

## Алгоритм адаптивного управления электрогидравлическим приводом многостепенного манипулятора

А. Н. Лукичев<sup>1✉</sup>, В. Е. Кузнецов<sup>1</sup>, Д. М. Филатов<sup>1</sup>, А. А. Трутс<sup>2</sup>, П. А. Лошицкий<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники  
и технической кибернетики (ФГАНУ «ЦНИИ РТК»), Санкт-Петербург, Россия

✉ anlukichev@etu.ru

**Аннотация.** Представлено построение алгоритма адаптивного управления отдельным звеном электрогидравлического манипулятора, включая метод повышения динамических качеств звеньев электрогидравлических манипуляторов средствами адаптивного управления со статической компенсацией нелинейности золотникового распределителя. Приведено обоснование предложенного подхода к управлению отдельными звеньями электрогидравлического манипулятора. Представлены результаты исследования системы на макетном образце звена электрогидравлического манипулятора. Исследование проводилось с применением MatLab Simulink Desktop Real-Time Connected IO Mode с многофункциональной платой аналогового ввода-вывода Advantech PCI 1711U с последующим тестированием алгоритмов на аппаратной платформе на основе микроконтроллера STM32G474RETx.

**Ключевые слова:** электрогидравлический привод, гидравлический манипулятор, адаптивное управление, эталонная модель

**Для цитирования:** Алгоритм адаптивного управления электрогидравлическим приводом многостепенного манипулятора / А. Н. Лукичев, В. Е. Кузнецов, Д. М. Филатов, А. А. Трутс, П. А. Лошицкий // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 4. С. 80–89. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-4-80-89.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках гос. задания на 2024 г. «Поиск путей создания глубоководного гидравлического манипулятора для подводно-технических работ, в том числе в условиях ионизирующего излучения» (FNRG-2022-0021, рег. № 1021101316133-1-2.2.2).

Original article

## Algorithm for Adaptive Control of the Electrohydraulic Drive Multi-Stage Manipulators

A. N. Lukichev<sup>1✉</sup>, V. E. Kuznetsov<sup>1</sup>, D. M. Filatov<sup>1</sup>, A. A. Truts<sup>2</sup>, P. A. Loshitskiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Central Research and Development Institute of Robotics and Technical Cybernetics  
(Central Research Institute of RTK), Saint Petersburg, Russia

✉ anlukichev@etu.ru

**Abstract.** The article presents the construction of an algorithm for adaptive control of a separate link of an electro-hydraulic manipulator, including a method for improving the dynamic qualities of links of electrohydraulic manipulators by means of adaptive control with static compensation for the nonlinearity of a bearing distributor. The substantiation of the proposed approach to the control of individual links of an electrohydraulic manipulator is given. The results of the study of the system on a model sample of an electrohydraulic manipu-

lator link are presented. The study was conducted using MatLab Simulink Desktop Real-Time Connected IO Mode with a multifunctional Advantech PCI 1711U analog I/O board, followed by testing algorithms on a hardware platform based on the STM32G474RETx microcontroller.

**Keywords:** electrohydraulic drive, hydraulic manipulator, adaptive control, reference model

**For citation:** Algorithm for Adaptive Control of the Electrohydraulic Drive Multi-Stage Manipulators / A. N. Lukichev, V. E. Kuznetsov, D. M. Filatov, A. A. Truts, P. A. Loshitskiy // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 4. P. 80–89. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-4-80-89.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Financing:** The work was completed within the framework of the state assignment for 2024 «Search for ways to create a deep-sea hydraulic manipulator for underwater technical work, including in conditions of ionizing radiation» (FNRG-2022-0021, reg. No. 1021101316133-1-2.2.2).

**Введение.** Применению электрогидравлических манипуляторов отводится важная роль в особо тяжелых условиях. К ним предъявляются повышенные требования по обеспечению высокой точности при высокой мощности. Однако из-за нелинейностей, присущих электрогидравлическим системам, точность манипулятора – это общий недостаток по сравнению с манипуляторами с электромеханическим приводом. В данной статье предлагается метод повышения динамических качеств звеньев электрогидравлических манипуляторов (ЭГМ) средствами адаптивного управления со статической компенсацией нелинейности золотникового распределителя. Приведено обоснование предложенного подхода к управлению отдельными звеньями электрогидравлического манипулятора. Представлены результаты исследования системы на макетном образце звена ЭГМ.

В робототехнике в основном используются электромеханические приводы вследствие их высокой производительности, точности и удобства в управлении, тем не менее, у этой технологии есть свои ограничения. Главный недостаток связан с невозможностью одновременного достижения относительно высокого усилия (крутящего момента) при высокой скорости перемещения рабочего органа в ограниченном объеме без использования редукторов, которые в свою очередь снижают эффективность и увеличивают общий вес системы.

К основным недостаткам относится и необходимость использования редукторов. Эти устройства, хотя и необходимы для работы электроприводов, снижают их эффективность и увеличивают общий вес системы. Причина кроется в ограниченном крутящем моменте, который способен развить электропривод. Экстремальные условия окружающей среды – радиация, жидкости, высокое давление и т. п., представляют особую про-

блему для применения электромеханических преобразователей в составе этих устройств. В водной среде возникает необходимость повышенной защиты от коррозии и применения дополнительной изоляции. Высокие уровни радиации вызывают деградацию изоляционных свойств обмоток двигателей, что приводит к снижению их эффективности и возможным отказам. Это ограничивает использование электроприводов в областях робототехники, связанных с работой в агрессивных условиях [1].

