

СИНТЕЗ НЕЙРОСЕТЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ НА ОСНОВЕ СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЖИМА

А.В. Козырь

Тульский государственный университет
Россия, 300012, Тула, Ленина просп., 92
E-mail: romadovsergey5@gmail.com

С.В. Феофилов

Тульский государственный университет
Россия, 300012, Тула, Ленина просп., 92
E-mail: Kozyr_A_V@mail.ru

Ключевые слова: автономный электрогидравлический привод, зона нечувствительности, нейросетевой регулятор, компенсация нелинейности, синтез системы управления, скользящий режим.

Аннотация: Автономные электрогидравлические приводы (АГРП) находят широкое применение в промышленных приложениях, таких как мобильные манипуляторы, роботизированный экзоскелет, аэрокосмические приложения. АГРП имеют ряд существенных преимуществ по отношению к электроприводу, высокое соотношение развиваемого усилия к весу привода, компактные размеры автономного привода обеспечиваются интегрированной компоновкой всех элементов электрогидравлической системы. Однако управление такими системами значительно усложняется наличием существенных нелинейностей в объекте управления, это нелинейная характеристика распределительного устройства, сухое трение, жесткие механические ограничители, все это затрудняет реализацию системы управления классическими регуляторами. В работе предлагается методика синтеза регулятора скользящего режима с компенсационным нейросетевым управлением для объектов с неопределенной статической характеристикой. С помощью прямого метода Ляпунова доказывается устойчивость замкнутой системы. Приводятся результаты численного моделирования для демонстрации эффективности предложенных подходов.

1. Введение

Электрогидравлические приводы используются в различных отраслях промышленности и часто являются наиболее подходящим вариантом для систем, где требуется развивать большие усилия с высоким быстродействием. Важным преимуществом гидравлического привода является способность поддерживать грузоподъемность, которая в случае применения электропривода ограничена [1]. В настоящее время большую популярность приобретают автономная конструкция гидропривода, когда в системе интегрированы все электрогидравлические компоненты, такие как электродвигатель, аксиально-поршневой насос, электромагнит, золотниковый распределитель [2]. Достоинство таких устройств обусловлено тем, что такой привод

имеет малые габариты при сравнительно высоком развиваемом усилии, что является важным качеством в мобильных приложениях, таких как системах управления летательными аппаратами [3], робототехника, экзоскелет [4] и многие другие приложения. Однако проектирование системы управления таким приводом связано с целым рядом специфических трудностей, таких как нестационарность параметров объекта управления в случае изменения температуры в широком диапазоне значений, нелинейность математического описания привода: зона нечувствительности, трение, жёсткие механические ограничители, высокий порядок математической модели привода. Указанные нелинейности могут приводить к возникновению предельных циклов в замкнутом контуре системы управления. Растущее число работ посвященных подходам к управлению такими приводами, на основе современных методов управления [2-4], свидетельствует о большом интересе инженерного сообщества к таким системам. Классическим инженерным подходом к управлению такими системами является применение ПИД регулятора [5]. Однако такие контроллеры не являются робастными и чувствительны к изменению параметров объекта управления. Существуют подходы, в которых полностью известны параметры статической характеристики нелинейности и ее компенсируют обратной функцией [6], в большинстве случаев рассматривались системы с одной нелинейностью и линейным объектом управления. Известны работы, в которых предлагается адаптивные компенсационные схемы управления с негладкой нелинейностью и работающие в непрерывном времени [7]. В работе [8] нелинейная характеристика компенсируется предварительно настроенной нейронной, в таких работах не рассматривались вопросы качества работы замкнутой системы и гарантии устойчивости замкнутой системы управления подтверждались только в результате многочисленного моделирования.

Одним из самых перспективных подходов к управлению системами с нелинейностями не чувствительному к изменению в объекте управления, является скользящий режим.

В настоящей работе предлагается компенсационный нейросетевой регулятор для автономных электрогидравлических систем с неопределенными параметрами нелинейного звена типа «зона нечувствительности». В разработанном подходе не требует предварительного знания параметров статической характеристики усилительного устройства.

Работа будет организована следующим образом, вначале будет рассмотрена общая постановка проблемы управления замкнутой системой с неопределенной статической характеристикой типа «зона нечувствительности». Далее рассматривается применение непрерывного скользящего управления для слежения за гармоническим входным сигналом.

