

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Шатохин И. А. ORCID ID 0009-0000-4678-3141,
Мостовской М. В., Слепцов В. В.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Российская Федерация,
e-mail: shat.ivan@inbox.ru*

В статье рассматривается подход к проектированию следящих электроприводов, дающий наглядное представление об их принципе действия, а также позволяющий учесть и оптимизировать характеристики компонентов с учетом их влияния на параметры сложной мультифизической системы. Имитационная модель следящего электропривода отличается от предложенных ранее моделей сочетанием реализации метода векторного управления синхронным электродвигателем в среде MATLAB/Simulink с математическим описанием кинематики и динамики исполнительного механизма с привлечением специализированных компонентов физического моделирования пакета Simscape. Особенностью данной модели является учет влияния углового люфта, трения и других свойств исполнительного механизма, значительно осложняющих настройку следящих электроприводов в составе технологического оборудования. Разработанная модель учитывает нелинейные характеристики силового преобразователя, динамику системы управления и включает контуры регулирования положения, скорости и электромагнитного момента, что соответствует структуре широко распространенных систем следящего привода. В качестве метода исследования в работе выступает математическое имитационное моделирование. Результатом работы явилась разработанная имитационная модель, отражающая важнейшие характеристики следящего электропривода и позволяющая получать результаты в виде временных зависимостей анализируемых параметров. В перспективе предложенный подход позволяет прогнозировать динамические погрешности исполнительных органов машин при отработке сложных пространственных траекторий фрезерования.

Ключевые слова: векторное управление, синхронный электродвигатель, следящий электропривод, редуктор, моделирование

DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL OF A SERVO-DRIVE FOR SPECIAL-PURPOSE PROCESS MACHINERY

Shatokhin I. A. ORCID ID 0009-0000-4678-3141,
Mostovskoy M. V., Slepsov V. V.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“MIREA – Russian Technological University”, Moscow, Russian Federation,
e-mail: shat.ivan@inbox.ru*

This article presents an approach to the design of servo drives that provides a clear understanding of their operating principles and enables the characteristics of individual components to be considered and optimized with regard to their influence on a complex multiphysics system. The proposed servo-drive simulation model differs from previously developed models by combining field-oriented control of a synchronous motor implemented in MATLAB/Simulink with a mathematical description of the kinematics and dynamics of the actuator using specialized physical-modeling components from the Simscape package. A distinctive feature of the model is that it accounts for angular backlash, friction, and other actuator properties that significantly complicate the tuning of servo drives used in process equipment. The developed model incorporates the nonlinear characteristics of the power converter and the dynamics of the control system and includes position, speed, and electromagnetic torque control loops, which corresponds to the architecture of widely used servo-drive systems. Simulation modeling is employed as the primary research method. The resulting model represents the key characteristics of the servo drive and provides time-domain responses of the analyzed parameters. The proposed approach has the potential to predict dynamic errors of machine actuators when executing complex spatial milling trajectories.

Keywords: field-oriented control, synchronous motor, servo drive, modeling, gearbox

Введение

Актуальность широкого внедрения высокоэффективного обрабатывающего оборудования с числовым программным управлением продиктована интенсификацией спроса на изготовление деталей

сложной геометрической формы, таких как корпуса оптических приборов, элементы топливной арматуры и другие изделия различного назначения. При многоосевой субтрактивной обработке для перемещения заготовок используется наклонно-по-

воротный стол, в составе привода наклона которого находятся планетарный редуктор, датчик положения выходного вала редуктора и электрический двигатель с системой управления. Фрезерование с одновременным перемещением инструмента и заготовки по нескольким координатам позволяет вести обработку при одном установе, что исключает погрешности базирования, накапливающиеся при переходе детали между операциями. Рабочие перемещения заготовок и инструмента в процессе обработки осуществляются с помощью следящих электроприводов подачи, при этом динамические характеристики системы управления координатой определяют точность отработки задающих сигналов, от которой зависит геометрическая точность изготавливаемых деталей [1]. В связи с этим важной задачей становится проектирование следящих электроприводов высокой точности, основные параметры которых регламентированы ГОСТ 27803-91¹. Следящие приводы подачи технологических машин являются сложными системами, анализ динамических свойств которых часто проводится с использованием инструментария теории автоматического управления [2]. Наличие в механической передаче углового люфта, упругих деталей и различных видов трения значительно усложняет контроль объекта управления с такими свойствами [3, 4]. Наиболее точное управление может быть получено при применении датчиков положения, кинематически связанных с выходным звеном механизма, однако такая структура системы управления (англ. Closed loop) требует тщательной настройки ввиду риска потери устойчивости и возникновения осцилляции в контуре управления [5, 6]. В большинстве случаев системы управления следящих приводов проектируются с реализацией принципа подчиненного регулирования, имея в своем составе контуры регулирования электромагнитного момента, скорости и положения [7]. Общеизвестным стандартом в настоящее время стало применение в сервоприводах синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ), причем в рассматриваемом случае управление двигателем осуществляется с реализацией метода векторного управления [8]. Синтез регуляторов с необходимыми характеристиками требует знания точных параметров компонентов, в частно-