Указанных недостатков частично лишены электрогидравлические приводы (ЭГП), однако им присущи свои особенности. Динамика гидравлических систем существенно нелинейна, так как в системе присутствуют неопределенности [2]–[5], которые можно разделить на параметрические неопределенности и неопределенные нелинейности. Параметрические неопределенности включают инерцию вращения, массу, коэффициент трения и модуль объемной упругости рабочей жидкости. Неопределенные нелинейности относятся к некоторым физическим факторам, нелинейные функции которых неизвестны и не могут быть заранее спрогнозированы, например: внешние возмущения, внутренние утечки рабочей жидкости, нелинейная динамика формирования перепада давления на выходе золотникового распределителя.

**Математическое описание линеаризованного представления ЭГП с дроссельным управлением.** Уравнения движения исполнительного механизма «гидрораспределитель–гидроцилиндр» представляют собой уравнение баланса потоков рабочей жидкости исполнительного механизма и уравнение движения штока гидроцилиндра (ГЦ) с рулевой поверхностью.

Силы, развиваемые гидроцилиндром, при перемещении звена манипулятора,  $F_{\text{ЭГП}} = F_{\text{и}} + F_{\text{в.т}} = A_{\text{п}} p_F$ , где  $F_{\text{ЭГП}}$  – сила, развиваемая электро-

гидравлическим приводом ЭГП;  $p_F = p_1 - p_2$  – перепад давления на поршне исполнительного механизма привода от действия внешней нагрузки  $F_H$ ;  $F_H = m \frac{d^2 X_{шт}}{dt^2}$  – инерционная составляющая нагрузки ЭГП;  $m$  – масса штока с поршнем гидродвигателя;  $A_{п}$  – площадь поршня гидроцилиндра;  $X_{шт}$  – перемещение штока гидроцилиндра ЭГП;  $F_{в.т} = b \frac{dX_{шт}}{dt}$  – сила вязкого трения ( $b$  – коэффициент вязкого трения).

Уравнение баланса потоков рабочей жидкости в ветвях исполнительного механизма. В линейном приближении расход рабочей жидкости, поступающей в ГЦ со стороны гидрораспределителя электрогидравлического усилителя (ЭГУ), можно записать следующим образом:

$$\Delta Q_3 = \frac{\partial Q_3}{\partial X_3} \Delta X_3 + \frac{\partial Q_3}{\partial p_F} \Delta p_F = K_{Qx} \Delta X_3 + K_{Qp} \Delta p_F,$$

где  $K_{Qx} = \frac{\partial Q_3}{\partial X_3}$  – коэффициент усиления гидрораспределителя по расходу;  $K_{Qp} = \frac{\partial Q_3}{\partial p_F}$  – коэффициент или наклон механической (нагрузочной) характеристики гидрораспределителя;  $Q_3$  – расход рабочей жидкости через гидрораспределитель;  $X_3$  – перемещение золотника.

При описании движения штока гидроцилиндра будем считать, что [6] динамический процесс проходит в окрестностях среднего положения в установившемся движении.

Нелинейная функция расхода  $Q = f(p_F, X_3)$  в этом случае раскладывается в ряд Тейлора в окрестности установившегося режима, с описанием в виде членов разложения первого порядка малости  $\Delta Q = \frac{\partial Q}{\partial X_3} \Delta X_3 + \frac{\partial Q}{\partial p_F} \Delta p_F$ . Условием линеаризации считается неразрывность струи в камерах.

Уравнение баланса потоков рабочей жидкости гидрораспределителя и гидроцилиндра можно записать следующим образом:  $Q_{ГЦ} = Q_v + Q_{сж} + Q_r$ ,

где  $Q_v = A_{п} \frac{dX_{шт}}{dt}$  – расход, идущий на создание скорости штока  $X_{шт}$  привода звена манипулятора;

$Q_{сж} = \frac{A_{п} X_{шт}}{2E} \frac{dp_F}{dt}$  – расход, идущий на компенсацию сжимаемости рабочей жидкости;  $Q_r = r p_F$  – расход, идущий на компенсацию утечек и перетечек ( $r$ ) рабочей жидкости,  $E$  – модуль объемной упругости рабочей жидкости,  $Q_{ГЦ}$  – суммарный расход жидкости в гидроцилиндре.

При выполнении условия неразрывности потока гидравлической жидкости в гидравлическом исполнительном механизме  $Q_3 = Q_{ГЦ}$  имеем:

$$K_{Qx} \Delta X_3 + K_{Qp} \Delta p_F = A_{п} \frac{dX_{шт}}{dt} + \frac{A_{п} X_{шт.п}}{2E} \frac{dp_F}{dt} + r p_F,$$

или в операторной форме

$$K_{Qx} X_3 + K_{Qp} p_F = A_{п} S + \frac{A_{п} X_{шт.п}}{2E} S p_F + r p_F.$$

Динамика клапана пропорционального управления ЭГУ приближенно может быть представлена в виде передаточных функций [6]

$$W_{ЭГУ}(S) = \frac{X_3}{I_y} = \frac{K_{ЭГУ}}{T_{ЭГУ} S + 1}$$

и электронного усилителя [6]

$$W_y(S) = \frac{U_{\theta}}{I_y} = k_y,$$

где  $k_y$  – коэффициент усиления;  $U_{o.c} = k_{o.c} X_{шт}$  – сигнал обратной связи;  $U_{\theta} = U_{вх} - U_{o.c}$  – сигнал рассогласования;  $k_{o.c}$  – коэффициент усиления в

