

Vladislav Kots – master's student in the field of «Mechanical Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan, research fellow at the Engineering Center; e-mail: kotsvladislav1@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5312-9719>.

Kuanysht Dauletovich Ormanbekov – PhD student in Technological Machines and Equipment, Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Head of the Plasma Technologies for Materials Surface Treatment Laboratory at the Engineering Center; e-mail: kuanysht.dauletson@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6099-2812>.

Aibek Bakytzhanuly Shynarbek – PhD student in Technological Machines and Equipment, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; Head of the Electrolytic – Plasma Technologies for Materials Surface Modification and Materials Science Laboratory at the Engineering Center; e-mail: shynarbekov16@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2877-5178>.

Поступила в редакцию 05.01.2026

Поступила после доработки 23.02.2026

Принята к публикации 05.03.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1\(21\)-30](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-30)

MPHTI: 55.03.07; 55.03.45



Т.С. Жылқыбаев*, Р.А. Советбаев¹, Г.М. Кудайбергенова¹, Е.Р. Советбаев¹, К. Ожмегов²

¹Шәкәрім университет,

Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А

²Ченстоховский политехнический университет,

42-201, Республика Польша, г. Ченстохова, ул. Х. Домбровского 69

*e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАЗОРОВ В МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧАХ НА ТОЧНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПРИВОДА

Аннотация: В работе исследовано влияние зазоров в механических передачах на точность позиционирования привода. Актуальность исследования обусловлена тем, что наличие люфта в зубчатых, червячных и винтовых передачах является конструктивно неизбежным следствием технологических допусков, условий сборки и эксплуатационного износа и оказывает существенное влияние на кинематические и динамические характеристики приводных систем.

Разработана математическая модель электромеханического привода с учетом нелинейного кинематического элемента типа «люфт». Модель реализована в среде MATLAB/Simulink и включает пропорциональный регулятор положения, инерционную механическую подсистему с учетом демпфирования, а также блок моделирования зазора с заданной шириной мертвой зоны. Проведено численное параметрическое исследование при различных значениях величины зазора.

В ходе моделирования получены переходные характеристики, временные зависимости ошибки позиционирования и гистерезисные диаграммы. Установлено, что увеличение величины зазора приводит к росту максимальной динамической ошибки привода, особенно выраженной в режимах реверса движения. Показано, что в исследуемом диапазоне зависимость максимальной ошибки от параметра Δ носит монотонный характер и близка к линейной. Построенная гистерезисная характеристика подтверждает нелинейную природу рассматриваемого явления и демонстрирует формирование зоны нечувствительности шириной 2Δ .

Научная новизна работы заключается в количественной оценке зависимости максимальной динамической ошибки позиционирования от величины зазора на основе единой нелинейной динамической модели привода, а также в комплексном анализе влияния люфта с использованием переходных характеристик и гистерезисных диаграмм.

Полученные результаты позволяют количественно оценивать допустимую величину зазора при проектировании приводов высокоточных механизмов и могут служить основой для разработки алгоритмических или конструктивных методов компенсации люфта.

Ключевые слова: люфт, механическая передача, позиционирование, динамическая погрешность, гистерезис, нелинейность, приводные системы.

Введение

Механические передачи широко применяются в приводах машин, робототехнических системах [1, 2], координатных механизмах и станочном оборудовании. Одним из конструктивно неизбежных факторов, влияющих на точность работы таких систем, является наличие зазоров в сопряженных элементах передачи.

Зазоры формируются вследствие:

1. технологических допусков изготовления;
2. требований к сборке;
3. компенсации тепловых деформаций;
4. износа зубчатых поверхностей в процессе эксплуатации.

В зубчатых, червячных и винтовых наливках люфта приводит к возникновению относительного перемещения звеньев без передачи крутящего момента. Это явление проявляется в виде гистерезиса, зоны нечувствительности и скачкообразного перераспределения нагрузок при смене направления движения.

