



УДК 004.312.46, 004.896, 681.52

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Р. Стжелецки^а, Г.Л. Демидова^б, Д.В. Лукичев^б, Н.А. Поляков^б,
А.А. Абдуллин^б, С.Ю. Ловлин^б

^а Гданьский политехнический Университет, Гданьск, 80-233, Польша

^б Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: demidova@ets.ifmo.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 12.10.18, принята к печати 01.12.18

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-1-14

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Стжелецки Р., Демидова Г.Л., Лукичев Д.В., Поляков Н.А., Абдуллин А.А., Ловлин С.Ю. Алгоритмы управления электромеханическими объектами с использованием регуляторов на основе нечеткой логики // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 1. С. 1–14. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-1-14

Аннотация

Рассмотрены алгоритмы управления электромеханическими системами с использованием теории нечеткой логики, приводятся основные положения их синтеза, рассматриваются методы анализа их устойчивости на основе нечетких функций Ляпунова. Эти алгоритмы чаще всего реализуются в виде различных регуляторов, применение которых целесообразно в системах, математическая модель которых не известна, не детерминирована или является строго нелинейной, как вследствие нелинейных возмущающих воздействий внутри структуры, так и вследствие воздействия внешних сил. Описаны основные методы формирования логического решения, используемые при проектировании различных типов регуляторов с нечеткой логикой, предложенные Заде, Мамдани, Такаги, Сугено и Менделем, приводится типовая структурная схема таких регуляторов в общем виде. Особенности применения данных регуляторов при управлении различными техническими объектами позволяют провести их классификацию по различным признакам: топологиям структур, методам формирования лингвистических правил, методам дефаззификации, типам функций принадлежности. Представлены методы настройки таких регуляторов с применением генетических алгоритмов и нейронных сетей, описаны наиболее используемые критерии оптимальности. Показано, что экспертный подход на основе нечеткой логики применим как при управлении различными координатами информационных подсистем робототехнических комплексов, так и при управлении силовыми ключами их энергетических подсистем. При обзоре публикаций упор делался на источники, содержащие сравнение с традиционными подходами к управлению, а также на источники, в которых теоретические исследования подтверждаются экспериментами с использованием различных электромеханических объектов. Статья может быть полезна специалистам и исследователям в области управления различными техническими объектами.

Ключевые слова

регулятор с нечеткой логикой, нечеткая логика, управление движением, интеллектуальные алгоритмы, робототехнические комплексы, адаптивное управление, генетический алгоритм

Благодарности

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 08-08).

SURVEY ON FUZZY LOGIC METHODS IN CONTROL SYSTEMS OF ELECTROMECHANICAL PLANTS

R. Strzelecki^а, G.L. Demidova^б, D.V. Lukichev^б, N.A. Polyakov^б,
A.A. Abdullin^б, S.Yu. Lovlin^б

^аGdańsk University of Technology, Gdańsk, 80-233, Poland

^бITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: demidova@ets.ifmo.ru

Article info

Received 12.10.18, accepted 01.12.18

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-1-14

Article in Russian

For citation: Strzelecki R., Demidova G.L., Lukichev D.V., Polyakov N.A., Abdullin A.A., Lovlin S.Yu. Survey on fuzzy logic methods in control systems of electromechanical plants. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 1–14 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-1-14

Abstract

The paper reviews control algorithms of electromechanical systems using the theory of fuzzy logic, describes basic principles of synthesis of these systems, discusses methods for analyzing their stability based on fuzzy Lyapunov functions. These algorithms are most often implemented in the form of various controllers, which application is justified in the systems with unknown mathematical model, or not determined, or strictly nonlinear, with nonlinear disturbances in their structure or in the external forces. We describe the basic methods of inference used in the design of various types of fuzzy logic controllers proposed by Zadeh, Mamdani, Takagi, Sugeno, and Mendel. A typical structural scheme of such controllers is given. The considered applications of these controllers in the control of various technical plants give the possibility to classify them according to various criteria: topologies of structures, inference mechanism, methods of defuzzification, types of membership functions. We review methods for adjustment of such controllers by genetic algorithms and neural networks with a description of the most commonly used criteria for optimality estimation. It is shown that the use of an expert approach based on fuzzy logic is applicable both in control of various coordinates of information subsystems of robotic complexes, and in control of the power switches of their energy subsystems. In the review of publications, the main attention was given to sources containing comparison with traditional approaches to control, as well as sources in which theoretical studies are supported by experiments involving various electromechanical plants. The paper may be useful to specialists and researchers in the field of control of various technical devices.

Keywords

fuzzy controller, fuzzy logic, motion control, intelligence system, robotics, adaptive control, genetic algorithm

Acknowledgements

This work was financially supported by Government of Russian Federation, Grant 08-08.

