае. Поскольку ось оценки имеет тот же механизм движения, что и ось направления, функцию передачи положения оси оценки в идеальном случае можно описать уравнением:

$$\frac{\theta_e}{U(P)} = \frac{k}{N_e(1 + \tau_{ed}P)(1 + \tau_{md}P)P} =$$

$$= \frac{0,06801}{(1 + 0,015P)P} \text{ rad.volt}^{-1}, \text{ рад/В.} \quad (3)$$

Нелинейная модель платформы с двумя осями. На рисунке 3 показаны двигатель и нагрузка, а также проиллюстрированы инерционные моменты и влияние крутящих моментов [4].

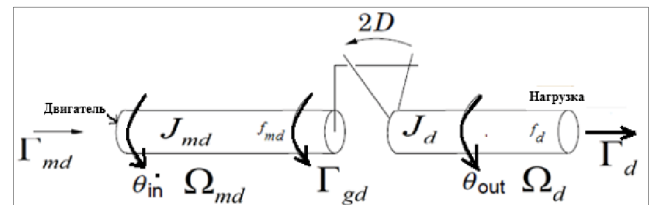


Рис. 3. Влияние крутящих моментов двигателя и нагрузки
Fig. 3. Influence of motor torques and load

При этом

$$J_{md}\dot{\Omega}_{md} = f_{md}\Omega_{md} - \Gamma_{gd} + \Gamma_{md}, J_d\dot{\Omega}_d =$$

$$= -f_d\Omega_{md} - \Gamma_{gd} + \Gamma_d$$

$$\Omega = \Omega_{md} - \Omega_d, \Omega_d = \dot{\theta}_{out}, \Omega_{md} = \dot{\theta}_{in}$$

$$\Gamma_{gd} = m(\theta_{out} - \theta_{in}) \text{ (при контакте)}, \Gamma_{gd} = 0 \text{ (люфт).}$$

Вектор положения $x = [\theta_{out}, \theta_{in}, \Omega_d, \Omega_{md}]^T$, следовательно, можно найти матрицы положения:

$$\dot{x} = Ax + Bu + H\Gamma_g : u = \Gamma_{md} = cx = \theta_{out}.$$

В случае передачи движения

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{m}{J_d} & -\frac{m}{J_d} & 0 & -\frac{f_d}{J_d} \\ -\frac{m}{J_{md}} & \frac{m}{J_{md}} & 0 & -\frac{f_{md}}{J_{md}} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J_{md}} \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J_d} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0], D = 0.$$

В случае образования зазора:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{f_d}{J_d} & \frac{f_{md}}{J_{md}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J_{md}} \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J_d} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0], D = 0.$$

Алгоритмы управления

Управление положением системы с высокой точностью и максимально быстрым откликом требует исследования и анализа скорости в системе без обратной связи и отклика положения замкнутой системы в идеальном случае и с учетом нелинейностей, влияющих на работу системы. После анализа характеристик системы можно выбрать регуляторы для достижения требуемых управляющих характеристик. Функция передачи скорости для оси направления задается уравнением:

$$\frac{\Omega_d}{u} = \frac{3.85}{1 + 0.0171p}. \quad (4)$$

Период выборки. Частота дискретизации должна быть больше частоты среза передаточной функции системы примерно в 6-24 раза. Для системы первого порядка период выборки должен удовлетворять условию:

$$\tau/4 \leq T_s \leq \tau,$$

где τ – желаемое время отклика системы.

PID-регулятор. Для выбора соответствующего алгоритма управления необходимо провести анализ влияния каждого регулятора на систему с учетом и без учета нелинейностей. Разностное уравнение ПИД-регулятора задается выражением:

$$C(Z) = K_p + K_i T_s \frac{Z}{Z-1} + \frac{K_d}{T_s} \frac{Z-1}{Z}. \quad (5)$$

где K_p – пропорциональный коэффициент, способствующий уменьшению времени отклика системы; K_i – интегральный коэффициент, который устраняет статическую ошибку; K_d – дифференциальный коэффициент, играющий важную роль в улучшении временной характеристики системы и повышении стабильности за счет уменьшения перерегулирования в переходном процессе. Результаты применения ПИД-регулятора к линейной и нелинейной моделям представлены в [таблице 1](#).