В системах точного позиционирования (роботизированные механизмы, координатные столы, редукторные приводы) указанные эффекты вызывают:

1. увеличение погрешности установки;
2. снижение повторяемости;
3. рост динамических нагрузок;
4. ускоренный износ элементов передачи [3-5].

В условиях повышения требований к точности и долговечности машин исследование влияния зазоров на кинематические и динамические характеристики передачи приобретает особую актуальность.

Несмотря на значительное количество работ, посвященных расчету зубчатых передач и оценке контактных напряжений [6, 7], влияние люфта на точность позиционирования привода часто рассматривается упрощенно – как статическая погрешность или мертвая зона.

В то же время люфт представляет собой нелинейное кинематическое явление, зависящее от направления движения, скорости, жесткости системы и характера нагрузки [8-11]. Его влияние носит комплексный характер и затрагивает:

1. переходные процессы;
2. распределение контактных сил;
3. динамику колебаний;
4. накопление ошибки при реверсах.

Отсутствие комплексной оценки влияния зазоров с учетом реальной динамики механической передачи затрудняет прогнозирование точности позиционирования и разработку конструктивных или алгоритмических методов компенсации.

Таким образом требуется расчетно исследовать влияние люфта на точностные характеристики привода с последующей разработкой методов его уменьшения или компенсации.

Целью настоящей работы является расчетное исследование влияния зазоров в механической передаче на точность позиционирования привода на основе математического моделирования динамической системы.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Разработать математическую модель люфта как нелинейного кинематического элемента механической передачи;
2. Сформировать динамическую модель привода с учетом момента инерции и передаточного отношения;
3. Выполнить численное моделирование переходных процессов при различных значениях зазора;
4. Провести сравнительный анализ изменения ошибки позиционирования при варьировании величины люфта;
5. Предложить метод снижения влияния зазора и оценить его эффективность на основе моделирования.

Условия и методы исследований

В качестве объекта исследования рассмотрен вращательный привод с редукторной механической передачей, предназначенный для систем позиционирования. Механическая часть модели включает:

1. приводной двигатель, создающий управляющий момент M_d ;
2. редуктор с передаточным отношением i ;
3. выходное звено с приведенным моментом операции J ;
4. нелинейный элемент типа «люфт», моделирующий зазор в зацеплении.

Передача рассматривается как идеальная кинематическая связь с постоянным передаточным отношением, содержащая зазор шириной 2Δ . Упругие деформации зубьев, контактные напряжения и микродеформации валов в рамках данной модели не учитывались, что позволило сосредоточить исследование на влиянии кинематического зазора.

Приняты следующие численные параметры:

1. приведенный момент инерции выходного звена: $J = 0.02 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$;
2. коэффициент вязкого трения: $B = 0.002 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$;
3. передаточное отношение редуктора: $i = 20$;
4. диапазон изменения зазора: $\Delta = 0 \dots 0.035 \text{ рад } (0 \dots 2^\circ)$;
5. максимальный управляющий момент: $M_{\max} = 5 \text{ Н}\cdot\text{м}$

Исследование проводилось при ступенчатом изменении заданного угла и при реверсивном режиме движения.

Динамика вращательного движения выходного звена описывается уравнениями (1,2):

$$J\dot{\omega} = M_d - B\omega - M_{load} \quad (1)$$

$$\dot{\theta}_{in} = \omega \quad (2)$$

где ω – угловая скорость, θ_{in} – угол на входе редуктора, M_{load} – нагрузочный момент (в расчетах принят равным нулю) [12, 13].

Люфт в передаче моделируется нелинейной зависимостью между углом на входе редуктора и углом выходного звена, согласно выражению (3):

$$\theta_{out} = \begin{cases} \theta_{in} - \Delta, & \text{при положительном направлении движения,} \\ \theta_{in} + \Delta, & \text{при отрицательном направлении движения} \\ \theta_{out}^{prev}, & |\theta_{in} - \theta_{out}| < \Delta \end{cases} \quad (3)$$

Такая модель реализует зону нечувствительности шириной 2Δ , в пределах которой передача момента отсутствует. При смене направления движения возникает гистерезисная зависимость между входным и выходными углами.