сти – динамических характеристик полупроводниковых силовых преобразователей [9, 10]. В свою очередь, проектирование следящего привода с заданными характеристиками сопровождается формированием требований к параметрам отдельных компонентов [11, 12]. Наличие большого количества тесно взаимосвязанных факторов вынуждает проектировщика прибегать к итерационному подходу, чтобы получить сбалансированную систему с требуемыми техническими характеристиками. Выполнение сложных расчетов в таких условиях занимает значительное время, что создает почву для применения компьютерных вычислений с целью снижения временных затрат. Разработка комплекса имитационных моделей следящих электроприводов с различными типами электродвигателей для различных технологических машин (обрабатывающих центров, промышленных роботов, лазерных технологических установок и пр.) позволит значительно упростить процессы их проектирования, отладки и эксплуатации.

Цель исследования – разработка имитационной модели, позволяющей проводить синтез и анализ следящего электропривода с вентильным электродвигателем как в составе технологической машины (поворотного стола, промышленного робота, лазерной технологической установки и пр.), так и без нее.

Материалы и методы исследования

Для определения технических характеристик электропривода как в составе технологических машин при наличии нелинейностей (таких как насыщение преобразователя, люфт, упругая деформация и сухое трение), так и без них в качестве основного метода исследования выбрано имитационное компьютерное моделирование. Данный метод позволяет провести виртуальный эксперимент по структурно-параметрическому синтезу и настройке регуляторов с нахождением границ устойчивости контуров управления без риска повреждения дорогостоящего оборудования, а также определить необходимые характеристики отдельных компонентов привода. С помощью моделирования может быть определена точность позиционирования и траекторная погрешность системы (путем нахождения полосы пропускания контуров). В рамках моделирования характеристики разрабатываемого привода могут быть определены согласно стандартным методикам и проверены на соответствие требованиям ГОСТ 27803-91.

¹ ГОСТ 27803-91 Электроприводы регулируемые для металлообрабатывающего оборудования и промышленных роботов. Технические требования. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200013219> (дата обращения: 20.07.2026).



В качестве моделируемого объекта выступает следящий электропривод на базе трехконтурной системы с подчиненным регулированием параметров, реализующей векторное управление синхронным двигателем с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ). Функциональная схема следящего электропривода представлена на рис. 1. СДПМ обеспечивает вращательное движение исполнительного механизма, который оснащен отдельным датчиком положения.

Регулятор положения получает данные от датчика положения исполнительного механизма и на основе рассогласования с данными задания положения ($U_{зп}$) рассчитывает уставку угловой скорости ($U_{зс}$). Регулятор скорости на основе рассогласования значений $U_{зс}$ и ω_m вычисляет требуемое значение тока $U_{з\ i_q}$, определяющее электромагнитный момент СДПМ. Контур регулирования тока включает в себя два регулятора тока, устраняющих ошибку между заданными значениями токов ($U_{з\ i_q}$, $U_{з\ i_d}$) и измеренными составляющими вектора тока статора i_q и i_d во вращающийся синхронно с ротором системе отсчета. На выходе регуляторы формируют управляющие сигналы U_d и U_q , которые преобразуются блоком обратного координатного (и фазного) преобразования БКП(о) в сигналы фазных напряжений U_a , U_b , U_c в неподвижных координатах. Положение ротора определяется в блоке преобразования (БП) по сигналам фотоимпульсного преобразователя (ФИП). Данные сигналы подаются в широтно-импульсный модулятор (ШИМ) и в виде сигналов управляют ключами усилителя мощности, который обеспечивает формирование заданных напряжений на фазных обмотках СДПМ. Датчики тока ДТ_а и ДТ_б измеряют значения токов статора, преобразуя их в сигналы $U(i_a)$ и $U(i_b)$, которые оцифровываются (АЦП) и поступают в блок прямого координатного преобразова-

ния (БКП), для выделения составляющих i_q и i_d . Эти данные служат для замыкания контуров регулирования тока, реализуя метод векторного управления [13].