В основе предлагаемого подхода лежит непрерывный регулятор, работающий в скользящем режиме, контроллер обеспечивает робастность системы к неточностям параметров системы, а нейронная сеть с функцией (ReLU), применяется для уменьшения влияния нелинейной статической характеристики. Свойства ограниченности и сходимости замкнутой доказываются численно с использованием теории устойчивости на основе нейросетевой функции Ляпунову.

2. Математическая постановка задачи

Рассматривается нелинейный динамический объект управления вида:

$$(1) \quad \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{B}d(U, t),$$

$$(2) \quad y = \mathbf{C}\mathbf{x},$$

где $\mathbf{x} = [\dot{x}, \ddot{x}, \ddot{\ddot{x}}, \dots]$ – вектор состояния системы, а $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ – вектор строка, выделяющая выходную координату системы. Статическую характеристику распределительного устройства

$$(3) \quad d(U) = \begin{cases} Q_1(U), & \text{если } U \leq \delta_1, \\ 0, & \text{если } \delta_1 < U < \delta_2, \\ Q_2(U), & \text{если } U \geq \delta_2. \end{cases}$$

Выражение (3) позволяет задать произвольный вид статической характеристики с областью нечувствительности. U – управляющее воздействие. Причем в работе будет предполагаться, что нет точной информации о параметрах δ_i , $Q_i(U)$, $i = 1, 2$. Указанное предположение достаточно типично для автономных электрогидравлических приводов, где все компоненты интегрированы в одном устройстве и нет априорной информации о параметрах статической характеристики пневмоусилителя.

Задача управления состоит в том, что даже при наличии параметрической неопределённости, и отсутствии полной информации о функции $d(U)$, вектор состояния системы следовал бы желаемой траектории $\mathbf{x}_d = [\dot{x}_d, \ddot{x}_d, \ddot{\ddot{x}}_d, \dots]$.

В работе делается допущение о том, что доступен весь вектор фазовых координат системы, это допущение оправдано последующем использованием нейросетевого наблюдателя состояния нелинейной динамической системы [8].

В таком случае ошибка слежения и ее производные

$$(4) \quad \mathbf{e} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_d, \dot{\mathbf{e}} = \dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_d, \dots$$

Поверхность скольжения в пространстве состояния системы в общем виде будет задаваться как

$$(5) \quad \mathbf{s}(\mathbf{x}) = \mathbf{D}^T \mathbf{x} = \sum_{i=1}^n \mathbf{D}_i \mathbf{x}_i = \sum_{i=1}^{n-1} \mathbf{D}_i \mathbf{x}_i + x_n,$$

где, \mathbf{x} – вектор состояния, $i = 1, \dots, n$, $\mathbf{D} = [d_1, d_2, \dots, d_n]^T$, необходимым условием сходимости траектории системы к поверхности скольжения (5) является условие $d_i > 0$ если $i = 1, 2$ или чтобы корни характеристического уравнения $\mathbf{s}(\mathbf{x}) = 0$ были отрицательными, тогда $\mathbf{s}(\mathbf{x}) \rightarrow 0$ будет гарантировать, что $x_i \rightarrow 0$.

Задачу управления нелинейной динамической системой (1), (2) можно рассматривать в соответствии с методикой скользящего режима, для чего необходимо сформировать эквивалентное управление [9].

$$(6) \quad U = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{K} \text{sign}(s(x)) + \mathbf{K} s(x) + \mathbf{C} e)$$

Разрывное управление (6) может приводить к известной проблеме высокочастотному переключения управляющего сигнала при малых значениях ошибки (chattering). Не моделируемая динамика системы или дискретная реализация управления может существенно ухудшить качество процессов управления. Для решения указанной проблемы применяют подход квази-скользящего режима [10]. Для чего создают малую область ξ вокруг поверхности переключения

$$(7) \quad S_\xi(x) = \mathbf{x}_\xi \in \mathbb{R}^n \wedge |\mathbf{x}_\xi| \leq \xi,$$

если траектории системы попадает в эту область, то управление переключается на гладкую непрерывную функцию [9]. Таким образом в системе реализуют квази-скользящий режим. Известны различные варианты сглаживания релейной характеристики управления, наиболее часто применяют функцию насыщения (8) или тангсальную функцию (9). В выражение (6) разрывная функция sign заменяется на функцию

$$(8) \quad \text{sat}(s/\Delta) = \begin{cases} \text{sign}(s), & \text{если } |s/\Delta| \geq 1, \\ s/\Delta, & \text{если } |s/\Delta| < 1, \end{cases}$$

$$(9) \quad \tanh(s/\Delta) = \frac{e^{\frac{s}{\Delta}} - e^{-\frac{s}{\Delta}}}{e^{\frac{s}{\Delta}} + e^{-\frac{s}{\Delta}}}.$$

Неопределенная статическая характеристика в объекте управления может существенно ухудшить параметры слежения системы управления и вообще привести к срыву скольжения, как показано в работе [9].