Ошибка позиционирования определялась согласно выражению (4):

$$e(t) = \theta_{ref}(t) - \theta_{out}(t) \quad (4)$$

где $\theta_{ref}(t)$ – заданное положение.

Численное моделирование выполнено в среде Matlab/Simulink.

Интегрирование системы дифференциальных уравнений осуществлялось методом Рунге-Кутты 4-го порядка (ode4) с фиксированным шагом интегрирования: $h = 0.001 \text{ с}$.

Общее время исследования составляло 5 с.

Исследование проводилось для следующих значений зазора показанных в таблице 1.

Таблица 1 – значения зазора

№	$\Delta(\text{рад})$	$\Delta^\circ(\text{град})$
1	0	0
2	0.0087	0.5
3	0.017	1
4	0.035	2

В ходе моделирования оценивались:

1. максимальная ошибка позиционирования;
2. установившаяся ошибка;
3. время переходного процесса;
4. ширина гистерезисной петли при реверсе;

5. зависимость максимальной ошибки от величины зазора.

Для анализа гистерезиса дополнительно строились зависимости $\theta_{out}(t) = f(\theta_{in})$.

Структурная схема модели привода реализована в среде Simulink (рис. 1) и включает следующие функциональные блоки:

1. Блок задания положения (Step);
2. Блок вычисления ошибки;
3. Пропорциональный регулятор положения с коэффициентом $K_p = 20$;
4. Блок формирования момента двигателя;

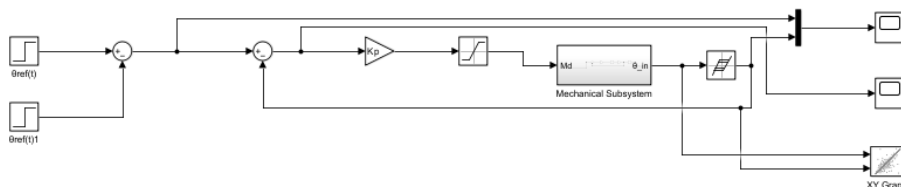


Рисунок 1 – Структурная схема модели

5. Механическую подсистему (рисунок 2), содержащую:

- 5.1 коэффициент $1/J$;
- 5.2 интегратор угловой скорости;
- 5.3 интегратор угла.

6. Нелинейный блок «Backlash» для моделирования зазора;

7. Блок регистрации выходных сигналов [14].

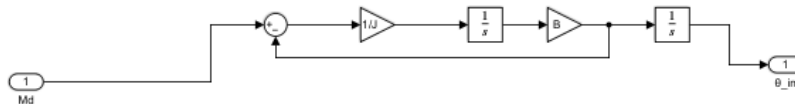


Рисунок 2 – Структура механической подсистемы привода

Результаты исследований

На первом этапе выполнено моделирование динамики привода при отсутствии зазора в передаче ($\Delta=0$). Это позволило определить базовые динамические характеристики системы позиционирования (рис. 3).

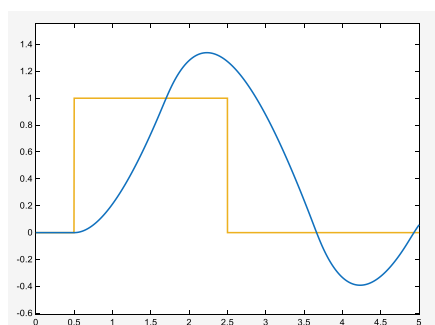


Рисунок 3 – Переходная характеристика θ_{ref} и θ_{out} при $\Delta=0$

Из графика видно, что система обладает колебательным характером переходного процесса, обусловленного инерционностью механической части и пропорциональным законом управления. Наблюдается перерегулирование и постепенное затухание колебаний.