Для построения модели электропривода была выбрана среда Matlab Simulink. При моделировании использовался дискретный (Discrete) режим расчета с автовыбором решателя с шагом $2 \cdot 10^{-6}$ с, заданный в настройках блока «powergui». Для моделирования свойств исполнительного механизма авторами были использованы компоненты библиотеки Simscape Mechanics. Преимущество Simscape заключается в переходе к физическому блочному моделированию [14–16], что сопровождается значительным снижением трудоемкости задания топологии электропривода.

В отличие от [16], в структуру разработанной модели введены блоки с новыми функциями Ideal DC voltage source, Universal Bridge, Permanent Magnet Synchronous Machine, dq to abc, abc to dq, что позволило реализовать метод векторного управления синхронной машиной [17] в составе модели, при этом подход к реализации координатных и фазных преобразований не отличается от широко распространенных практик [13]. Следует отметить, что конструктивно объединенный с корпусными элементами электродвигатель представляет собой электрическую машину с неявнополюсным ротором и синусоидальным распределением магнитной индукции в воздушном зазоре между ротором и статором. Отличительной особенностью настоящей работы является имитационная модель исполнительного механизма, которая выполнена в соответствии с кинематической схемой (рис. 2). Результаты моделирования учитывают влияние углового люфта зубчатой передачи, который оказывает значительное влияние на качество регулирования положения.

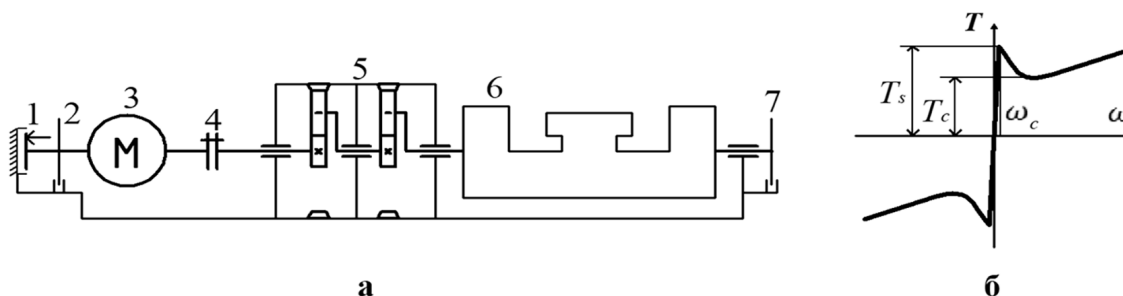


Рис. 2. Кинематическая схема (а): 1 – электромагнитный тормоз, 2, 7 – фотоимпульсные датчики, 3 – СДПМ, 4 – муфта, 5 – планетарный редуктор, 6 – поворотный стол, зависимость силы трения от скорости (б)

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Для моделирования трения в составе модели использован блок Rotational Friction, зависимость трения от скорости в котором (рис. 2, б) описывается следующим уравнением:

$$T = \sqrt{2e}(T_s - T_c) \cdot \exp\left(-\left(\frac{\omega}{\omega_c \cdot \sqrt{2}}\right)^2\right) \cdot \frac{\omega}{\omega_c \cdot \sqrt{2}} + T_c \cdot \operatorname{th}\left(\frac{\omega}{0,1 \cdot \omega_c}\right) + f \cdot \omega, \quad (1)$$

где T – момент трения, ω – частота вращения вала, T_s – момент трения страгивания, T_c – момент сухого трения, ω_c – пороговая скорость страгивания, f – коэффициент вязкого трения. В модель включен блок жесткого упора Translational Hard Stop, описываемый следующим образом:

$$T_t = \begin{cases} K_{p1} \cdot (\varphi - g_p) + D_p \cdot \omega_1, & \varphi \geq g_p \\ 0, & g_n < \varphi < g_p \\ K_n \cdot (\varphi + g_n) + D_n \cdot \omega_1, & \varphi \leq g_n \end{cases}, \quad \omega_1 = \frac{d\varphi}{dt}, \quad (2)$$

где T_t – момент взаимодействия, g_p – угловой зазор перед ведущим зубом, g_n – угловой зазор после ведущего зуба, φ – относительное угловое положение ведущего зуба, K_n , K_{p1} – угловая жесткость, D_p , D_n – коэффициенты углового демпфирования, ω_1 – относительная скорость углового поворота ведущего зуба, t – время.