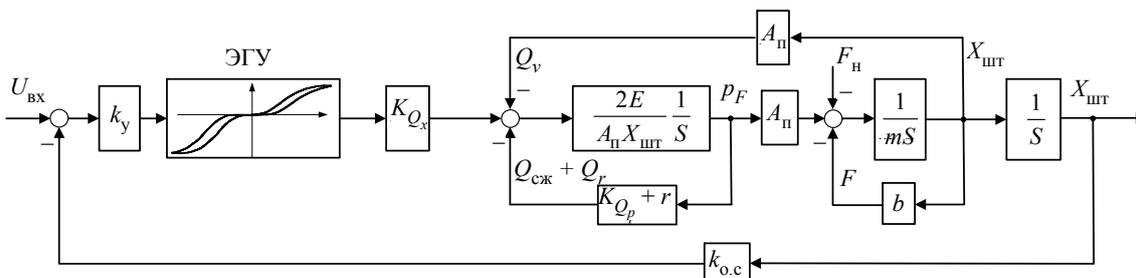


Рис. 1. Линеаризованная схема электрогидравлического привода звена манипулятора  
 Fig. 1. Linearized diagram of the electrohydraulic drive of the manipulator joint

цепи обратной связи;  $U_{\text{вх}}$  – напряжение на входе ЭМП;  $I_y$  – ток управления ЭМП.

Структурная схема линейной модели ЭГП с дроссельным регулированием представлена на рис. 1.

Уравнение обмотки электромеханического преобразователя [7]:

$$U_{\text{вх}} - K_{\text{пЭ}} \frac{dk}{dt} = RI_y + L \frac{dI_y}{dt},$$

$K_{\text{пЭ}}$  – коэффициент противо-ЭДС ЭМП.

Линеаризованное уравнение расхода золотникового распределителя ЭГУ:

$$K_{Qh} h + K_{Qp} P_d = A_3 \frac{dX_3}{dt} + \frac{V}{2E} \frac{dP_d}{dt},$$

где  $K_{Qh} = \left( \frac{\partial Q}{\partial h} \right)_{h=0}$  – коэффициент расхода;

$K_{Qp} = \left( \frac{\partial Q}{\partial P_d} \right)_{X_3=0}$  – коэффициент скольжения по

давлению;  $V$  – объем каналов золотника.

Уравнение сил, действующих на золотник,

$$A_3 P_d = C_3 X_3,$$

где  $C_3$  – жесткость пружины золотника;  $A_3$  – площадь поперечного сечения золотника;  $P_d$  – перепад давления в золотнике.

Уравнение сил, действующих на якорь электромеханического преобразователя

$$K_{FI} I_y = C_{\text{ЭМП}} h + R_r,$$

где  $R_r$  – силовое воздействие жидкости на золотник, которое зависит от давления нагрузки  $R_r = k_i P_d$ ;  $k_i$  – гидродинамический коэффициент;  $C_{\text{ЭМП}}$  – приведенная жесткость электромеханической характеристики ЭМП;  $h$  – перемещение якоря ЭМП;  $R, I$  – параметры обмотки управления ЭМП.

Результатирующее математическое описание замкнутого контура управления положением золотника ЭГУ представляется звеном с порядком представления уравнений не выше второго. Упрощенное представление ЭГУ, содержащего как минимум два апериодических звена, а также зону нечувствительности в дифференциальной схеме построения ЭГУ с двумя ЭМП, требует организации мероприятий по уменьшению статических ошибок позиционирования ЭГУ [6].

Вышеописанный ЭГУ с золотниковым распределителем, так называемым пропорциональным распределителем, имеет переходные и ча-

стотные характеристики, определяемые наличием статической ошибки по положению золотника  $X_3$  с преимущественно апериодической реакцией на ступенчатое воздействие.

В созданных условиях для высокоточного управления положением ЭГП манипулятора целесообразно сформировать дополнительный контур управления с астатизмом 1-го порядка.

**Разработка адаптивного алгоритма увеличения точности гидроусилителя для расширения диапазона регулирования ЭГП и уменьшения статических ошибок гидроусилителя.** Вводится постановка задачи – уменьшить влияние инерции объекта достаточно полно, с точки зрения технической реализуемости, за счет введения регуляторов так называемых систем подчиненного регулирования привода [7].

При настройке регулятора будем стремиться приблизить амплитудную характеристику замкнутого контура ЭГУ к единице в широкой полосе частот.

Это обеспечивает высокую точность воспроизведения контуром регулирования управляющих воздействий в ограниченном, реализуемом диапазоне частот, там, где амплитудная характеристика замкнутой системы близка к единице.

Для объектов регулирования, не содержащих интеграторов, обычно рассматривается оптимизация на оптимум «по модулю» (технический) с реализацией замкнутых контуров с передаточной функцией в виде [7]

$$W(p)_3 = \frac{b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0}.$$

Передаточная функция разомкнутого контура регулирования, настроенного на «модульный» оптимум (МО), имеет вид

$$W(p)_{\text{МО}} = \frac{1}{2T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1)}.$$

После анализа линеаризованной структурной схемы ЭГП, на рис. 1 в частотной области работы привода (до 2–3 Гц) «объектом управления» при синтезе регулятора контура положения можно считать только интегрирующее звено. Динамические процессы сжимаемости жидкости, а также динамические процессы, связанные с движением массы поршня (пренебрежимо малая масса), не вносят значительной инерционности в движение привода, могут быть учтены в постоянной времени звена с малой постоянной времени, в качестве которой берется постоянная времени внутреннего контура ЭГУ.