3. Синтез алгоритма управления

Одним из возможных подходов к решению указанной проблемы, является включение в контур системы управления нейросетевого компенсационного устройства на основе функции активации типа ReLU, (график функции приведен на рис. 1),

$$(10) \quad d(x) = \sum_{k=1}^N w_k \phi(\|x - \tilde{x}\|).$$

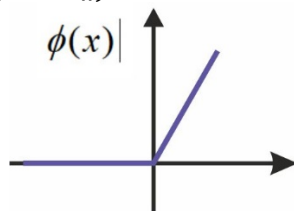


Рис. 1. Функция активации ReLU.

Выбор функции активации типа ReLU обусловлено тем, что можно создать инверсную модель нелинейной статической характеристики, используя минимальное количество слоев. Пример реализации инверсной статической характеристики, определяемая выражением (3) приведен на рис. 2.

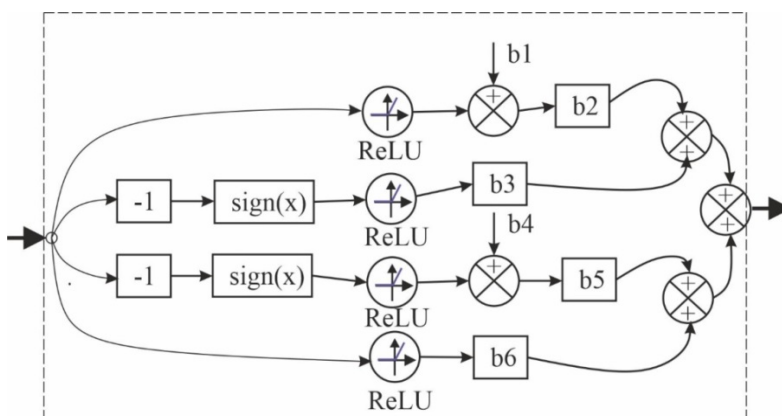


Рис. 2. Инверсная нейросетевая статическая характеристика.

Параметры b_i настраиваются в процессе обучения нейросетевого регулятора на обучающую выборку $\theta = \{(x, d)_1, (x, d)_2, \dots\}$. Критерием настройки весов нейросетевого регулятора является условие $\lim_{t \rightarrow \infty} \|d - \phi(b_i)\|$. Замкнутая система управления, работающая в скользящем режиме приведена на рис. 3.

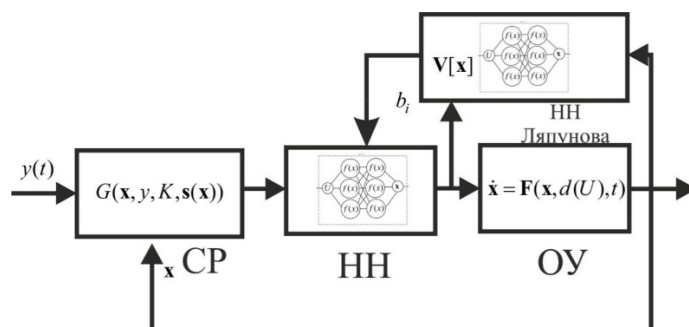


Рис. 3. Замкнутая система управления с нейросетевым компенсатором.

На рис. 3, $y(t)$ – входной сигнал; СР – регулятор скользящего режима; НН – нейросетевой компенсатор, ОУ – нелинейный объект управления; $V[x]$ – нейросетевая функция Ляпунова на основе, которой будет оцениваться устойчивость замкнутой системы управления при настройке параметров b_i компенсатора.

