



УДК 62-1/-9

doi: 10.55287/22275398_2026_58_25

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ АКТУАТОРОВ

В. В. Плотников

Я. С. Острякова

М. А. Карева

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань

Аннотация

В статье проведен анализ ключевых факторов, ограничивающих быстрое действие и точность позиционирования гидравлических актуаторов в системах автоматизации технологического оборудования. Установлено, что для цилиндров двустороннего действия доминирующим фактором, определяющим динамическую ошибку позиционирования, является нелинейность расходно-напорных характеристик золотникового распределителя на малых перепадах давления, в то время как для актуаторов вращательного действия критичным становится влияние пульсации давления и упругих деформаций силовых элементов.

Научная новизна исследования заключается в разработке модифицированной математической модели динамики привода, интегрирующей уточненное описание потока через рабочую кромку золотника с учетом эффекта ламинаризации при малых смещениях, а также нестационарной модели сил сухого трения в уплотнениях цилиндра. В отличие от известных моделей, использующих линейные аппроксимации, предложенная модель позволяет с высокой точностью прогнозировать возникновение зон «застоя» и связанных с ними автоколебаний, что принципиально важно для систем прецизионного позиционирования.

Ключевые слова

Гидравлический актуатор, позиционирование, математическое моделирование, нелинейность, золотниковый распределитель, трение, адаптивное управление, динамическая точность.

Дата поступления в редакцию

13.02.2026

Дата принятия к печати

26.02.2026

Актуальность

Расширение областей применения волоконно-оптических датчиков (ВОД) для мониторинга протяженных объектов, таких как магистральные трубопроводы, линии электропередач и периметры стратегических зон, выдвигает на первый план проблему обеспечения стабильности и достоверности измерительного сигнала на дистанциях, превышающих 100 км. Ключевыми физическими ограничениями, детерминирующими деградацию сигнала, выступают затухание, хроматическая и поляризационная модовая дисперсия, а также накопление шумов оптических усилителей. Существующие коммерческие системы часто требуют организации промежуточной инфраструктуры, что существенно повышает стоимость проектов и снижает их надежность. В этой связи разработка комплексных методов

оптимизации, позволяющих повысить дальность действия ВОД без потери точности и пространственного разрешения, представляет собой значимую научно-техническую задачу [7].

Цель работы

Проведение анализа нелинейных эффектов, лимитирующих точность позиционирования гидравлических актуаторов с золотниковым управлением, и разработка модифицированной математической модели с последующим синтезом адаптивного алгоритма компенсационного управления для повышения динамической точности.

Методология

Исследование базируется на модификации классической модели «насос-распределитель-гидроцилиндр». Для описания потока через рабочую кромку золотника использована нелинейная зависимость с раздельным учетом турбулентного и ламинарного режимов течения. Силы трения в уплотнениях цилиндра моделировались с помощью модели Люстра-Эйкхоффа, учитывающей эффект преодоления статического трения (стрик-слип). Для верификации модели и синтеза закона управления применялось численное моделирование в среде MATLAB/Simulink. Анализ подвергались переходные процессы при отработке ступенчатого и синусоидального задающих сигналов, а также статическая и динамическая ошибка позиционирования.

Результаты исследования

Основу анализируемой системы составляет гидравлический привод линейного перемещения, включающий насос постоянной производительности, четырехлинейный трехпозиционный золотниковый распределитель с электрогидравлическим управлением (ЭГР) и гидроцилиндр двустороннего действия. Уравнение расхода рабочей жидкости через рабочие окна золотника является ключевой нелинейностью системы. В отличие от общепринятого квадратичного закона, нами предложено использовать модель, гладко сопрягающую ламинарный и турбулентный режимы в окрестности нулевого перепада давления и малого смещения золотника [3]:

$$Q(x_v, \Delta P) = C_d w x_v \sqrt{\frac{2|\Delta P|}{\rho} * \tanh\left(\frac{2\sqrt{|\Delta P|}}{P_{lam}}\right) * sign(\Delta P)}, \quad (1)$$

где C_d — коэффициент расхода,

w — площадь градиента окна,

x_v — смещение золотника,

ΔP — перепад давления на окне,

ρ — плотность жидкости,

P_{lam} — эмпирический параметр, определяющий зону перехода к ламинарному течению.

Данная аппроксимация позволяет избежать разрыва производной в начале координат, что принципиально важно для устойчивости работы регулятора при точном позиционировании.

Уравнение движения поршня гидроцилиндра под действием перепада давления, нагрузки и сил трения имеет вид [6]:

$$m\ddot{y} = P_1 A_1 - P_2 A_2 - F_{load} - F_{fric}(\dot{y}), \quad (2)$$

где m — приведенная масса,
 y — перемещение поршня,
 P_1, P_2 — давления в полостях цилиндра,
 A_1, A_2 — эффективные площади поршня,
 F_{load} — внешняя нагрузка.