Регулятор сдвига фазы. Передаточная функция регулятора фазы сдвига:

$$C(s) = K \frac{1 + T_1 s}{1 + T_2 s}. \quad (6)$$

Предполагая, что T_s является периодом дискретизации, разностное уравнение регулятора фазы сдвига задается выражением:

$$C(Z) = \frac{K}{T_2} \left[\left(1 - \frac{T_1}{C} \right) \left(\frac{1}{1 - e^{\frac{T_s}{T_2}} Z^{-1}} \right) + T_1 \right]. \quad (7)$$

Для ступенчатого входного сигнала была проанализирована временная характеристика оси направления положения при добавлении регулятора сдвига фазы как к идеальной (линейной), так и к неидеальной (нелинейной) модели. Значения коэффициентов были подобраны с целью устранения нежелательных скачков системы, обеспечения устойчивого отклика и минимизации перерегулирования. Результаты представлены в [таблице 2](#).

Регулятор сдвига фазы улучшает производительность системы лучше, чем традиционный ПИД-регулятор, особенно когда в модель системы добавляются нелинейности.

Нелинейный алгоритм. Механический люфт возникает в системах, где нагрузка не находится в прямом контакте с приводом. Затруднение управления возникает в случае реверсивного движения, которое может быть вызвано одной из следующих причин:

- нарушение нагрузки;
- контроль положения;
- изменение направления движения пользователем.

Во всех названных случаях груз становится неуправляемым (его движение неконтролируемое за счет действия момента инерции). При этом в системе возникают осцилляции в результате соударения между соприкасающимися поверхностями (в том случае, если механизм передачи осуществляется через механические детали, например, зубчатые колеса). Следовательно, закон управления должен быть рассчитан на максимально быстрое прохождение зоны люфта и максимальное снижение влияния этих столкновений [12].

На [рисунке 4](#) показано, что нелинейный контур управления добавлен в систему.

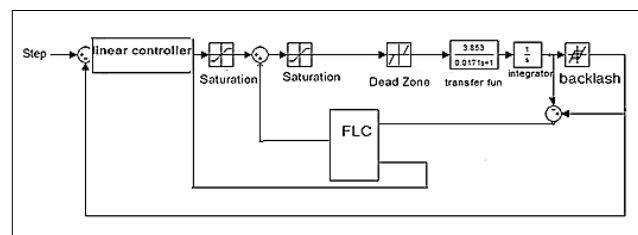


Рис. 4. Система управления с нечеткой логикой
Fig. 4. Control system with fuzzy logic

Таблица 1		Table 1	
РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПИД-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ЛИНЕЙНОЙ И НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМ RESULTS OF PROPORTIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVE (PID) CONTROLLER APPLICATION TO LINEAR AND NONLINEAR SYSTEMS			
Ось направления	Время отклика, мс	Ошибка состояния покоя	PID параметры
Переходной процесс замкнутой системы без учета нелинейностей	87	0	$k_p=5,6; k_i=0.009; k_d=1,5$
Переходной процесс замкнутой системы с учетом нелинейностей	78	0	$k_p=17,3; k_i=0,002; k_d=0,09$

Таблица 2		Table 2	
РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОНТРОЛЛЕРА С ФАЗОВЫМ СДВИГОМ RESULTS OF THE PHASE-SHIFT CONTROLLER APPLICATION			
Ось направления	Время стабильности, мс	Ошибка состояния покоя	Параметры сдвига фазы
Переходной процесс замкнутой системы без учета нелинейностей	90	0	$K=6,2; T_1=0,0171; T_2=0,009$
Переходной процесс замкнутой системы с учетом нелинейностей	60	0	$K=7,5; T_1=0,0171; T_2=0,00$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Моделирование механического люфта. Как упоминалось ранее, механический люфт моделируется как зазор. Чтобы найти ширину этого зазора, вручную перемещали платформу в обоих направлениях в пределах определенного углового сектора. Считывали угловое положение нагрузки и угловое положение двигателя. Разница между двумя показаниями выражалась в ширине люфта:

$$2D = |\theta_1^\circ - \theta_2^\circ|,$$

где θ_1° – угловое положение нагрузки; θ_2° – угловое положение двигателя, транслирующееся на ось.