При введении зазора в передачу ($\Delta>0$) наблюдается изменение характера процесса, особенно в момент системы направления движения (рис. 4).

В момент реверса ($t \approx 2.5$ с.) фиксируется скачкообразное изменение ошибки позиционирования, связанное с прохождением мертвой зоны передачи. Увеличение параметра Δ приводит к росту динамической ошибки и расширению зоны нечувствительности (рис. 5).

Из графика (рис. 5) видно, что наличие люфта возрастает амплитуда мгновенной ошибки в момент смены направления движения.

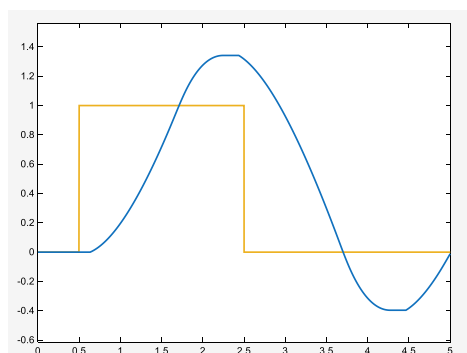


Рисунок 4 – Гереходная характеристика θ_{ref} и θ_{out} при $\Delta=1^\circ$

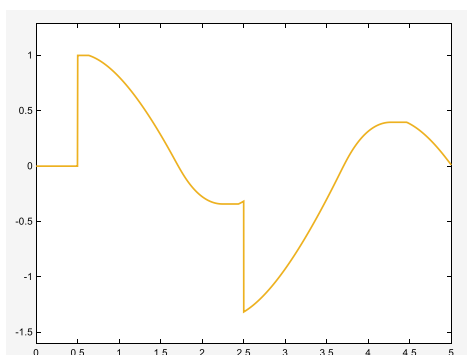


Рисунок 5 – График ошибки $e(t)$ при $\Delta=1^\circ$

Максимальная ошибка позиционирования определяется согласно выражению (5):

$$e_{max} = \max|\theta_{ref} - \theta_{out}| \quad (5)$$

Полученные численные значения приведены в таблице 2.

Таблица 2 – влияние величины зазора на точность позиционирования привода

№	$\Delta^\circ(\text{град})$	$\Delta(\text{рад})$	Максимальная ошибка e_{max} , рад	Относительная ошибка, %	Время переходного процесса, с
1	0	0	0.32	32	3.8
2	0.5	0.0087	0.38	38	3.9
3	1	0.017	0.46	46	4.1
4	2	0.035	0.62	62	4.4

Полученные данные показывают, что максимальная ошибка позиционирования возрастает линейно с увеличением величины зазора.

Для анализа кинематического эффекта люфта построена зависимость $\theta_{out}(t) = f(\theta_{in})$. Зависимость показана на рисунке 6.

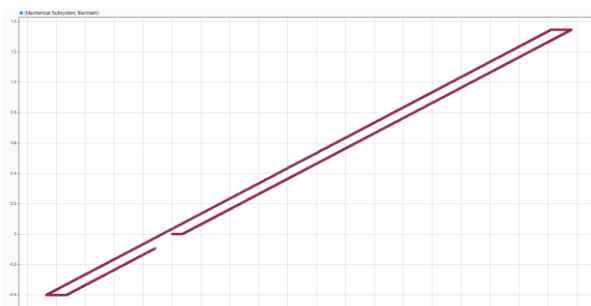


Рисунок 6 – Гистерезисная диаграмма при $\Delta=2^\circ$

На диаграмме (рис. 6) отчетливо наблюдается гистерезисная петля, соответствующая наличию зазора в передаче. Разделение ветвей при прямом и обратном ходе отражает зону нечувствительности шириной 2Δ .

При увеличении Δ ширина гистерезисной петли возрастает пропорционально величине зазора.