Введение

В настоящее время хорошо изучены системы подчиненного регулирования координат, на основе которых проектируется 90 % систем управления электромеханическими объектами. Однако существенным недостатком таких систем является то, что нелинейный объект управления линеаризуется. В этом случае обосновано применение интеллектуальных алгоритмов управления, которые разделяются на алгоритмы, построенные на нечеткой логике и алгоритмы управления, синтезированные с использованием нейронных сетей.

Одним из важных преимуществ применения нечеткой логики является возможность синтеза адаптивных систем с нечеткими регуляторами, что позволяет значительно снизить чувствительность системы к изменению параметров и соответственно увеличить сроки работы без дополнительных настроек [1].

Как известно, основоположником нечеткой логики является Л. Заде (Lotfi A. Zadeh) [2–6], его работы по синтезу систем управления с нечеткой логикой продолжили Мамдани (E.H. Mamdani) в 1974 г. [7–10], Сугено (M. Sugeno) [11–17], и в настоящее время системы с нечеткой логикой активно исследуются, синтезируются их новые структуры.

Для управления техническими объектами синтезируются различные структуры регуляторов на основе теории нечеткой логики (РНЛ, в иностранной литературе – Fuzzy Logic Controllers), однако все они основаны или на методе Мамдани (по классификации Сугено [16] – модель первого типа), или на методе Сугено (модель второго типа) и методе Такаги–Сугено, что соответствует модели третьего типа классификации Сугено [16].

Для систем, управляемых с применением алгоритмов с нечеткой логикой, представим РНЛ 1-го типа – системы с базой правил «ЕСЛИ, ... ТО...», предложенные Мамдани и Ассилиан (Assilian) [8]:

$$\begin{aligned} \text{ЕСЛИ } z_1(t) \text{ есть } M_{i1} \text{ и } \dots \text{ и } z_p(t) \text{ есть } M_{ip}, \\ \text{ТО } y(t) = H_i, \quad i = 1, 2, \dots, r \end{aligned} \quad (1)$$

где M_{ip}, H_i – нечеткие множества.

Данный эвристический метод не требует точной модели управляемого объекта, он основан на главенствующей роли оператора (выводов эксперта), составляющего базу правил. В настоящее время этот подход получил наибольшее распространение в управлении техническими объектами. Такой тип систем с нечеткой логикой возможно разделить:

- по числу используемых входных переменных, которыми могут быть: ошибка, скорость изменения ошибки и интеграл от ошибки управления [18–26];
- по структуре регулятора – адаптивный регулятор с нечеткой логикой (adaptive fuzzy controller) [27–31], гибридный регулятор с нечеткой логикой (hybrid fuzzy controller) [32–36], РНЛ скользящей системы (fuzzy sliding-mode controller) [37–44];
- по методам настройки – нейронечеткий регулятор (ANFIS) [45–51] и РНЛ с генетическим алгоритмом (fuzzy with cooperative-coevolutionary approach) [27–31].

Однако необходимо помнить, что данные структуры условные и, например, гибридный РНЛ может

быть адаптивным [39, 42].

Модель Сугено, именуемая также моделью второго типа, позволяет избежать процесса дефаззификации (приведения к четкости), так как выводами базы правил является число, а не множество:

$$\begin{aligned} \text{ЕСЛИ } z_1(t) \text{ есть } M_{i1} \text{ и } \dots \text{ и } z_p(t) \text{ есть } M_{ip}, \\ \text{ТО } y(t) = h_i, \quad i = 1, 2, \dots, r \end{aligned} \quad (2)$$

где M_{ip} – нечеткое множество, h_i – реальное число.

В работе [16] подробно исследована устойчивость такого вида системы с использованием теоремы Ляпунова.

Модель Такаги–Сугено (Т–С), модель РНЛ третьего типа, представлена в виде набора общего вида предикатных правил для глобальной нелинейной системы:

$$\begin{aligned} \text{ЕСЛИ } z_1(t) \text{ есть } M_{i1} \text{ и } \dots \text{ и } z_p(t) \text{ есть } M_{ip}, \\ \text{ТО } \begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = A_i \mathbf{x}(t) + B_i \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = C_i \mathbf{x}(t) \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, r \end{aligned} \quad (3)$$

где M_{ij} – нечеткое множество, r – число нечетких правил, $\mathbf{x}(t) \in R^n$ – фазовый вектор, $\mathbf{u}(t) \in R^m$ – вектор входного воздействия, $\mathbf{y}(t) \in R^q$ – вектор выходного сигнала, $A_i \in R^{n \times n}$, $B_i \in R^{n \times m}$, $C_i \in R^{q \times n}$, $\mathbf{z}(t) = (z_1(t), \dots, z_p(t))$ – вектор известных переменных, которые могут быть функциями фазовых переменных, внешних возмущений или времени.