3. Устойчивость системы управления с нейросетевым регулятором

Для подтверждения устойчивости замкнутой системы управления можно совместно с настройкой компенсатора обучать нейросетевую функцию Ляпунова [11]. Критерием обучения нейросетевой функции будет служить выполнение неравенств

$$(11) \quad V(x[t]) > 0 \forall x[t] \in S, x[t] \neq x^*;$$

$$(12) \quad V(x[t + 1]) - V(x[t]) \leq \varepsilon V(x[t]), \forall x[t] \in S;$$

$$(13) \quad V(x^*) = 0;$$

$x[t]$ – вектор состояния системы в момент времени t ; S – область устойчивости системы, $\varepsilon \in [0,1]$. Нейросетевая функция Ляпунова будет обучаться исходя из состязательной стратегии, при которой будут искаться состояния нарушающие условия (11)-(13). Таким образом необходимо решить задачу оптимизации следующих целевых функций

$$(14) \quad \begin{aligned} & \max_{x[t] \in S} \varepsilon |R(x[t] - x^*)|_1 - V(x[t]); \\ & \max_{x[t] \in S} V(x[t + 1]) + (\varepsilon - 1)V(x[t]). \end{aligned}$$

После получения значений состояния, которые максимально нарушают условия существования функции Ляпунова, нужно на их основе произвести обучение нейронных сетей. Для этого на полученных значениях нейронные сети учатся минимизировать ошибки условий существования функции Ляпунова. Т.е. нейронная сеть должна минимизировать следующую функцию:

$$\eta_1 = \max_{x \in S} (\varepsilon |R(x[t] - x^*)|_1 - V(x[t]));$$

$$\eta_2 = \max_{x \in S} (V(x[t + 1]) + (\varepsilon - 1)V(x[t]));$$

$$G(x[t], x[t + 1]) = |\eta_1| + |\eta_2| \rightarrow \min.$$

Таким образом, минимизируя $G(x[t], x[t + 1])$ обучается функция Ляпунова и нейроконтроллер. В результате можно получить область устойчивости S , в которой замкнутая система будет гарантирована устойчива.

4. Пример

В качестве модельного примера в работе рассматривается синтез следящей системы управления автономным электрогидравлическим приводом, упрощённая модель которого приведена на рис. 4. Особенность такого привода состоит в интегрированной компоновке, в которой объединён насос, распределительное устройство, электромагнитный преобразователь.

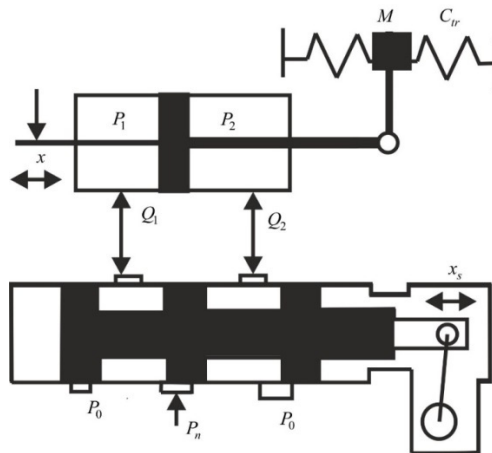


Рис. 4. Структурная схема автономного электрогидравлического привода.

Математическая модель привод в упрощенном виде можно представить в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений

$$F_t = A_1 P_1 - A_2 P_2 = M_n \frac{d^2 x}{dt^2} + B_t \frac{dx}{dt} + K_s x,$$

$$M_t \frac{d^2 x}{dt^2} + B_t \frac{dx}{dt} + K_s x = A_p P_n.$$

Усилие, развиваемое гидроприводом $-F_t$, A_1, A_2 – площадь поршня в полости 1 и 2 соответственно, M_t – приведенная масса нагрузки к штоку цилиндра, B_t – коэффициент вязкого трения, K_s – упругая нагрузка, x – положение нагрузки.

4.1 Результат синтеза

Как видно из рис. 5, 6 использование нейросетевой компенсации позволяет существенно уменьшить влияние нелинейности объекта управления. Однако случае когда точные параметры нелинейности не известны процесс обучения нейросети может быть затруднен и требовать больших вычислительных ресурсов.

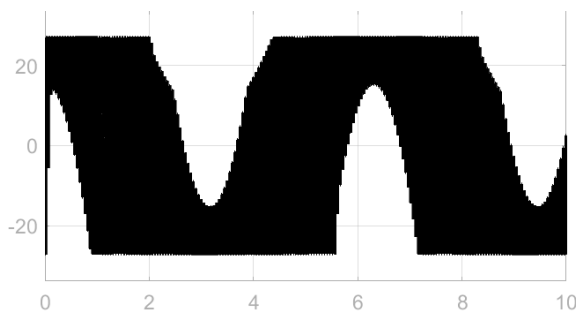


Рис. 5. Ошибка слежения с учетом статической характеристики.