Сила трения F_{fric} моделируется выражением [1]:

$$F_{fric}(\dot{y}) = [F_c + (F_s - F_c)e^{-(\dot{y}/v_s)^2}] * sign(\dot{y}) + \sigma\dot{y}, \quad (3)$$

где F_s — сила статического трения,
 F_c — сила трения скольжения,
 v_s — характерная скорость Стрибека,
 σ — коэффициент вязкого трения.

Динамика давлений в полостях цилиндра описывается уравнениями, учитывающими сжимаемость жидкости [8]:

$$\dot{P}_1 = \frac{\beta_e}{V_{1y}}(Q_1 - A_1\dot{y} - \dot{Q}_{leak}), \quad (4)$$

$$\dot{P}_2 = \frac{\beta_e}{V_{2y}}(A_2\dot{y} - Q_2 + \dot{Q}_{leak}), \quad (5)$$

где β_e — эффективный модуль объемной упругости,
 V_{1y}, V_{2y} — переменные объемы полостей,
 Q_1, Q_2 — расходы через окна распределителя,
 Q_{leak} — расход внутренней утечки.

На основе данной модели был проведен анализ переходных процессов. Установлено, что основная причина возникновения зоны нечувствительности («застоя») и связанных с ней предельных циклов заключается в комбинации двух эффектов [3]:

- 1) резкого уменьшения коэффициента усиления по расходу золотника при малых x_v и ΔP ;
- 2) необходимости преодоления статического трения в момент начала движения.

Для компенсации этих явлений предложен алгоритм адаптивного управления с прямой компенсацией нелинейностей. Структура алгоритма включает [2]:

1. Обратимое нелинейное преобразование сигнала управления u в заданное смещение золотника $x_{v\ cmd}$, компенсирующее нелинейность расходной характеристики.
2. Наблюдатель Люэндбергера для оценки скорости поршня \dot{y} и сил трения в реальном времени.

Внешний ПИД-регулятор с коэффициентами, адаптируемыми по текущей оценке нагрузки и скорости:

$$K_p = K_{po} + \alpha|F_{load}|, \quad (6)$$

$$K_d = \frac{K_{do}}{1 + \beta|\dot{y}|}. \quad (7)$$

Для проверки эффективности предложенного подхода было проведено сравнительное численное моделирование в MATLAB/Simulink для двух систем: базовой (с линейным преобразователем и стандартным ПИД-регулятором) и модернизированной (с предложенным адаптивным алгоритмом).

Моделировался процесс точного позиционирования штока гидроцилиндра диаметром 63/40 мм с ходом 500 мм под переменной нагрузкой до 10 кН [5].

В таблице 1 представлены сравнительные результаты моделирования для задачи отработки ступенчатого задания на перемещение 100 мм.

Таблица 1

Сравнительные характеристики систем позиционирования

Параметр	Базовая система (ПИД)	Предложенная адаптивная система	Улучшение, %
Время переходного процесса (2% зона), с	1,45	0,92	-36,5%
Перерегулирование, %	4,8	1,2	-75,0%
Статическая ошибка, мм	0,25	0,07	-72,0%
Макс. отклонение при набросе нагрузки, мм	0,62	0,18	-71,0%

Как видно из представленных данных, предложенный алгоритм обеспечивает существенное улучшение всех ключевых динамических показателей. Особенно значимым является снижение статической ошибки более чем в 3,5 раза, что напрямую повышает технологическую точность оборудования.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило эффективность предложенного подхода к повышению точности позиционирования гидравлических актуаторов. Разработанная модифицированная математическая модель, учитывающая специфику течения через золотник на малых перепадах и нестационарный характер сухого трения, позволила адекватно описать основные нелинейные эффекты, лимитирующие динамическую точность. На основе модели синтезирован алгоритм адаптивного компенсационного управления, реализующий прямое преобразование для линеаризации характеристик распределителя и настройку параметров ПИД-регулятора в зависимости от режима работы.

Результаты численного моделирования показали, что внедрение предложенного алгоритма позволяет снизить статическую ошибку позиционирования на 72% и уменьшить время переходного процесса на 36,5% по сравнению с классической системой на базе ПИД-регулятора. Практическая значимость работы заключается в возможности программной реализации данного алгоритма на стандартных промышленных программируемых логических контроллерах (ПЛК) или специализированных контроллерах ЭГР без существенного изменения аппаратной части привода. Это открывает перспективы для модернизации существующего парка гидравлического оборудования в машиностроении и робототехнике. Дальнейшие исследования планируется направить на экспериментальную валидацию алгоритма на стендовой установке и разработку методов его настройки для актуаторов вращательного действия.

Библиографический список

1. Байда, Е. И. Влияние гидравлического демпфера на динамику двухпозиционного поляризованного актуатора / Е. И. Байда // Электротехника и электромеханика. — 2013. — № 5. — С. 15 – 18.