Настроенная на оптимум «по модулю» система с апериодическим объектом (пропорциональным клапаном) реализована в контуре ЭГУ по положению золотника.

Во внешнем контуре положения ЭГП в составе объекта имеется интегрирующее звено, и при настройке на оптимум «по модулю» проявится статическая ошибка, поэтому целесообразно применение другой типовой настройки, называемой «симметричным» оптимумом.

Передачная функция разомкнутого контура ЭГП в этом случае имеет вид [7]

$$W(p)_{CO} = \frac{4T_{\mu}p + 1}{8T_{\mu}^2 p^2 (T_{\mu}p + 1)}.$$

При такой настройке модуль передаточной функции замкнутой системы ЭГП примет вид [7]

$$W(p)_3 = \frac{4T_{\mu} + 1}{8T_{\mu}^3 p^3 + 8T_{\mu}^2 p^2 + 4T_{\mu}p + 1}$$

и тоже будет стремиться к единице в ограниченной области низких рабочих частот. Однако введение астатизма 2-го порядка в контур положения привода при наличии нелинейных характеристик с люфтом может приводить к автоколебательным процессам, что ограничивает использование интегральной составляющей регулятора положения пропорциональной частью.

Для снижения противоречий (между быстрым действием и перерегулированием) при настройке контурных регуляторов целесообразно разнесение по времени (частоте) быстрых и медленных процессов. Это позволяет при синтезе адаптивного закона управления использовать «экзомодельное» [8] построение модели объекта управления с ограниченной параметрической неопределенностью в виде произведения подсистем с медленной и быстрой динамикой. В системе с апериодической настройкой допустимо отделить один вещественный полюс от остальной быстрой части системы [8], который формализуем в форме опера-

$$\text{тора } F = \frac{(\lambda D + 1)^p}{(\tau D + 1)^k}, \quad p \leq k, \quad D = \frac{d}{dt} \quad [8].$$

Представление основной части системы с вещественным полюсом выразим как

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -ax + bF_M u + f = \\ &= -a_0 x + b_0 F_M u + (a_0 - a)x + (b - b_0)F_M u + f, \\ \dot{x} &= -a_0 x + b_0 F_M u + \delta, \\ \delta &= (a_0 - a)x + (b - b_0)F_M u + f. \end{aligned}$$

В качестве модели выберем представление, называемое моделью с настройкой:

$$\dot{\hat{x}} = -(a_0 + g_1)\hat{x} + g_1 x + b_0 F_M u + z,$$

где  $a, b$  – параметры управляемого объекта, в общем случае зависящие от  $x, u, t, f = f(t)$  – возмущение, ограниченная функция;  $F_M(D) = F_M$  – «быстрая» подсистема в операторном описании,  $u = v + \mu, v = v(t)$  – входное воздействие,  $\mu = \mu(t)$  – адаптивное управление. Идентификационный подход используется при синтезе адаптивного закона на основе модели с настройкой. Уравнение настраиваемой модели медленной подсистемы – части экзомодели, использует оценку  $\hat{x}(t)$  – переменная идентификатора состояния;  $g_1$  – коэффициент выбирается из условий выбора динамики наблюдателя;  $z = z(t)$  – сигнал адаптации.

Из ошибки  $e(t), e = x - \hat{x}$ , а также из приведенных ранее выражений получим дифференциальное уравнение  $\dot{\hat{e}} = -(a_0 + g_1)\hat{e} + \delta - z$ .

Рассмотрим функцию Ляпунова

$$V(\hat{e}) = 0.5\hat{e}^2.$$

Закон адаптации сигнала  $z = z(t)$  выбирается из уравнения производной по времени этой функции

$$\dot{V}(\hat{e}) = -(a_0 + g_1)\hat{e}^2 + \hat{e}\delta - h|\hat{e}|,$$

по условию максимальной скорости убывания функции Ляпунова  $z = h \operatorname{sgn} \hat{e}$ .

Тогда сигнальная настройка модели выполняется при выполнении  $h \geq \|\delta\|$ , что означает экспоненциальную сходимость в целом ошибки идентификации системы.

Уравнение движения объекта средствами адаптивного сигнала  $\mu$  имеет вид

$$\dot{x} = -a_0 x + b_0 F_M r - b_0 F_M b_0^{-1} \tilde{F}_M z + \delta.$$

Для компенсации влияния динамики  $F_M$  «быстрой» подсистемы потребуется каскадное соединение с оператором  $F_M^{-1}$  [8], кроме того, последние два слагаемых определяют ошибку  $\theta_{\delta} = \delta - \hat{\delta}$  при фильтрации релейного адаптивного закона до осредненного при компенсации аналогового сигнала невязки  $\delta$  разрывным адаптивным сигналом  $z$ . Поэтому адаптивный закон управления объектом определяется в виде

$$\begin{aligned} \mu &= -b_0^{-1} \tilde{F}_M z, \quad z = h \operatorname{sgn} \hat{e}, \\ \tilde{F}_M(D) &= F_M^{-1}(D) \Delta_\tau, \\ \Delta_\tau &= \prod_{i=0}^{k-p} \frac{1}{\tau_i D + 1}, \\ \tau_i &= T/2^i, \quad D = d/dt. \end{aligned}$$