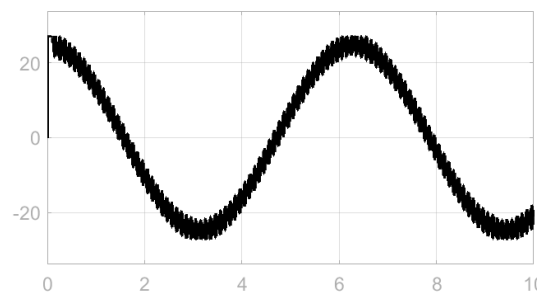


Рис. 6. Ошибка слежения в системе с нейросетевым компенсационным устройством.

5. Заключение

В работе рассмотрена задача синтеза нейросетевого компенсационного управления для нелинейного динамического объекта на основе скользящего режима. Показано, что с помощью функций активаций ReLU просто построить инверсную статическую характеристику. Представлена структура нейросетевого компенсатора. На примере автономного электрогидравлического привода разработан контроллер скользящего режима с компенсацией нелинейной статической характеристики распределительного устройства.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме «FEWG-2022-0003»

Список литературы

1. Barasuol V., Villarreal-Magaca O.A., Sangiah D., Frigerio M., Baker M., Morgan R., Medrano-Cerda G.A., Caldwell D.G., Semini C. Highly-Integrated Hydraulic Smart Actuators and Smart Manifolds for High-Bandwidth Force Control // *Front. Robot.* 2018. A15: 51. doi: 10.3389/frobt.2018.00051.
2. Козырь А.В., Бутрин А.В., Синтез цифровой системы управления автономным электрогидравлическим приводом // *Известия ТулГУ.* 2021. № 11. С. 33-40.
3. Alfayad S., Ouezdou F.B., Namoun F., Cheng G. High performance integrated electro-hydraulic actuator for robotics – Part I: Principle, prototype design and first experiments // *Sensors and Actuators A Physical.* 2011. Vol. 169, No. 1. P. 115-123. doi: 10.1016/j.sna.2010.10.026.
4. Buyoun Cho, Sung-Woo Kim, Seunghoon Shin, Jun-Ho Oh, Hyung-Soon Park, Hae-Won Park. Energy-Efficient Hydraulic Pump Control for Legged Robots Using Model Predictive Control // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics.* 2023. Vol. 28, No. 1. P. 3-14.
5. Guo Y.-Q., Zha X.-M., Shen Y.-Y., Wang Y.-N., Chen G. Research on PID Position Control of a Hydraulic Servo System Based on Kalman Genetic Optimization // *Actuators.* 2022. Vol. 11. P. 162. <https://doi.org/10.3390/act11060162>.
6. Jiang Z., Xu D., Zhu X.J. A study of the four-switch low cost inverter that uses the magnetic flux control method // *Proc. IEEE Power Electron. Motion Control Conf. Xi'an, China, 2004.* Vol. 3. P. 1368-1371.
7. Kozyr A., Feofilov S., Synthesis of Neural Network Stabilizing Control for Objects with Mechanical Limiter // *2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA).* Lipetsk, Russian Federation, 2023. P. 100-104. doi: 10.1109/SUMMA60232.2023.10349496.
8. Selmis R.R., Lewis F.L. Dead-zone compensation in motion control systems using neural networks // *IEEE Trans. Autom. Control.* 2000. Vol. AC-45. P. 602-613.
9. Lima G.S., Trimpe S., Bessa W.M. Sliding mode control with Gaussian process regression for underwater robots. *Journal of Intelligent & Robotic Systems.* 2020. Vol. 99, No. 3. P. 487-498. doi:10.1007/s10846-019-01128-5.
10. Bessa W.M., Brinkmann G., Duecker D.A., Kreuzer E., Solowjow E. A biologically inspired framework for the intelligent control of mechatronic systems and its application to a micro diving agent // *Mathematical Problems in Engineering.* 2018. Vol. 2018. P. 1-16. doi:10.1155/2018/9648126.
11. Макаров Н.Н., Руднев С.А., Плыкина Е.В. Применение цифрового скользящего режима в следящем приводе // *Известия ТулГУ.* 2020. № 11. С. 262-268.