Также помимо вспомогательных в состав модели введен блок зубчатой передачи Gear Box, характеризующийся передаточным отношением N и блок Inertia для задания момента инерции элементов, связанных с выходным валом. Регуляторы контуров предварительно выбирались из условий настройки контуров на соответствующий оптимум (контур тока и контур положения – на технический оптимум, контур скорости – на симметричный оптимум), а затем корректировались вследствие действия ограничений сигналов. Регуляторы в составе схемы описаны следующей формулой:

$$Y(s) = E(s) \left(K_p + K_i \frac{1}{s} \right), \quad (3)$$

где $Y(s)$ – выходной сигнал регулятора, $E(s)$ – сигнал рассогласования (входной сигнал регулятора), K_p и K_i – пропорциональный и интегральный коэффициенты настройки регулятора соответственно.

Также к выходному сигналу регуляторов применено ограничение типа насыщение. Данное ограничение накладывается диапазоном выходного сигнала блока и представляется в виде системы уравнений

$$Z = \begin{cases} b \text{ при } x > b; \\ x \text{ при } |x| \leq b; \\ -b \text{ при } x < -b, \end{cases} \quad (4)$$

где Z – значение выходного сигнала, b – максимальное значение выходного сигнала, x – значение входного сигнала.

Результаты исследования и их обсуждение

С учетом структуры следящего электропривода авторами была разработана имитационная модель (рис. 3, а). Формирование фазных токов в рамках модели реализовано с помощью CRPWM инвертора [9] (рис. 3, б).

На рис. 4 представлена разработанная имитационная модель исполнительного механизма, построенная с применением блока физического моделирования. При имитационном моделировании электропривода совместно с исполнительным механизмом были откорректированы по методу Циглера – Николса [18] настройки регуляторов, при которых влиянием упругостей и зазоров можно было пренебречь без принятия дополнительных мер для устранения вибрации. Уточненные параметры, примененные при моделировании: пропорциональный коэффициент передачи регулятора положения – 3.9; пропорциональный коэффициент регулятора скорости – 130, интегральный – 12; технологическое ограничение угловой скорости СДПМ – 175 рад/с; пропорциональный коэффициент регуляторов тока – 60, интегральный – 6000, ограничение пикового тока – 42 А.

Предварительное моделирование автономного следящего электропривода подтвердило его соответствие требованиям ГОСТ 27803-91 по частоте пропускания (12 Гц) и моментной ошибке (± 2 дискреты датчика положения). Результаты моделирования следящего электропривода совместно с исполнительным механизмом (таблица) приведены на рис. 5–8.