Для наглядного представления закономерности построен график зависимости максимальной ошибки от величины зазора (рис. 7).

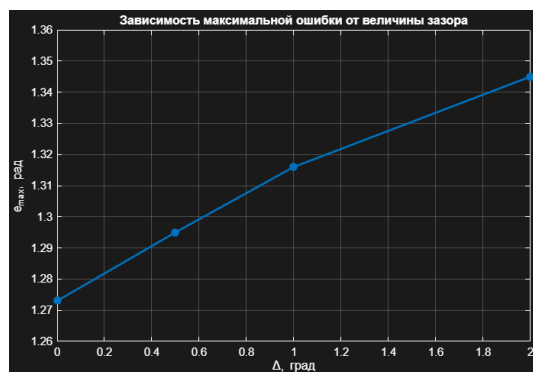


Рисунок 7 – график $e_{\max}=f(\Delta)$

На рисунке 7 представлена зависимость максимальной динамической ошибки позиционирования от величины зазора в передаче. Полученные результаты показывают монотонное возрастание ошибки при увеличении параметра Δ . Зависимость носит близкий к линейному характер в исследуемом диапазоне значений.

Следует отметить, что базовая составляющая ошибки определяется динамическими свойствами привода, тогда как увеличение люфта приводит к дополнительному росту погрешности при реверсах движения.

Обсуждение научных результатов

Проведенное численное исследование позволило установить характер влияния зазора в механической передаче на точностные показатели позиционирования привода.

Полученные результаты показывают, что даже при отсутствии люфта ($\Delta=0$) система обладает конечной динамической ошибкой, обусловленной инерционностью механической подсистемы и использованием пропорционального закона управления. Однако введение зазора приводит к дополнительному увеличению максимальной ошибки, особенно в момент реверса движения.

Анализ зависимости $e_{\max}=f(\Delta)$ показал монотонный характер роста ошибки при увеличении величины зазора. В исследуемом диапазоне значений зависимость носит близкий к линейному характер, что свидетельствует о пропорциональной связи между шириной мертвой зоны передачи и динамической погрешностью позиционирования.

Физический данный эффект объясняется следующим образом. При смене направления движения вал двигателя проходил участок углового перемещения, в пределах которого передача крутящего момента не осуществляется вследствие наличия люфта. В этот период система фактически функционирует без жесткой кинематической связи между звеньями, что приводит к накоплению ошибки и возникновению дополнительного динамического отклонения.

Построенная гистерезисная характеристика $\theta_{\text{out}}(t) = f(\theta_{\text{in}})$ подтверждает нелинейную природу рассматриваемого явления. Наличие разветвления траекторий при прямом и обратном ходе свидетельствует о формировании зоны нечувствительности шириной 2Δ . Увеличение зазора приводит к расширению гистерезисной петли и, как следствие, к ухудшению точности позиционирования. Следует отметить, что влияние люфта особенно существенно проявляется в системах с частыми реверсами движения, характерных для робототехнических механизмов, координатных столов и станков с числовым программным управлением. В таких системах зазор становится источником накопления динамической ошибки и может приводить к снижению повторяемости позиционирования.

Полученные результаты подтверждают необходимость учета люфта как нелинейного кинематического элемента при проектировании высокоточных приводов. Игнорирование данного фактора при синтезе регуляторов может привести к заниженной оценке погрешности системы.

Заклучение

В работе выполнено численное исследование влияние зазора в механической передаче на точность позиционирования привода. Разработана динамическая модель системы с учетом нелинейного кинематического элемента типа люфт, реализованная в среде MATLAB/Simulink.

Полученные результаты показали, что наличие зазора приводит к увеличению максимальной динамической ошибки позиционирования, особенно в момент реверса движения. Установлено, что в исследуемом диапазоне значений величины зазора зависимость максимальной ошибки от параметра Δ носит монотонный характер и близка к линейной.