Для оценки влияния введенных фильтров в закон адаптивного управления вводится функция Ляпунова  $V = \gamma^2$  в форме уравнения возмущенного движения  $\dot{\gamma} = -a_0 \gamma + \theta_\delta$ , где  $\gamma = x$ . Тогда имеем  $\dot{V} = -2a_0 V + 2\theta_\delta \sqrt{V}$  (после замены  $V = \gamma^2$  имеем  $\dot{\gamma} = -a_0 \gamma + \theta_\delta$  и, как результат,

$$y = y_0 e^{-a_0(t-t_0)} + (\theta_\delta/a_0) / [1 - e^{-a_0(t-t_0)}].$$

Следует заметить, что при  $t \rightarrow \infty$  решение ограничено  $y \leq y_0 e^{-a_0(t-t_0)} + \theta_\delta/a_0$ ,  $y_\infty = \theta_\delta/a_0$ , поэтому имеется диссипативность процессов адаптации  $\sqrt{\theta_\delta/a_0}$ ,  $\rho_\infty \leq \tau M_\delta$ ,  $\sup_t \|\delta\| \leq M_\delta$ ,  $M_\delta = \text{const}$  – предельное множество, радиус которого определяется постоянной времени [8].

*Замечание.* Для объектов управления (в статье – электрогидравлический усилитель, а также отдельно ЭГП) в качестве подсистем быстрых движений будут рассмотрены операторы

$$F = \frac{(\lambda D + 1)^p}{(\tau D + 1)^k}, \quad p \leq k, \quad D = \frac{d}{dt} \quad \text{при } k \leq 2 \text{ [8].}$$

Компоновка системы управления ЭГП дроссельного регулирования с ЭГУ с клапаном прямого действия с адаптивными алгоритмами в контурах ЭГУ и ЭГП, приведенная на рис. 2, включает в себя регулятор положения золотника ЭГУ с астатизмом 1-го порядка, адаптивный регулятор

(AP<sub>1</sub>) ЭГУ, регулятор положения ЭГП, включающий в себя формирователь крутизны регулировочной характеристики гидроцилиндра (ФП), пропорционально-интегрально-дифференциальный (коэффициенты  $k_p, k_i, k_d$ ) регулятор положения штока ЭГП, адаптивный регулятор ЭГП (AP<sub>2</sub>).

Включение интегрального регулятора положения ЭГУ совместно с AP<sub>1</sub> дает возможность исключить статическую ошибку положения золотника ЭГП, что увеличивает точность регулирования servосистемы. Возможность включения интегральной составляющей в ПИД-регулятор положения совместно с AP<sub>2</sub> позволяет исключать статическую ошибку при линейном изменении входного управляющего сигнала, а включение нелинейной характеристики ФП способствует упорядочению в обе стороны переходных характеристик гидродвигателя при его работе в динамике, кроме того, наличие формирователя форсированного управления позволяет при необходимости ускорить реакции.

**Описание экспериментальной установки.** На рис. 3 представлены фотографии экспериментальной установки. На этапе получения идентификационных характеристик оборудования и определения структуры и параметров системы управления использовано аппаратно-программное решение на основе MatLab Simulink Desktop Real-Time Connected IO Mode с применением платы высокоскоростного ввода-вывода Advantech PCI 1711U.

В качестве целевой платформы используется плата управления двумя звеньями манипулятора на базе микроконтроллера STM32G474RET6 (рис. 3, 2). Управление гидроцилиндром реализовано ЭГУ с пропорциональным управлением АН-4WREE6E08-20S/G24K31/F1V (рис. 3, 4), исполнительный орган – гидроцилиндр ГЦ 045.030.0125.22.11 с датчиком положения ТЛ-С1-А10-005-0-Т0-XXX-Н32-10-М18-ПК2-ТВ(5)-0 (рис. 3, 3).

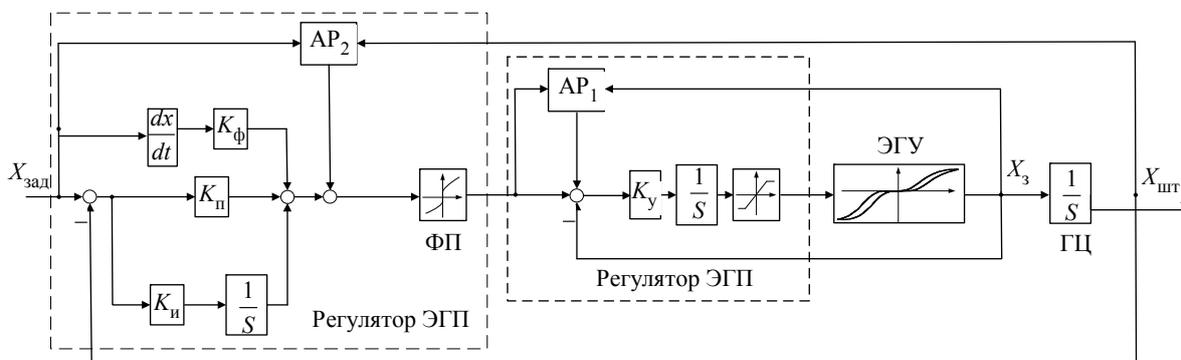


Рис. 2. Компоновка системы управления ЭГП звена манипулятора  
 Fig. 2. Layout of the control system for the electrohydraulic drive of the manipulator joint