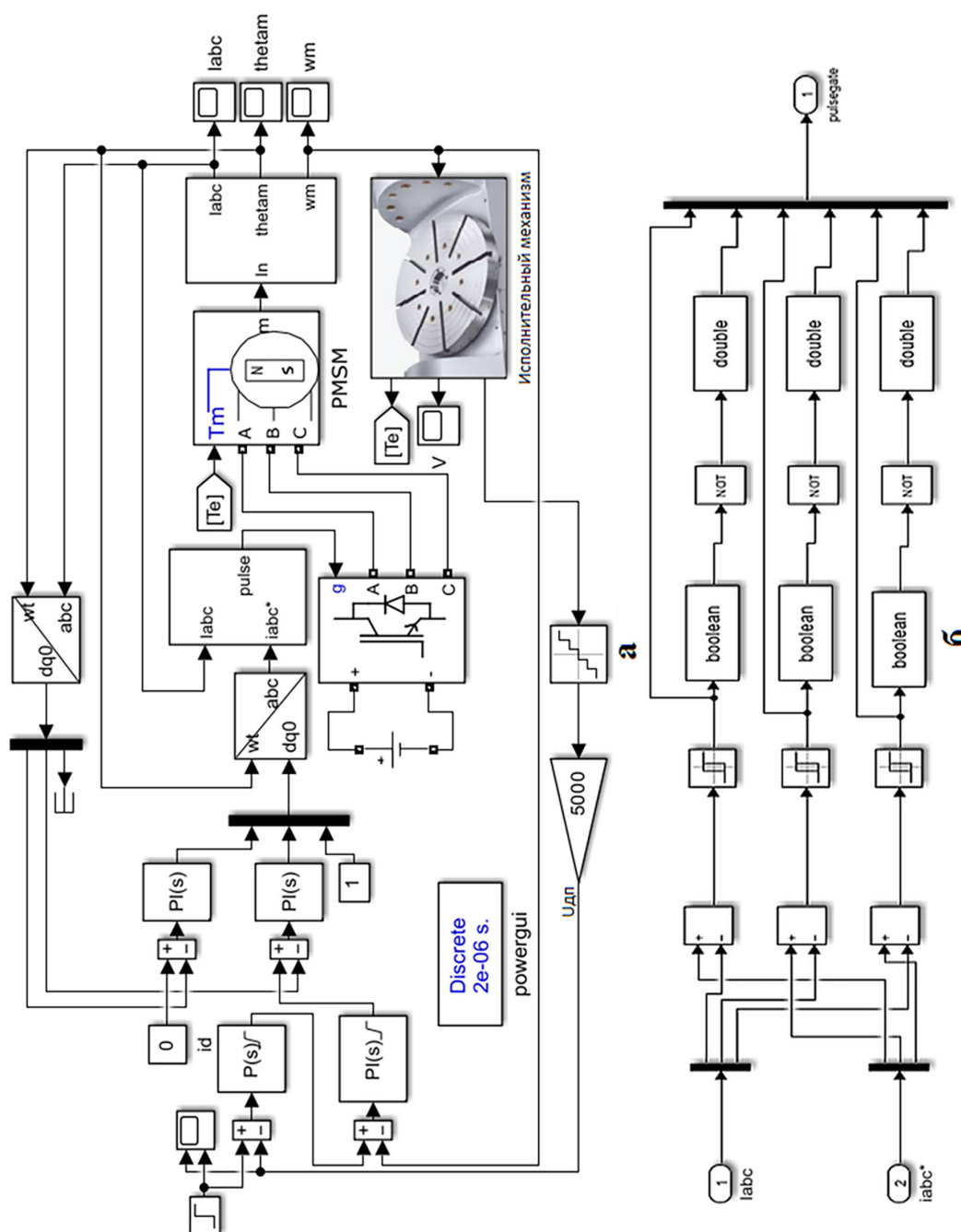


Рис. 3. Имитационная модель следящего электропривода
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

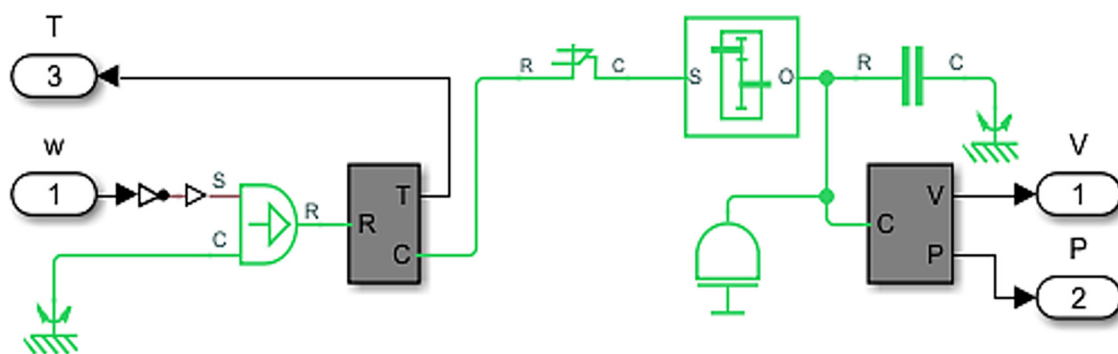


Рис. 4. Имитационная модель исполнительного механизма
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Параметры электромеханической системы

Наименование параметра	Значение	Единица измерения
Сопротивление фазной обмотки	2,875	Ом
Индуктивность фазной обмотки	0,0153	Гн
Постоянная момента СДПМ	0,75	Н·м/А
Количество пар полюсов	4	шт
Напряжение звена постоянного тока	400	В
Момент инерции входного вала	0,0015	кг·м ²
Момент инерции нагрузки	1,4	кг·м ²
Момент трения страгивания (T_s)	17	Н·м
Порог скорости страгивания (ω_c)	$1 \cdot 10^{-4}$	рад/с
Момент сухого трения (T_c)	13	Н·м
Коэффициент вязкого трения стола (f)	2	Н·м·с/рад
Передаточное отношение редуктора	120	—
Угловой люфт первичного вала ($g_p + g_n$)	0,008	рад
Угловая жесткость (K_n, K_{pl})	$2 \cdot 10^6$	Н·м/рад
Коэффициент углового демпфирования (D_p, D_n)	$1 \cdot 10^5$	Н·м·с/рад
Количество дискрет датчика положения на оборот	31 400	Диск