Таблица 3		Table 3
Нахождение величины зазора CALCULATION OF MECHANICAL BACKLASH WIDTH		
Ширина зазора $2D = \theta_1^\circ - \theta_2^\circ $,	θ_2°	θ_1°
0,2676	-29,1511	-28,8835
0,2913	33,4760	33,1847
0,2917	-32,1141	-31,8224
0,3382	32,8747	32,5365
0,2865	-36,0695	-35,7830
0,2736	32,4256	32,1520
0,2830	-34,406	-34,1230
Средняя величина зазора	0,2907	

Отклик ПИД-регулятора. ПИД-регулятор применялся к системе с использованием метода Циглера – Николса для достижения наилучшего отклика и улучшения времени стабильности, эффект интегратора был удален, чтобы максимально ускорить систему. Значения практического коэффициента были следующими: $k_p = 133$; $k_i = 0,000$; $k_d = 1,07$.

В таблице 4 и на рисунке 5 приведены экспериментальные результаты для управления положением направления и показана спецификация этих откликов.

Таблица 4		Table 4	
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА С ПИД-РЕГУЛЯТОРОМ EXPERIMENTAL RESULTS WITH PID CONTROLLER			
Относи- тельный угол	Состояние стабиль- ности, мс	Значение зазора	Ошибка состояния покоя
20°	750	0,145°	0,158
40°	820	0,034°	0,234

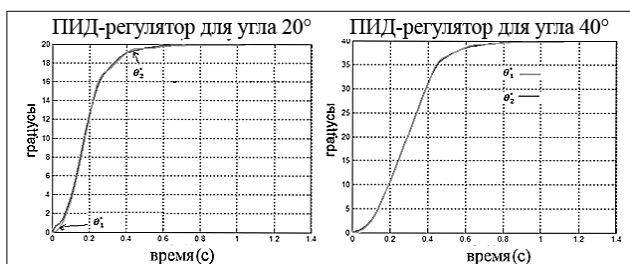


Рис. 5. Поведение ПИД-регулятора при смещении на 20/40 градусов

Fig. 5. Response of the PID controller to a 20/40-degree offset

Отклик регулятора сдвига фазы. Экспериментальные результаты для фазового управления смещением направления положения и спецификация этих откликов приведены в таблице 5 и на рисунке 6.

Таблица 5			Table 5
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА РЕГУЛЯТОРА СДВИГА ФАЗ EXPERIMENTAL RESULTS OF THE PHASE SHIFT CONTROLLER			
Относи- тельный угол	Состояние стабиль- ности, мс	Значение зазора	Ошибка состояния покоя
20°	400	0,00086°	0,06
40°	500	0,0253°	0,007

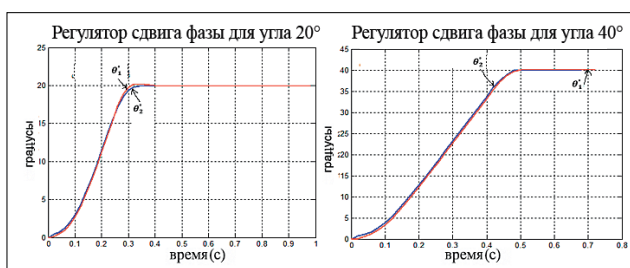


Рис. 6. Поведение регулятора сдвига фаз при смещении угла на 20/40 градусов

Fig. 6. Response of the phase-shift controller to a 20/40-degree angular offset

Выводы. Основной целью данной работы являлась разработка системы управления двухосевой платформой с двумя степенями свободы. Решалась проблема нелинейностей в системе, возникающих в результате механического люфта и способных вызвать отклонение от прямолинейной траектории при движении роботизированной платформы.

Исследовано поведения осей платформы и разработана математическая модель, поведение которой анализировалось в идеальных и неидеальных условиях. В качестве люфта в математической модели представлен гистерезис, были исследованы методы компенсации люфта. После добавления к идеальной математической модели гистерезиса в качестве регулятора для каждой из осей реализованы алгоритмы управления на основе линейного контроллера (ПИД-регулятора и регулятора фазы сдвига). Реализация и анализ поведения математической модели представлены в программном пакете *MATLAB* с помощью библиотеки Simulink. Алгоритм управления построен на основе управления с нечеткой логикой (*Fuzzy Logic Controller, FLC*).