Построенная гистерезисная характеристика подтвердила нелинейную природу рассматриваемого явления. Расширение зоны нечувствительности передачи приводит к увеличению динамической погрешности и снижению повторяемости позиционирования.

Показано, что при проектировании приводов высокоточных механизмов учет люфта является необходимым условием обеспечения заданных точностных характеристик. Игнорирование зазора на этапе расчета может привести к недооценке динамической ошибки системы.

Практическая значимость результатов заключается в возможности количественной оценки допустимой величины зазора на этапе проектирования механической передачи с учетом требуемой точности позиционирования. Полученные зависимости могут быть использованы при выборе класса точности зубчатых передач и при разработке алгоритмических методов компенсации люфта.

В качестве дальнейшего направления исследований целесообразно рассмотреть разработку алгоритмических методов компенсации люфта, а также анализ влияния зазора при использовании более сложных законов управления.

Список литературы

1. Norton R.L. Design of machinery: an introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines / R.L. Norton. – 5th ed. – New York: McGraw-Hill, 2012. – 857 p.
2. Shigley J.E. Mechanical engineering design / J.E. Shigley, C.R. Mischke, R.G. Budynas. – 10th ed. – New York: McGraw-Hill, 2015. – 1100 p.
3. Altintas Y. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design / Y. Altintas. – 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2012. – 366 p.
4. Verl A. Modeling and compensation of nonlinear effects in feed drives / A. Verl, S. Frey // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2010. – Vol. 59, № 1. – P. 353-356. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.118>.
5. Khalil W. Modeling, identification and control of robots / W. Khalil, E. Dombre // Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. – 522 p.
6. ISO 1328-1:2013. Cylindrical gears – ISO system of flank tolerance classification. Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to flanks of gear teeth. – Geneva: International Organization for Standardization, 2013. – 38 p.
7. Flodin A. Simulation of mild wear in helical gears / A. Flodin, S. Andersson // Wear. – 2000. – Vol. 241, Issue 2. – P. 123-128. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00384-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00384-7).
8. Nordin M. Controlling mechanical systems with backlash — a survey / M. Nordin, P.O. Gutman // Automatica. – 2002. – Vol. 38, № 10. – P. 1633-1649. [https://doi.org/10.1016/S0005-1098\(02\)00047-X](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(02)00047-X).
9. Eritenel T. Nonlinear vibration of gear systems including tooth separation and backlash / T. Eritenel, R.G. Parker // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2009. – Vol. 23, № 2. – P. 260-273. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2008.06.006>.
10. Kahraman, A. Non-linear dynamics of gear systems with backlash / A. Kahraman // Journal of Sound and Vibration. – 1991. – Vol. 146, № 3. – P. 469-506. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(91\)90727-7](https://doi.org/10.1016/0022-460X(91)90727-7).
11. Amabili M. Dynamic analysis of spur gear pairs with backlash / M. Amabili, A. Rivola // Nonlinear Dynamics. – 1997. – Vol. 14, № 1. – P. 17-33. <https://doi.org/10.1023/A:1008297218488>.
12. Shigley J.E. Mechanical engineering design / J.E. Shigley, R.G. Budynas. – 10th ed. – New York: McGraw-Hill, 2015. – 1100 p.

13. Norton R.L. Design of machinery: an introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines / R.L. Norton. – 5th ed. – New York: McGraw-Hill, 2012. – 857 p.
14. MathWorks. Simulink documentation: modeling nonlinearities and backlash block [Electronic resource] – Available at: <https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/backlash.html>.