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

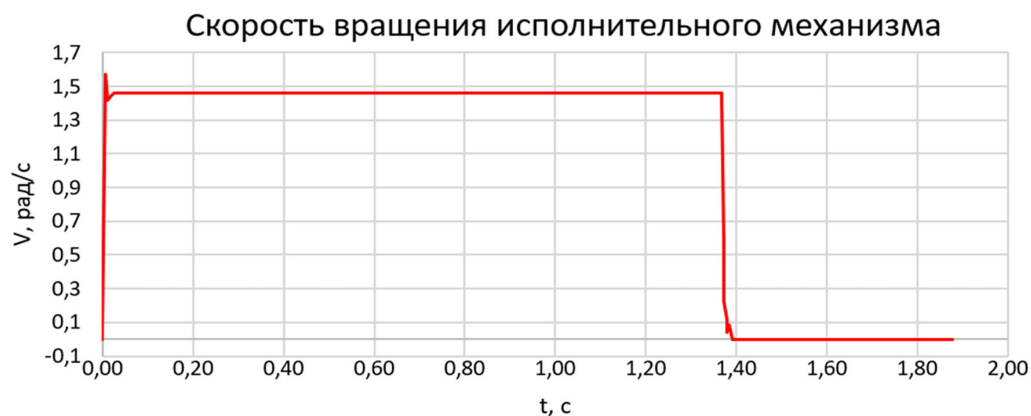


Рис. 5. Результаты моделирования скорости при перемещении на 10 000 Диск
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

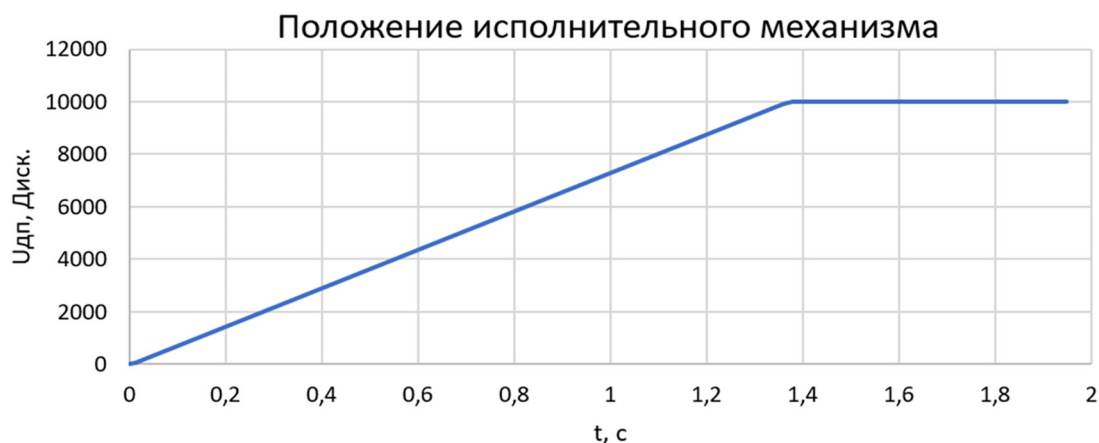


Рис. 6. Результаты моделирования при перемещении на 10 000 Диск
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

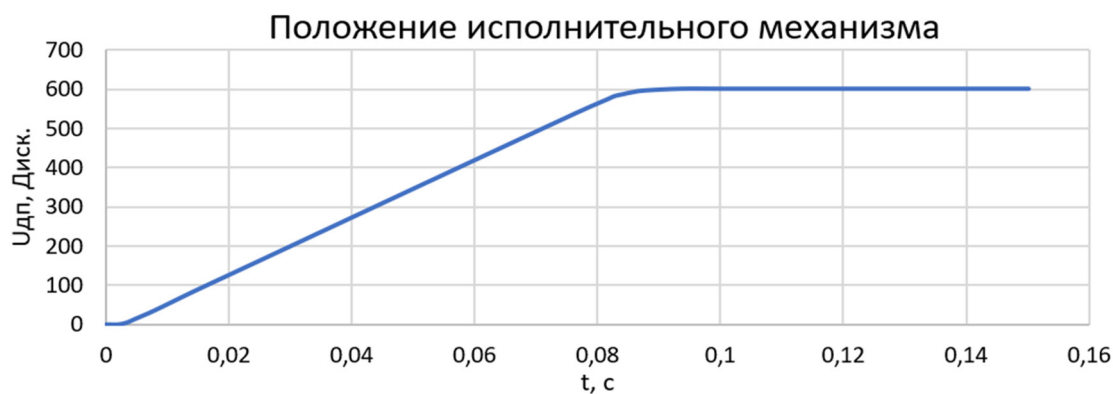


Рис. 7. Результаты моделирования при перемещении на 600 Диск
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