Разработана система управления двухосевой

платформой с двумя степенями свободы. Исследованы механический люфт, его причины и последствия для систем. Предложена математическая модель системы управления. Отслеживание люфта происходит с помощью инкрементного энкодера на валу двигателя и абсолютного энкодера на конечной оси (выход редуктора). Исследованы и разработаны алгоритмы управления системы с учетом нелинейностей, определяющих механический люфт. Проведен анализ и продемонстрировано сравнение производительности алгоритмов управления на основе ПИД-регулятора и регулятора сдвига фаз. Сделан вывод о том, что регулятор сдвига фазы улучшает производительность системы лучше, чем традиционный ПИД-регулятор, особенно когда в модель системы добавляются нелинейные явления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. и др. Современные технологии и техника для сельского хозяйства – тенденции выставки Agritechnika 2019 // *Тракторы и сельхозмашины*. 2020. №6. 28-40. DOI: 10.31992/0321-4443-2020-6-28-40.
2. Шутенко А.В., Хорт Д.О. Определение геометрических параметров струи воды в зависимости от вида форсунки и режима работы струи // *Инженерные технологии и системы*. 2024. 34(1). 88-100. DOI: 10.15507/2658-4123.034.202401.088-100
3. Smith J., Brown L. Advances in precision gear design: A review. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2020. 234(10). 1234-1245. DOI: 10.1177/0954406220901234.
4. Karba B. Developing a software for proper assembly of planetary gearbox components with low backlash. *Master's thesis. Gaziantep University*. 2021. DOI: 10.13140/RG.2.2.16503.55209.
5. Filippov R., Khort D. Multifunctional robotic device with intelligent positioning system. *E3S Web*. 2024. 493. 01003. DOI: 10.1051/e3sconf/202449301003.
6. Kutyrev A.I., Khort D.O., Smirnov I.G. et al. Robotic device for identifying and picking apples. *Proceedings of IEEE Technology*. 2022. 415-420. DOI: 10.1109/PICST57299.2022.10238646.
7. Lin W., Qian C. Linear openness and feedback stabilization of nonlinear control systems. *Discrete and Continuous Dynamical Systems*. 2018. 11(6). 1105–1120. DOI: 10.3934/dcdss.2018063.
8. Serkies P., Szabat, K. Model predictive control of the two-mass drive system with backlash and friction. *ISA Transactions*. 2019. 93. 1-12. DOI: 10.1016/j.isatra.2019.02.005.
9. Zhang Y., Wang Y. Backlash compensation in servo systems using adaptive control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019. 66(5). 3983-3992. DOI: 10.1109/TIE.2018.2856205.
10. Vered Y., Elliott S. J. Robust internal model control approach for position control of systems with sandwiched backlash. *ISA Transactions*. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2307.06030.
11. Wang L., Chen X. Adaptive fuzzy control for nonlinear systems with backlash-like hysteresis. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2018. 26(3). 1312-1323. DOI: 10.1109/TFUZZ.2017.2737021.
12. Lima T.A., Madeira D. de S., Viana V.V., Oliveira R.C.L.F. Static output feedback stabilization for uncertain relative degree nonlinear systems with input saturation. *Systems & Control Letters*. 2022. 168. DOI: 10.1016/j.sysconle.2022.105359.
13. Zhang Y., Li X. Discrete-time adaptive fuzzy finite-time tracking control for nonlinear systems with uncertainties. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2023.
14. Li X., Zhang H. Position control of PMDC motors with backlash compensation using adaptive control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019. 66(12). 9462-9471. DOI: 10.1109/TIE.2018.2886789.
15. Zuo Q., Wang B., Chen J., Dong H. Model predictive control of aero-mechanical actuators with consideration of gear backlash and friction compensation. *Electronics*. 2024. 13(20). 4021. DOI: 10.3390/electronics13204021.
16. Smith, J., Brown, L. (2020). Advances in precision gear design: A review. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2020. 234(10). 1234-1245. DOI: 10.1177/0954406220901234.