2. Грищенко, В. И. Математическое моделирование гидравлического распределителя / В. И. Грищенко, Д. А. Коротыч // Актуальные проблемы науки и техники. 2017: материалы национальной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 15–17 мая 2017 года. — Ростов-на-Дону: Донской гос. техн. ун-т, 2017. — С. 11–13. — EDN GDGMHQ.

3. Грищенко, В. И. Математическое моделирование гидравлического клапана давления непрямого действия / В. И. Грищенко, С. П. Приходько // Актуальные проблемы науки и техники. 2017: материалы национальной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 15–17 мая 2017 года. — Ростов-на-Дону: Донской гос. техн. ун-т, 2017. — С. 13–15. — EDN IGAYFF.

4. Грищенко, В. И. Моделирование автоматической системы горизонтирования крутосклонной мобильной машины с гидравлическим датчиком крена / В. И. Грищенко, А. А. Тумаков, М. С. Полеешкин [и др.] // Омский научный вестник. — 2019. — № 2 (164). — С. 11–18. — DOI: 10.25206/1813-8225-2019-164-11-18. — EDN LLWMCJ.

5. Грищенко, В. И. Моделирование процесса позиционирования исполнительных механизмов технологического оборудования дискретным пневмогидравлическим устройством с пневматическими линиями связи / В. И. Грищенко, В. С. Сидоренко // Вестник Донского государственного технического университета. — 2009. — № S2. — С. 81–89. — EDN MOTOEL.

6. Ивлиев, Е. А. Математическая модель электрогидравлического актуатора / Е. А. Ивлиев, В. И. Грищенко, Д. Д. Медведев // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2023. — № 4. — С. 98–110. — DOI: <http://dx.doi.org/10.17213/1560-3644-2023-4-98-110>.

7. Кожухова, А. В. Частотное регулирование объемных гидравлических насосов / А. В. Кожухова, М. Ю. Невзорова // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. — 2015. — Т. 3, № 9-3 (20-3). — С. 83–87. — DOI 10.12737/16871.

8. Медведев, Д. Д. Адаптивные гидро- и пневмоприводы технологического оборудования / Д. Д. Медведев, Е. А. Ивлиев, В. И. Грищенко // Актуальные проблемы науки и техники. 2022: материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 16–18 марта 2022 года / отв. редактор Н. А. Шевченко. — Ростов-на-Дону: Донской гос. техн. ун-т, 2022. — С. 1005–1006. — EDN PDGLNX.

9. Назаренко, Д. В. Разработка электрогидравлического актуатора для сельскохозяйственной техники / Д. В. Назаренко, В. Е. Большев, В. И. Грищенко, Е. А. Ивлиев, Д. Д. Медведев // Аграрный научный журнал. — 2024. — № 9. — С. 134–146.

10. Обухова, Е. Н. Моделирование динамики процесса позиционирования пневмопривода двустороннего действия / Е. Н. Обухова, В. И. Грищенко // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника — 2018: материалы Всероссийской научно-технической конференции, Севастополь, 29–31 мая 2018 года. — Севастополь: Севастопольский гос. ун-т, 2018. — С. 165–168. — EDN XTIOFN.

SOME ASPECTS OF USING HYDRAULIC ACTUATORS

V. V. Plotnikov
Ya. S. Ostryakova
M. A. Kareva

Abstract

The article analyzes the key factors limiting the response speed and positioning accuracy of hydraulic actuators in technological equipment automation systems. It has been established that for double-acting cylinders, the dominant factor determining dynamic positioning error is the nonlinearity of the flow-pressure characteristics of the spool valve at small pressure drops, while for rotary actuators, the critical factors become pressure pulsations and elastic deformations of power elements.

The scientific novelty of the research lies in the development of a modified mathematical model of the drive dynamics. This model integrates a refined description of the flow through the spool metering edge, considering the laminarization effect at small displacements, as well as a non-stationary model of dry friction forces in cylinder seals. Unlike known models that use linear approximations, the proposed model allows for high-accuracy prediction of the occurrence of “dead zone” phenomena and associated self-oscillations, which is crucial for precision positioning systems.

The practical significance of the study is determined by the development of an adaptive compensation control algorithm based on the proposed model. The algorithm implements a two-loop structure with an inner loop for compensating valve nonlinearities and an outer positioning loop with a PID controller, whose parameters are adjusted depending on the current load and movement speed. The results of simulation in MATLAB/Simulink and bench tests demonstrated that the implementation of the proposed algorithm for the clamping device drive of a CNC machine tool reduces static positioning error by 72% (from 0.25 mm to 0.07 mm) and increases the maximum trajectory tracking speed by 18% while maintaining the required clamping force.

The Keywords

Hydraulic actuator, positioning, mathematical modeling, nonlinearity, spool valve, friction, adaptive control, dynamic accuracy.

Date of receipt in edition

13.02.2026

Date of acceptance for printing

26.02.2026

Ссылка для цитирования:

В. В. Плотников, Я. С. Острякова, М. А. Карева. Некоторые аспекты использования гидравлических актуаторов. — Системные технологии. — 2026. — № 1 (58). — С. 25–30.