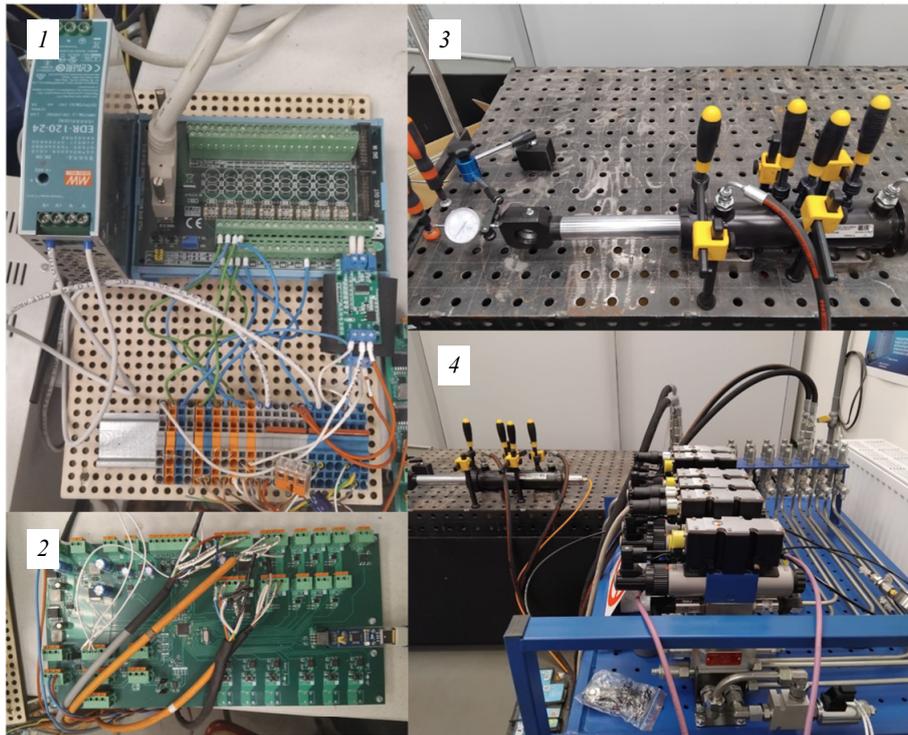


Рис. 3. Экспериментальная установка  
 Fig. 3. Experimental setup

**Исследование динамических характеристик привода с использованием временных и частотных характеристик для определения рабочего диапазона и точностных характеристик привода по положению.** На рис. 4 приведены осциллограммы переходных процессов при отработке перемещения штока гидроцилиндра по трем точкам с трапецеидальным заданием профи-

ля скорости [9]. На рис. 5 приведены осциллограммы переходных процессов при отработке перемещения штока гидроцилиндра при синусоидальном задании положения.

Результаты переходных характеристик указывают на увеличение точности ЭГП (рис. 5) за счет уменьшения статической ошибки золотникового ЭГУ (рис. 4) средствами адаптивного управления

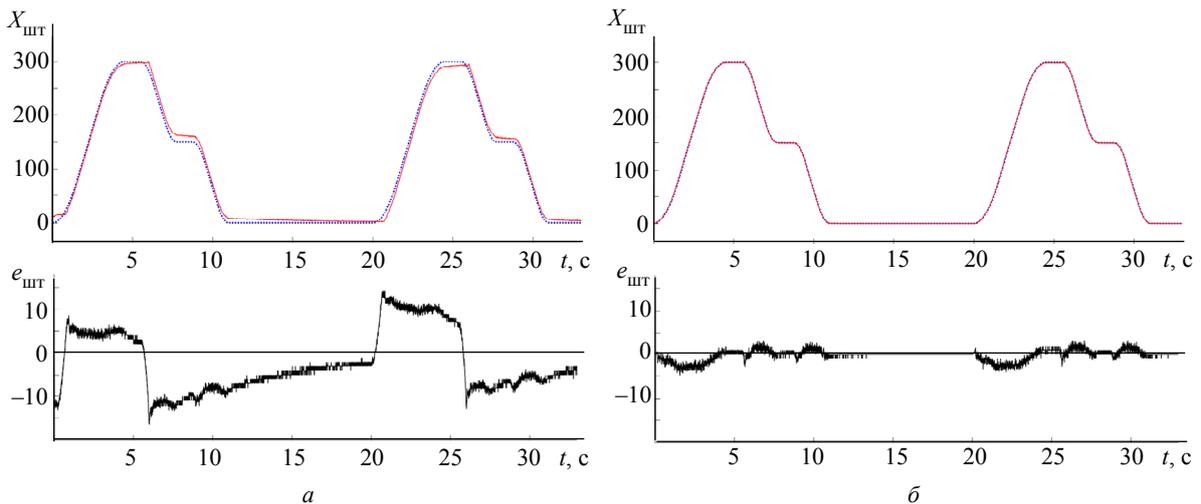


Рис. 4. Осциллограммы переходных процессов при движении по S-образным траекториям:  
 а – с ПИ-регулятором положения ЭГП и без регулятора положения ЭГУ, АР<sub>1</sub>, АР<sub>2</sub>, ФП;  
 б – с ПИ-регулятором положения ЭГП и с регулятором положения ЭГУ, АР<sub>1</sub>, АР<sub>2</sub>, ФП

Fig. 4. Oscillograms of transients when moving along S-shaped trajectories:  
 а – with PI-EGP position controller and without EGU position controller, АР<sub>1</sub>, АР<sub>2</sub>, ФП;  
 б – with PI-EGP position controller and with EGU position controller, АР<sub>1</sub>, АР<sub>2</sub>, ФП

