

ской структуры и химического состава поверхности, в частности, дислокации кристаллической решетки. Наличие дислокаций может приводить к уменьшению времени жизни ННЗ, регистрируемому в режиме фотостимулированной электрометрии. В то же время, такое уменьшение может являться и следствием, формирования ловушечных уровней, не связанных с явно выраженными дислокациями или другими структурными дефектами. Таким образом, измерения в обоих режимах (КРП и визуализации длины диффузии ННЗ) яв-

ляются взаимодополняющими, позволяя выявлять различные виды дефектов на одной и той же поверхности.

Литература

1. Зондовые зарядочувствительные методы в технологическом контроле производства больших интегральных схем / К. Л. Тявловский [и др.] // Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. IX Междунар. науч. конф., Минск, 14–16 окт. 2020 г. / редкол.: В.Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2020. – С. 129–132.

УДК 681.5

СИНТЕЗ НЕЙРОСЕТЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ С ЗОНОЙ НЕЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Козырь А.В., Феofilов С.В.

*ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»,
Лаборатория цифровых систем управления сложными динамическими объектами
Тула, Российская Федерация*

Аннотация. Автономные электрогидравлические приводы находят широкое применение в промышленных приложениях, таких как мобильные манипуляторы, роботизированный экзоскелет, аэрокосмические приложения. Такие системы 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, таких как мертвая зона, что затрудняет реализацию системы управления классическими регуляторами. В этой работе проектируется регулятор с компенсационным нейросетевым управлением для объектов с зоной нечувствительности. С помощью метода Ляпунова доказывается устойчивость замкнутой системы. Приводятся результаты численного моделирования для демонстрации эффективности предложенных подходов.

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

SYNTHESIS OF NEURAL NETWORK CONTROL OF AN AUTONOMOUS ELECTRO-HYDRAULIC SYSTEMS WITH A DEAD-ZONE

Kozyr A., Feofilov S.

*Tula State University
Tula, Russian Federation*

Abstract. Autonomous electro-hydraulic drives are widely used in industrial applications, such as mobile manipulators, robotic exoskeletons, aerospace applications. Such systems have a number of significant advantages in relation to the electric drive, the high ratio of the developed force to the weight of the drive, the compact size of the autonomous drive is provided by the integrated layout of all elements of the electrohydraulic drive. However, the management of such systems is significantly complicated by the presence of significant nonlinearities in the control object, such as a dead zone, which makes it difficult to implement a control system with classical regulators. In this work, a controller with compensatory neural network control is designed for objects with a dead zone. Using the Lyapunov method, the stability of a closed system is proved. The results of numerical modelling are presented to demonstrate the effectiveness of the proposed approaches.

Key words: Autonomous electro-hydraulic actuator, dead zone, neural network controller, non-linearity compensation, control system synthesis.

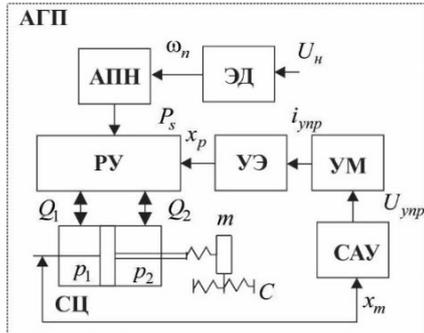
*Адрес для переписки: Козырь А.В., пр. Ленина, 92, Тула 300012, Российская Федерация
e-mail: Kozyr_A_V@mail.ru*

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 спо-

способность поддерживать грузоподъемность, которая в случае применения электропривода ограничена. 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 [1]. Структурная схема приведена на рис. 1.

Достоинство таких устройств обусловлено тем, что такой привод имеет малые габариты при сравнительно высоком развиваемом усилии, что является важным качеством в малогабаритных летательных аппаратах. 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, ограничение скорости перемещения выходных звеньев, жесткие механические ограничители, высокий порядок математической модели привода. Указанные нелинейности могут приводить к возникновению предельных циклов в замкнутом контуре системы управления [2]. Растущее число работ, посвященных подходам к управлению такими приводами, на основе современных методов управления [3–5], свидетельствует о большом интересе инженерного сообщества к таким системам.



АГП – автономный гидравлический привод;
 АПН – аксиально-поршневой насос;
 ЭД – электродвигатель; РУ – распределительное устройство; УЭ – управляющий электромагнит;
 УМ – усилитель мощности; САУ – система автоматического управления; U_n – напряжение питания двигателя; ω_n – угловая скорость двигателя; $Q_{1,2}$ – массовый расход; $p_{1,2}$ – давление в полостях силового цилиндра; x_m – перемещение штока цилиндра; $U_{упр}$ – управляющий сигнал

Рисунок 1 – Автономный гидравлический привод

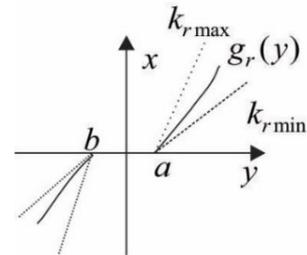
В настоящей работе предлагается компенсационный нейросетевой регулятор для автономных электрогидравлических систем с неопределенными параметрами нелинейного звена типа мерт-

вая зона. Принятый подход не требует ни предварительного знания параметров мертвой зоны, ни построения обратной функции.