Модель Т–С является обобщенной для анализа стабильности РНЛ. Можно выделить модели:

- Т–С с устойчивостью по методу квадратичной функции Ляпунова;
- Т–С с устойчивостью по методу кусочно-квадратичной функции Ляпунова;
- Т–С с устойчивостью на основе метода нечеткой функции Ляпунова;
- адаптивного управления с неизвестными параметрами системы Т–С.

На рисунке представлена структура РНЛ, центральным ядром которой является блок нечеткой логики (БНЛ), включающий в себя блоки фаззификации, базы правил, формирователя логического решения и дефаззификации. Структура РНЛ может быть синтезирована на основе совокупности пропорциональной (П), интегральной (И) и дифференциальной (Д) составляющих регулятора.

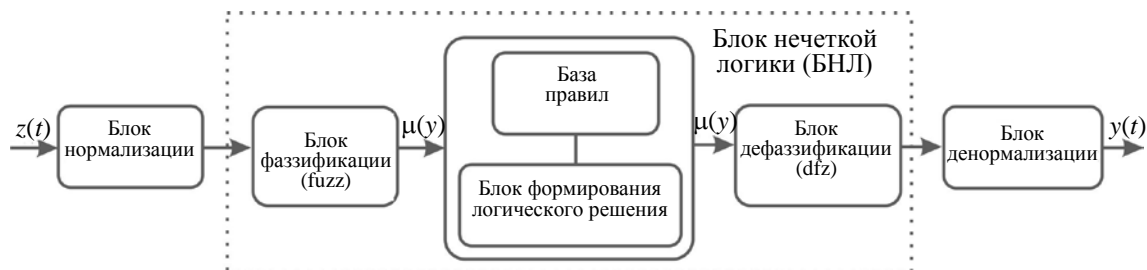


Рисунок. Структурная схема РНЛ 1-го типа

Первая система управления, основанная на применении лингвистических правил, была реализована Мамдани [7], предложившим методику построения БНЛ на основе лингвистических выводов. Переход из пространства физических переменных в нечеткие осуществляется с помощью операции фаззификации (fuzz) и определяется типом задания нечетких функций принадлежности.

Регулятор на основе теории нечеткой логики с функцией принадлежности первого типа

На практике для описания систем управления традиционно использовались и поэтому получили наибольшее распространение треугольные, трапециевидные и колоколообразные функции принадлежности (ФП), которые могут быть отнесены к ФП первого типа. Переход от нечеткого логического вывода к физической величине производится с помощью операции дефаззификации (dfz) и осуществляется в случае использования ФП 1-го типа методом центра тяжести (cog), центра области (coa), среднего максимума (tom), индексными методами (idfz). Наиболее точен в технических системах метод центра тяжести, однако при необходимости фильтрации случайных возмущений наиболее предпочтителен метод среднего максимума. Структура и основные принципы синтеза систем с применением нечеткой логики приведены в работах [18–20].

База правил формируется в лингвистической форме на основе знаний эксперта о том, какое именно управление необходимо использовать в системе, чтобы достигнуть заданных показателей качества. Однако существуют стандартные базы правил, которые описывают типовой процесс приближения искомой величины к заданным значениям.

Регулятор на основе теории нечеткой логики РНЛ (*Fuzzy Logic Controller*), проектируют с применением пропорциональных (П), интегральных (И) и дифференциальных (Д) каналов. В статье [21] приведены различные структуры РНЛ, показана методика синтеза РНЛ и проведен сравнительный анализ основных типов РНЛ прямого действия (с П-, ПИ-, ПИД-каналами) на примере системы управления скоростью вращения двигателя в электроприводе постоянного тока.

В статье [22] рассмотрены различные способы реализации интегральной составляющей в структуре РНЛ с двумя входными сигналами (ошибка и скорость ее изменения) и одним выходным сигналом. Данные РНЛ сравниваются с традиционными ПИ- и ПИД-регуляторами, управляющими понижающим и повышающим преобразователями DC-DC. Алгоритмы реализованы на TMS320F2812, и показано, что время вычисления с РНЛ составляет 3,6 мкс, тогда как время вычисления с ПИД-регулятором – 1 мкс. Результаты экспериментов показали, что при использовании регуляторов с нечеткой логикой достигаются как высокая скорость переходных процессов, так и стабильный режим работы. Для понижающего преобразователя результаты применения ПИД- и ПИ-регуляторов сопоставимы с применением РНЛ. В случае управления повышающим преобразователем нечеткий подход к управлению дал более высокую скорость переходных процессов.