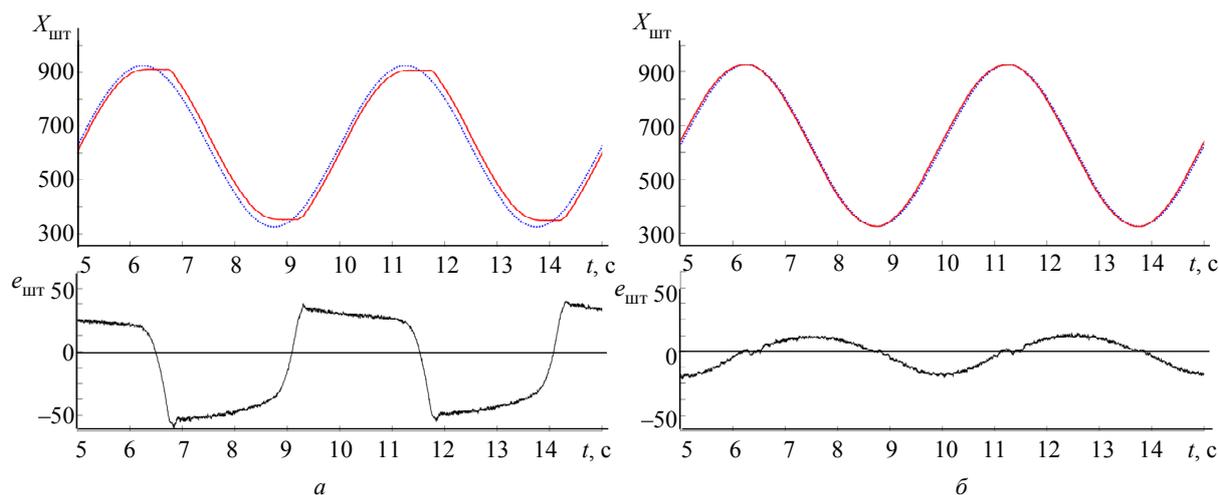


Рис. 5. Осциллограммы переходных процессов при синусоидальном задании положения штока гидроцилиндра:  
 а – с ПИ-регулятором положения ЭГП и без регулятора положения ЭГУ, АР<sub>1</sub>, АР<sub>2</sub>, ФП;

б – с ПИ-регулятором положения ЭГП и с регулятором положения ЭГУ, АР<sub>1</sub>, АР<sub>2</sub>, ФП

Fig. 5. Oscillograms of transients in the sinusoidal setting of the position of the cylinder rod:

а – with PI-EGP position controller and without EGU position controller, АР<sub>1</sub>, АР<sub>2</sub>, FP;

б – with PI-EGP position controller and with EGU position controller, АР<sub>1</sub>, АР<sub>2</sub>, FP

(АР<sub>1</sub>) и введения астатизма в закон управления положением золотника, что указывает на компенсацию нелинейности регулировочной характеристики золотникового распределителя. Результаты частотного анализа, проводимого с оценкой интеграла квадрата ошибки по положению за один период задания, указывают на снижение статической ошибки в управлении золотникового распределителя в 5 раз.

Количественные оценки точности в сравнении системы управления с ПИ-регулятором положения ЭГП, с регулятором положения ЭГУ, АР<sub>1</sub>, АР<sub>2</sub> и ФП дающие интеграл квадрата ошибки, равный  $-5.72 \text{ (ед.)}^2 \cdot (\text{период})^{-1}$ , а в случае системы управления с ПИ-регулятором положения ЭГП и

без регулятора положения ЭГУ, АР<sub>1</sub>, АР<sub>2</sub>, ФП значение указанной величины  $-100 \text{ (ед.)}^2 \cdot (\text{период})^{-1}$ .

**Заключение.** В результате внедрения предложенных адаптивных алгоритмов была улучшена точность позиционирования золотника ЭГУ, что позволило повысить качество регулирования гидропривода, которое обусловлено улучшением точности позиционирования золотника ЭГУ за счет включения адаптивного управления с обратным оператором в цепи формирования адаптивного сигнала.

Уменьшение зоны нечувствительности золотникового распределителя ЭГУ дало возможность повысить точность позиционирования привода, что иллюстрируется переходными процессами при синусоидальном и S-образном задании положения штока гидроцилиндра.

#### Список литературы

1. Копылов В. М., Титов В. В., Трутс А. А. Гидроманipуляторы в подводной и радиационных средах: обзор тенденций // Журн. СФУ. Техн. и технол. 2023. Т. 16, № 3. С. 316–340.
2. Lyu L., Chen Z., Yao B. Advanced valves and pump coordinated hydraulic control design to simultaneously achieve high accuracy and high efficiency // IEEE Transactions on Control Syst. Technol. 2021. Т. 29, № 1. P. 236–248.
3. Yao J., Deng W. Active disturbance rejection adaptive control of hydraulic servo systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017. Т. 64, № 10. P. 8023–8032. doi: 10.1109/TIE.2017.2694382.
4. Robust backstepping sliding mode control design for a class of underactuated electro-mechanical nonlinear systems / S. Ullah, Q. Khan, A. Mehmood, A. I. Bhatti

// J. of Electr. Engin. & Technol. 2020. Т. 15, № 4. P. 1821–1828. doi: 10.1007/s42835-020-00436-3.

5. Koivumäki J., Mattila J. Stability-guaranteed force-sensorless contact force/motion control of heavy-duty hydraulic manipulators // IEEE Transactions on Robotics. 2015. Т. 31, № 4. P. 918–935.

6. Системы электрогидравлических рулевых приводов комплексов управления полетом самолета / А. С. Алексеев, С. А. Ермаков, С. В. Константинов, В. Е. Кузнецов, Ю. Г. Оболенский. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. 517 с.