В основе предлагаемого подхода лежит непрерывный регулятор, работающий в скользящем режиме, контроллер обеспечивает робастность системы к неточностям параметров системы, а нейронная сеть с радиальной базисной функцией (RBF) встроена в пограничный слой, чтобы уменьшить эффект мертвой зоны. Свойства ограниченности и сходимости замкнутой системы аналитически доказаны с использованием теории устойчивости по Ляпунову.

Общая структурная схема исследуемого привода приведена на рис. 1. В работе построена упрощенная нелинейная математическая модель объекта управления в виде $\dot{x}(t) = F(x, U_{упр})$, распределительное устройство содержит нелинейность типа зона нечувствительности, параметры которого точно не известны, но ограничены. Общий вид нелинейности представлен на рис. 2.

Задача управления состоит в том, чтобы гарантировать, что даже при наличии параметрических неопределенностей, немоделируемой динамики и зоны нечувствительности, вектор траектории движения системы x будет следовать желаемой траектории x_0 .



$g(y)$ – предполагаем, что является непрерывной функцией

Рисунок 2 – Нелинейность распределительного устройства

При разработке управление делается допущение, что известен весь вектор состояния системы x . Управление будет организован в виде непрерывного скользящего режима [5]. Для того чтобы обеспечить сходимость фазовых траекторий к поверхности переключения, возмущения, вызванные неопределенной статической функцией (рис. 2) будем оценивать непосредственно с помощью нейросети.

Таким образом, в работе рассматривается проблема управления электрогидравлическим приводом. С помощью известного подхода был разработан регулятор, работающий в скользящем режиме. Такой регулятор был дополнен нейронной сетью, которая может аппроксимировать нелинейность зоны нечувствительности и скомпенсировать ее влияние.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме FEWG-2022-0003.

Литература

1. Арзуманов, Ю. Л., Основы проектирования систем пневмо- и гидроавтоматики: монография / Ю. Л. Арзуманов, Е. М. Халатов, В. И. Чекмазов. – М.: Издательский дом «Спектр», 2017. – 495 с.
2. Lima, G. S. Sliding mode control with gaussian process regression for underwater robots / G. S. Lima,

S. Trimpe, W. M. Bessa // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2020. – Vol. 99, № 3. – P. 487–498.

3. A biologically inspired framework for the intelligent control of mechatronic systems and its application to a micro diving agent / W. M. Bessa [et al.] // Mathematical Problems in Engineering. – 2018. – P. 1–16.

4. Козыр, А. В. Синтез цифровой системы управления автономным электрогидравлическим приводом / А. В. Козыр, А. В. Бутрин // Известия ТулГУ. – 2021. – № 11. – С. 33–40.

5. Макаров, Н. Н. Применение цифрового скользящего режима в следящем приводе / Н. Н. Макаров, С. А. Руднев, Е. В. Плыкина // Известия ТулГУ. – 2020. – № 11. – С. 262–268.

УДК 621.383

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ С КОМБИНИРОВАННЫМ ОПТИКО МАГНИТНЫМ ДАТЧИКОМ

Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Тявловский А.К., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Предложена конструкция комбинированного оптикоманнитного датчика магниторекомбинационного транзистора. Использование в базе транзистора полупроводникового материала с глубокой многозарядной примесью позволяет сформировать датчик с чувствительностью к магнитному полю и оптическому излучению. Применение метода широтно-импульсной модуляции для управления скоростью рекомбинации в объеме полупроводника позволяет реализовать управление преобразовательной характеристики чувствительности к магнитному полю в широком диапазоне. Комбинированный датчик может использоваться при построении функциональных измерительных преобразователей систем оптической диагностики.

Ключевые слова: измерительный преобразователь, магниторекомбинационный преобразователь, полупроводник, многозарядная примесь, управление характеристикой чувствительности, широтно-импульсная модуляция.

THE MEASURING TRANSDUCER OF SYSTEMS OF OPTICAL DIAGNOSTICS WITH MAGNETIC COMBINED OPTICS CONVERTER

Vorobey R., Gusev O., Svistun A., Tyavlovsky A., Tyavlovsky K., Shadurskaya L.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The design magnetic combined optics converter is offered. Use in base of the transistor semiconductor with penetrating multiply charged impurity allows to generate the gauge with sensitivity to a magnetic field and optical radiance. Application of a method of pulse-width modulation for a recombination speed control in semiconductor volume allows to realise control of the converting characteristic of sensitivity to a magnetic field in a wide range. Combined sensor it can be used at construction of functional measuring transducers of systems of optical diagnostics.

Key words: measuring transducer, magnetorecombinational converter, semiconductor, multicharging impurity, control of the sensitivity characteristic, pulse-width modulation.

*Адрес для переписки: Тявловский К.Л., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by*

Устройства неразрушающего контроля часто используют оптические и магнитные методы измерений, позволяющие дистанционно определять параметры материалов и изделий [1, 2]. Некоторые комбинированные преобразователи [3] позволяют одновременно и в одном физическом объеме определять параметры магнитного поля и оптического излучения.

Структура магниторекомбинационного транзистора, управляемого оптическим излучением, и

выполняющим функциональное преобразование умножения величины магнитного поля и интенсивности оптического излучения [3] приведена на рис. 1. Разделенные выводы области базы позволяют использовать ее как фоторезистор для независимого, от влияния магнитного поля, измерения интенсивности оптического излучения. Управление чувствительностью к магнитному полю под действием оптического излучения происходит благодаря использованию в качестве