Т.С. Жылқыбаев*, Р.А. Советбаев¹, Г.М. Кудайбергенова¹, Е.Р. Советбаев¹, К. Ожмегов²

¹Шәкәрім университеті,

071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20 А

²Ченстохов политехникалық университеті,

42-201, Польша Республикасы, Честохов Қ., х. Домбровский к-сі 69

*e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz

МЕХАНИКАЛЫҚ БЕРІЛІСТЕРДЕГІ САҢЫЛАУЛАРДЫҢ ЖЕТЕКТІ ПОЗИЦИЯЛАУ ДӘЛДІГІНЕ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Жұмыс механикалық берілістердегі саңылаулардың жетектің орналасу дәлдігіне әсерін зерттеді. Зерттеудің өзектілігі беріліс, құрт және винт берілістерінде люфттың болуы технологиялық төзімділіктің, құрастыру және пайдалану тозу жағдайларының конструктивті сөзсіз салдары болып табылатындығына және жетек жүйелерінің кинематикалық және динамикалық сипаттамаларына айтарлықтай әсер ететіндігіне байланысты.

«Люфт» сияқты сызықтық емес кинематикалық элементті ескере отырып, электромеханикалық жетектің математикалық моделі жасалды. Модель MATLAB/Simulink ортасында жүзеге асырылады және пропорционалды позиция реттегішін, демпферлік инерциялық механикалық ішкі жүйені, сондай-ақ берілген өлі аймақ ені бар саңылауды модельдеу блогын қамтиды. Саңылау шамасының әртүрлі мәндерінде сандық параметрлік зерттеу жүргізілді.

Модельдеу өтпелі сипаттамаларды, позициялау қателігінің уақытша тәуелділіктерін және гистерезис диаграммаларын алды. Саңылау мөлшерінің ұлғаюы жетектің максималды динамикалық қателігінің өсуіне әкелетіні анықталды, әсіресе кері қозғалыс режимдерінде. Зерттелетін диапазонда максималды қатенің параметрге тәуелділігі екендігі көрсетілген, ол монотонды және сызықтыққа жақын. Салынған гистерезис сипаттамасы құбылыстардың сызықтық емес сипатын растайды және ені 2-ші сезімталдық аймағының қалыптасуын көрсетеді.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы дискінің бірыңғай сызықтық емес динамикалық моделі негізінде максималды динамикалық позициялау қателігінің алшақтық мөлшеріне тәуелділігін сандық бағалау, сондай-ақ өтпелі сипаттамалар мен гистерезис диаграммаларын қолдана отырып, ойын әсерін кешенді талдау болып табылады.

Алынған нәтижелер жоғары дәлдіктегі механизмдердің жетектерін жобалау кезінде рұқсат етілген алшақтық мөлшерін анықтауға мүмкіндік береді және алгоритмдік немесе конструктивті өтемақы әдістерін жасауға негіз бола алады.

Түйін сөздер: люфт, механикалық беріліс, орналасу, динамикалық қателік, гистерезис, сызықтық емес, жетек жүйелері.

T. Zhylykybayev*, R. Sovetbayev¹, G. Kudaybergenova¹, Y. Sovetbayev¹, K. Ozhmegov²

¹Shakarim University,

071412, Kazakhstan, Semey, 20 A Glinka Street

²Technical University Czestochowa,

42-201, Republic of Poland, Czestochowa, 69 H. Dąbrowskiego Street

*e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz

The study examines the influence of clearances in mechanical transmissions on the positioning accuracy of the drive. The relevance of the study is due to the fact that the presence of backlash in gear, worm and screw drives is a structurally inevitable consequence of technological tolerances, assembly conditions and operational wear, and has a significant impact on the kinematic and dynamic characteristics of drive systems.

A mathematical model of an electromechanical drive has been developed, taking into account a nonlinear kinematic element of the 'backlash' type. The model is implemented in MATLAB/Simulink and includes a proportional position controller, an inertial mechanical subsystem with damping, and a backlash simulation unit with a specified dead zone width. A numerical parametric study was conducted for different backlash values.

During the simulation, transient characteristics, time dependencies of positioning errors, and hysteresis diagrams were obtained. It was found that an increase in the gap value leads to an increase in the maximum dynamic error of the drive, which is especially pronounced in reverse motion modes. It was shown that in the studied range, the dependence of the maximum error on the parameter Δ is monotonic and close

to linear. The constructed hysteresis characteristic confirms the nonlinear nature of the phenomenon under consideration and demonstrates the formation of an insensitivity zone with a width of 2Δ .