7. Борцов Ю. А., Поляхов Н. Д., Путов В. В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 216 с.

8. Кузнецов В. Е. Адаптивное управление с экзомоделью техническим объектом с ограниченной

неопределенностью // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 6. С. 53–60.

9. Полющенко И. С. Математическая модель датчика перемещения электропривода и разработка

его программного обеспечения // Вестн. ИГЭУ. 2022. № 5. С. 63–71.

#### Информация об авторах

**Лукичев Андрей Николаевич** – старший преподаватель кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: lukichevan@gmail.com

**Кузнецов Владимир Евгеньевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: vekuznetsov56@mail.ru

**Филатов Денис Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: dmfilatov@etu.ru

**Трутс Александр Александрович** – зам. главного конструктора по экстремальной робототехнике и автоматизации, Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики (ФГАНУ «ЦНИИ РТК»), Тихорецкий пр., 21, Санкт-Петербург, 194064, Россия.

E-mail: a.truts@rtc.ru

**Лошицкий Петр Анатольевич** – начальник отдела, Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики (ФГАНУ «ЦНИИ РТК»), Тихорецкий пр., 21, Санкт-Петербург, 194064, Россия.

E-mail: p.loshitskiy@rtc.ru

#### Вклад авторов:

Лукичев А. Н. – синтез и исследование контура положения ЭГП со статической компенсацией нелинейности.

Кузнецов В. Е. – синтез и исследование контура положения золотника ЭГУ.

Филатов Д. М. – разработка аппаратной части устройства управления приводом и проведение полунатурных исследований.

Трутс А. А. – разработка гидравлической части стенда.

Лошицкий П. А. – обработка результатов полунатурных исследований.

#### References

1. Kopylov V. M., Titov V. V., Truts A. A. Gidromanipulyatory v podvodnoj i radiacionnyh sredah: obzor tendencij // Zhurn. SFU. Tehn. i tehnol. 2023. T. 16, № 3. S. 316–340. (In Russ.).

2. Lyu L., Chen Z., Yao B. Advanced valves and pump coordinated hydraulic control design to simultaneously achieve high accuracy and high efficiency // IEEE Transactions on Control Systems Technol. 2021. T. 29, № 1. P. 236–248.

3. Yao J., Deng W. Active disturbance rejection adaptive control of hydraulic servo systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017. T. 64, № 10. P. 8023–8032. doi: 10.1109/TIE.2017.2694382.

4. Robust backstepping sliding mode control design for a class of underactuated electro-mechanical nonlinear systems / S. Ullah, Q. Khan, A. Mehmood, A. I. Bhatti // J. of Electr. Engin. & Technol. 2020. T. 15, № 4. P. 1821–1828. doi: 10.1007/s42835-020-00436-3.

5. Koivumäki J., Mattila J. Stability-guaranteed force-sensorless contact force/motion control of heavy-duty hydraulic manipulators // IEEE Transactions on Robotics. 2015. T. 31, № 4. P. 918–935.

6. Sistemy jelektrogidravlicheskih rulevyh privodov kompleksov upravlenija poletom samoleta / A. S. Alekseenkov, S. A. Ermakov, S. V. Konstantinov, V. E. Kuznetsov, Ju. G. Obolenskij. SPb.: Izd-vo SPbGJeTU «LJeTI», 2019. 517 s. (In Russ.).

7. Borcov Ju. A., Poljahov N. D., Putov V. V. Jelektromehaničeskie sistemy s adaptivnym i modal'nym upravleniem. L.: Jenergoatomizdat, 1984. 216 s. (In Russ.).

8. Kuznetsov V. E. Adaptivnoe upravlenie s jekzomodel'ju tehničeskim ob'ektom s ogranichennoj neopredelennost'ju // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2016. № 6. S. 53–60. (In Russ.).

9. Poljushhenkov I. S. Matematičeskaja model' zadčhika peremeshhenija jelektroprivoda i razrabotka ego programmogo obespečenija // Vestn. IGJeU. 2022. № 5. S. 63–71. (In Russ.).

Information about the authors

**Andrey N. Lukichev** – Senior Lecturer at the Department of Automatic Control Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: lukichevan@gmail.com

**Vladimir E. Kuznetsov** – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Automatic Control Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: vekuznetsov56@mail.ru

**Denis M. Filatov** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automatic Control Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: dmfilatov@etu.ru

**Alexander A. Truts** – Deputy Chief Designer for Extreme Robotics and Automation, Central Research and Development Institute of Robotics and Technical Cybernetics (CRI of RTK), Tikhoretsky Av., 21, St. Petersburg, 194064, Russia.

E-mail: a.truts@rtc.ru

**Petr A. Loshitskiy** – Head of Department, Central Research and Development Institute of Robotics and Technical Cybernetics (CRI of RTK), Tikhoretsky Av., 21, St. Petersburg, 194064, Russia.

E-mail: p.loshitskiy@rtc.ru

**Author contribution statement:**

Lukichev A. N. – synthesis and study of the contour of the EGP position with static compensation of nonlinearity.

Kuznetsov V. E. – synthesis and study of the contour of the EGU spool position.

Filatov D. M. – development of the hardware of the drive control device and conducting semi-natural research.

Truts A. A. – development of the hydraulic part of the stand.

Loshitskiy P. A. – processing of the results of semi-natural research.

Статья поступила в редакцию 18.12.2024; принята к публикации после рецензирования 03.03.2025; опубликована онлайн 25.04.2025.

Submitted 18.12.2024; accepted 03.03.2025; published online 25.04.2025.

---