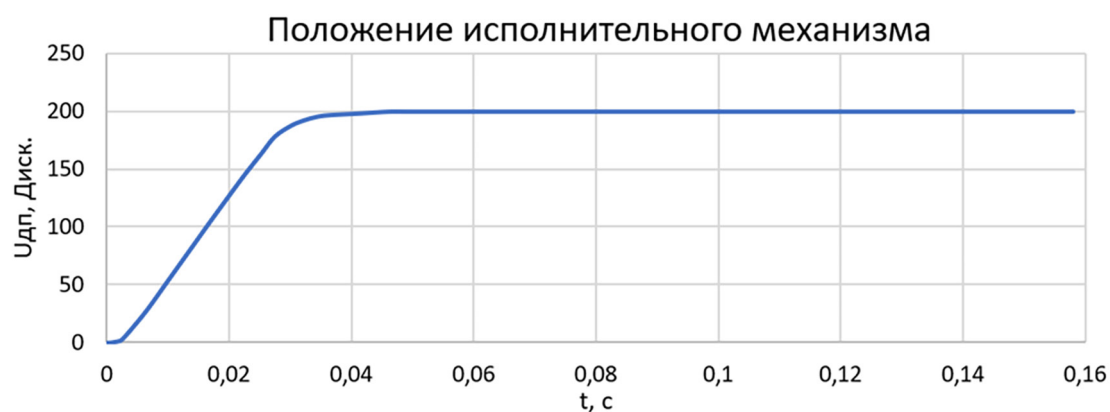


Рис. 8. Результаты моделирования при перемещении на 200 Диск
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Из рис. 6–8 видно, что отсутствие перерегулирования и накопленное значение дрейфа углового перемещения сохраняется в пределах ± 2 дискрет, что соответствует требованиям к приводам подачи для фрезерной обработки.

Заключение

Вид полученных графиков соответствует типичным графикам следящего привода, управляемого по сигналу задания положения без управления по упреждению (англ.

Feedforward Control). В результате проведенной работы авторами были разработаны имитационные модели, которые могут быть использованы инженерами и научными работниками при проектировании следящих электроприводов различного технологического оборудования, такого как роботы-манипуляторы, многокоординатные и лазерные обрабатывающие центры и т. п.

В дальнейшем авторы предполагают разработать комплекс имитационных моделей следящих электроприводов с различными электродвигателями (асинхронными, шаговыми, постоянного тока) для различных технологических машин.