REFERENCES

1. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya. P., Dorokhov A.S. et al. Modern technologies and equipment for agriculture – trends from the Agritechnika 2019 exhibition. *Tractors and Agricultural Machines*. 2020. №6. 28-40 (In Russian). DOI: 10.31992/0321-4443-2020-6-28-40.
2. Shutenko, A. V., & Khort, D. O. (2024). Determination of the geometric parameters of a water jet depending on the type of nozzle and jet operation mode. *Engineering*

- Technologies and Systems*. 34(1). 88-100 (In Russian). DOI: 10.15507/2658-4123.034.202401.088-100.
3. Smith J., Brown L. Advances in precision gear design: A review. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2020. 234(10). 1234-1245 (In English). DOI: 10.1177/0954406220901234.
 4. Karba B. Developing a software for proper assembly of planetary gearbox components with low backlash. *Master's thesis. Gaziantep University*. 2021 (In English). DOI: 10.13140/RG.2.2.16503.55209.
 5. Filippov R., Khort D. Multifunctional robotic device with intelligent positioning system. *E3S Web*. 2024. 493. 01003 (In English). DOI: 10.1051/e3sconf/202449301003
 6. Kutyrev A.I., Khort D.O., Smirnov I.G. et al. Robotic device for identifying and picking apples. *Proceedings of IEEE Technology*. 2022. 415-420 (In English). DOI: 10.1109/PICST57299.2022.10238646.
 7. Lin W., Qian C. Linear openness and feedback stabilization of nonlinear control systems. *Discrete and Continuous Dynamical Systems*. 2018. 11(6). 1105-1120 (In English). DOI: 10.3934/dcdss.2018063.
 8. Serkies P., Szabat, K. Model predictive control of the two-mass drive system with backlash and friction. *ISA Transactions*. 2019. 93. 1-12 (In English). DOI: 10.1016/j.isatra.2019.02.005.
 9. Zhang Y., Wang Y. Backlash compensation in servo systems using adaptive control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019. 66(5). 3983-3992 (In English). DOI: 10.1109/TIE.2018.2856205.
 10. Vered Y., Elliott S. J. Robust internal model control approach for position control of systems with sandwiched backlash. *ISA Transactions*. 2023 (In English). DOI: 10.48550/arXiv.2307.06030.
 11. Wang L., Chen X. Adaptive fuzzy control for nonlinear systems with backlash-like hysteresis. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2018. 26(3). 1312-1323 (In English). DOI: 10.1109/TFUZZ.2017.2737021.
 12. Lima T.A., Madeira D. de S., Viana V.V., Oliveira R.C.L.F. Static output feedback stabilization for uncertain relative degree nonlinear systems with input saturation. *Systems & Control Letters*. 2022. 168 (In English). DOI: 10.1016/j.sysconle.2022.105359.
 13. Zhang Y., Li X. Discrete-time adaptive fuzzy finite-time tracking control for nonlinear systems with uncertainties. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* (In English). 2023.
 14. Li X., Zhang H. Position control of PMDC motors with backlash compensation using adaptive control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019. 66(12). 9462-9471 (In English). DOI: 10.1109/TIE.2018.2886789.
 15. Zuo Q., Wang B., Chen J., Dong H. Model predictive control of aero-mechanical actuators with consideration of gear backlash and friction compensation. *Electronics*. 2024. 13(20). 4021 (In English). DOI: 10.3390/electronics13204021.
 16. Smith, J., Brown, L. (2020). Advances in precision gear design: A review. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2020. 234(10). 1234-1245 (In English). DOI: 10.1177/0954406220901234.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Саад Р. – работа с текстом, создание окончательной версии рукописи;
 Ахмад А. – обсуждение и оформление материалов статьи, подготовка иллюстраций;
 Исса М. – проведение теоретических расчетов;
 Халил Х. – анализ литературных источников по проблеме, формулировка выводов;
 Смирнов И.Г. – научное руководство, формулирование основных целей и задач исследования,
 Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Saad R. – text editing and preparation of the final version of the manuscript;
 Ahmad A. – discussion and structuring of article materials, preparation of illustrations
 Issa M. – theoretical calculations;
 Khalil H. – literature review, formulation of conclusions;
 Smirnov I.G. – scientific supervision, formulation of the main research goals and objectives.
 The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
 Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
 The paper was accepted for publication on

26.05.2025
 01.07.2025