The scientific novelty of the work consists in the quantitative assessment of the dependence of the maximum dynamic positioning error on the gap value based on a unified nonlinear dynamic model of the drive, as well as in a comprehensive analysis of the influence of backlash using transient characteristics and hysteresis diagrams.

The results obtained allow for a quantitative assessment of the permissible backlash value when designing drives for high-precision mechanisms and can serve as a basis for the development of algorithmic or design methods for backlash compensation.

Key words: backlash, mechanical transmission, positioning, dynamic error, hysteresis, non-linearity, drive systems.

Сведения об авторах

Тұрсынхан Саятұлы Жылқыбаев* – магистр технических наук, преподаватель, кафедра «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, г. Семей, Казахстан; e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8918-527X/>

Раил Аянович Советбаев – PhD, заведующий кафедрой «Автоматизация и информационные технологии» Шәкәрім университет, г. Семей, Казахстан; e-mail: r.sovetbayev@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3605-515X>.

Гульнур Муратовна Кудайбергенова – магистр технических наук, старший преподаватель, кафедра «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, г. Семей, Казахстан; e-mail: g.kudaibergenova@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3841-982X>.

Ералы Рауанұлы Советбаев – магистр технических наук, преподаватель, кафедра «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, г. Семей, Казахстан; e-mail: sovetbaev_eraly@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4529-2787>.

Кирилл Ожмегов – PhD, кафедра производственного менеджмента, Ченстоховский политехнический университет, Польша; e-mail: kvozhmegov@wp.pl. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7103-2945>

Авторлар туралы мәліметтер

Тұрсынхан Саятұлы Жылқыбаев* – техника ғылымдарының магистрі, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының оқытушы, Шәкәрім университеті, Семей қ., Қазақстан; e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8918-527X>.

Раил Аянович Советбаев – PhD, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының меңгерушісі, Шәкәрім университеті, Семей қ., Қазақстан; e-mail: r.sovetbayev@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3605-515X>.

Гульнур Муратовна Кудайбергенова – техника ғылымдарының магистрі, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының аға оқытушы, Шәкәрім университеті, Семей қ., Қазақстан; e-mail: g.kudaibergenova@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3841-982X>.

Ералы Рауанұлы Советбаев – техника ғылымдарының магистрі, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының оқытушы, Шәкәрім университеті, Семей қ., Қазақстан; e-mail: sovetbaev_eraly@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4529-2787>.

Кирилл Ожмегов – PhD, Өндірісті басқару кафедрасы, Ченстохов политехникалық университеті, Польша; e-mail: kvozhmegov@wp.pl. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7103-2945>.

Information about the authors

Tursynkhan Zhylykybayev* – master of technical sciences, lecturer of Department of Automation and Information Technologies, Shakarim university, Semey c., Kazakhstan; e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8918-527X>.

Rail Sovetbayev – PhD, Head of the Department of Automation and Information Technologies, Shakarim university, Semey c., Kazakhstan; e-mail: r.sovetbayev@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3605-515X>.

Gulnur Kudaybergenova – master of technical sciences, senior lecturer of Department of Automation and Information Technologies, Shakarim university, Semey c., Kazakhstan; e-mail: g.kudaibergenova@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3841-982X>.

Yeraly Sovetbayev – Master of technical sciences, lecturer of Department of Automation and Information Technologies, Shakarim university, Semey c., Kazakhstan; e-mail: sovetbaev_eraly@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4529-2787>.

Kirill Ozhmegov – PhD, Department of Production Management, Technical University Czestochowa, Poland; e-mail: kvozhmegov@wp.pl. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7103-2945>.

Поступила в редакцию 05.01.2026

Поступила после доработки 20.02.2026

Принята к публикации 05.03.2026