Список литературы

1. Mostovskoy M. V., Artemova S. V., Kamenskaya M. A., Shmeleva N. M., Kananadze S. S., Vu Tri Chien An Adjustable Electric Drive of Coordinate Systems of Laser Installations: Simulation Modeling in the MATLAB Simulink Package // *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2023. Vol. 29. Is. 2. P. 239–253. DOI: 10.17277/vestnik.2023.02.pp.239-253.
2. Jastrzębski M., Kabziński J., Mosiołek P. Adaptive Position Control for Two-Mass Drives with Nonlinear Flexible Joints // *Energies*. 2024. Vol. 17. Is. 2. Art. 425. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/2/425> (дата обращения: 14.07.2026). DOI: 10.3390/en17020425.
3. Gan L., Wang L., Huang F. Adaptive Backlash Compensation for CNC Machining Applications // *Machines*. 2023. Vol. 11. Is. 2. Art. 193. URL: <https://www.mdpi.com/2075-1702/11/2/193> (дата обращения: 14.07.2026). DOI: 10.3390/machines11020193.
4. Нгуен З. Х., Второв В. Б. Управление электромеханической системой с люфтом и упругими деформациями // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2021. № 8. С. 53–59. URL: <https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-8-2021-53-59.pdf> (дата обращения: 14.07.2026).
5. Wang B., Ji R., Zhou C., Sohel R. M., Liu K., Hua W., Ye H. A Gap Nonlinearity Compensation Strategy for Non-Direct Drive Servo Systems // *Energies*. 2024. Vol. 17. Is. 14. Art. 3582. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/14/3582> (дата обращения: 14.07.2026). DOI: 10.3390/en17143582.
6. Qu Y., Xu C., Zhang X., Li Z., Wang H. Research on Vibration Suppression Method Based on Double Loop Position Feedback Control // *Sensors*. 2026. Vol. 26. Is. 4. Art. 1244. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/26/4/1244> (дата обращения: 14.07.2026). DOI: 10.3390/s26041244.
7. Kostov I. Tuning of Control Loops of Electric Drives in Mechatronic Systems // *Journal of the Technical University – Sofia, Plovdiv Branch, Bulgaria “Fundamental Sciences and Applications”*. 2020. Vol. 26. Is. 1. P. 1–6. URL: <https://journals.tu-plovdiv.bg/index.php/journal/article/view/186/22> (дата обращения: 14.07.2026).
8. Lukichev D. V., Demidova G. L. Features of Tuning Strategy for Field Oriented Control of PMSM Position Drive System with Two-Mass Load // *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*. 2016. Vol. 10. P. 88–94. URL: https://www.researchgate.net/publication/297049301_Features_of_tuning_strategy_for_field_oriented_control_of_PMSM_position_drive_system_with_two-mass_load (дата обращения: 14.07.2026).
9. Minárech P., Makyš P., Vittek J. PI-Controllers Determination for Vector Control Motion // *Technical Computing Bratislava* 2010. P. 1–7. [Электронный ресурс]. URL: https://www.humusoft.sk/docs/papers/tcb2010/070_minarech.pdf (дата обращения: 14.07.2026).
10. Lidozzi A., Solero L., Crescimbeni F., Di Napoli A. Direct Tuning Strategy for Speed Controlled PMSM Drives // 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. 2010. P. 1265–1270. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/224195475_Direct_tuning_strategy_for_speed_controlled_PMSM_drives (дата обращения: 14.07.2026). DOI: 10.1109/ISIE.2010.5637034.
11. Böcker J., Beineke S., Bähr A. On the Control Bandwidth of Servo Drives // 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications. 2009. P. 1–10. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/224600366_On_the_control_bandwidth_of_servo_drives (дата обращения: 14.07.2026).
12. Мостовской М. В., Слепцов В. В., Орлов В. П., Артемова С. В. Теоретическая оценка метрологических характеристик информационно-измерительных и управляющих систем электропривода // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2023. № 1. С. 5–16. URL: [https://imuk.pnzgu.ru/files/imuk.pnzgu.ru/01123\(1\).pdf](https://imuk.pnzgu.ru/files/imuk.pnzgu.ru/01123(1).pdf) (дата обращения: 14.07.2026). DOI: 10.21685/2307-5538-2023-1-1.
13. Busarello T. D. C., Bubshait A., Varaprasad O. V. S. R., Alsaleem A., Simões M. G. A Comprehensive Methodology of Field-Oriented Control Design with Parameter Variation Analysis for Interior Permanent Magnet Synchronous Machine Drives // *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. P. 89524–89541. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11006990/> (дата обращения: 22.07.2026). DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3571610.
14. Petru C.-D., Morariu F., Breaz R.-E., Crenganis M., Racz S.-G., Girjob C.-E., Bârsan A., Biris C.-M. Development of a Small CNC Machining Center for Physical Implementation and a Digital Twin // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. Is. 10. Art. 5549. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/10/5549> (дата обращения: 08.08.2026). DOI: 10.3390/app15105549.
15. Garza P., Perinpanayagam S., Aslam S., Wileman A. Qualitative Validation Approach Using Digital Model for the Health Management of Electromechanical Actuators // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. Is. 21. Art. 7809. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/21/7809> (дата обращения: 14.07.2026). DOI: 10.3390/app10217809.
16. Мостовской М. В., Слепцов В. В., Лемещенко С. М. Имитационная модель следящего электропривода многокоординатных обрабатывающих центров // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2025. № 3. С. 5–15. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-sledyaschego-elektroprivoda-mnogokoordinatnyh-obrabatvyvayuschih-tsentrov> (дата обращения: 14.07.2026). DOI: 10.21685/2307-5538-2025-3-1.
17. Пугачев А. А., Чуприна Н. В. Моделирование динамических режимов работы электроприводов с системой векторного управления синхронным двигателем // *Бюллетень результатов научных исследований*. 2023. № 3. С. 100–113. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-dinamicheskikh-rezhimov-raboty-elektroprivodov-s-sistemoy-vektornogo-upravleniya-sinhronnym-dvigatelem/viewer> (дата обращения: 23.07.2026). DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-100-113.
18. Nippatla V. R., Mandava S. Performance Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Transfer Function Model Using PID Controller Tuned by Ziegler-Nichols Method // *Results in Engineering*. 2025. Vol. 26. Art. 105460. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123025015300> (дата обращения: 23.07.2026). DOI: 10.1016/j.rineng.2025.105460.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.