В статье [23] проведено сравнение РНЛ П-/ПИ-/ПД-/ПИД-типов с традиционными П-/ПИ-/ПД-/ПИД-регуляторами для управления объектом высокого порядка с зоной нечувствительности. РНЛ построены с двумя входными сигналами (ошибка и изменение ошибки) и одним выходным (сигнал управления). Показано, что в системах с применением РНЛ перерегулирование в среднем в пять раз меньше и время переходного процесса в среднем в два раза меньше, чем в системах с традиционными регуляторами. В исследовании [24] производится сравнение РНЛ и ПИД-регулятора в контуре управления положением системы с двигателем постоянного тока (ДПТ). РНЛ содержит два входных сигнала и один выходной с дефазификацией методом центра тяжести. Показано, что система с РНЛ в контуре положения на 30 % сокращает время переходного процесса в сравнении с системой с традиционным ПИД-регулятором.

В статье [25] анализируются два типа РНЛ – с ПИ- и ПИД-каналами. Для синтеза РНЛ используется структура с тремя входными сигналами (ошибка, дифференциал и вторая производная ошибки). Сравниваются два подхода к дефазификации – линейная дефазификация и нелинейная (метод центра тяжести). Показано, что наилучшими точностными показателями обладает РНЛ с дефазификацией методом центра тяжести, а система с РНЛ ПИД-типа обрабатывает сигнал задания быстрее, но с большим перерегулированием по сравнению с системой с РНЛ ПИ-типа.

В статье [26] реализован РНЛ контура положения следящего электропривода опорно-поворотного устройства с нежесткими осями, приведены его структура и методика настройки, выполнено сравнение с традиционным ПИ-регулятором в контуре управления положением.

Адаптивный РНЛ (РНЛА) на основе нечеткой логики (adaptive fuzzy controller) строится на базе структуры с ПИД-каналами. Характерная схема РНЛА, используемого для исключения колебаний амплитуды напряжения питания инвертора, приведена в [27]. Три параметра РНЛА K_p , K_I и K_D настраиваются в режиме реального времени с использованием нечеткой логики. Входными сигналами являются ошибка и скорость изменения ошибки системы. Три выходных сигнала РНЛА умножаются на коэффициенты $\Delta K_p(k)$, $\Delta K_I(k)$ и $\Delta K_D(k)$. Приводится база правил, единая для всех выходных сигналов. Применение РНЛА позволило избежать колебаний амплитуды напряжения.

В статьях [28, 29] приведена методика синтеза адаптивного РНЛ для управления положением двух-массовой системой с нежесткими связями, построенного по аналогичной схеме, однако с использованием трех различных баз правил для выходных переменных РНЛА. Проведено сравнение РНЛА с традиционным ПИ-регулятором в контуре управления положением, и экспериментально показано, что применение РНЛА устраняет «шаговый» режим в режиме слежения на инфранизких скоростях.

В статье [30] приведен синтез РНЛА системы управления поворота антенны радиолокационной станции, которая имеет нежесткости. Показано, что время переходного процесса в системе с РНЛА намного меньше, чем в системе с ПИД-регулятором в контуре положения.

Сравнение традиционного ПИД-регулятора в системе управления скоростью вентильного двигателя (ВД) с РНЛ с ПИД-каналами и РНЛА проведено в исследовании [31]. Используется по семь термов входных и выходных сигналов. Входными сигналами являются ошибка и скорость изменения ошибки, выходные сигналы РНЛА имеют интегральную и дифференциальную составляющие, к сигналу управления прибавляется пропорциональная составляющая. Исследование различных скоростных режимов работы ВД показало, что целесообразно использовать РНЛА на низких и высоких скоростях работы ВД, при этом обеспечивается высокая скорость протекания переходных процессов с наименьшим перерегулированием.

Характерные особенности *гибридных регуляторов на основе нечеткой логики (гибридный РНЛ)* рассмотрены в работах [32–36]. В [32] выполнен синтез гибридного РНЛ как параллельно соединенных РНЛ ПД-типа с традиционным И-регулятором в контуре управления скоростью серводвигателя. Также в данном исследовании выполнен синтез РНЛ, состоящего из двух параллельно соединенных РНЛ – ПИ и

ПД. Показано, что в системе с гибридным РНЛ отсутствует статическая ошибка. В [33] сравниваются системы управления техническим объектом с традиционным ПИД-регулятором с гибридным РНЛ, состоящим из РНЛ П-типа и традиционного ИД-регулятора. Показано, что в системе с гибридным РНЛ перерегулирование значительно меньше, чем в системе с традиционным ПИД-регулятором при ступенчатом входном сигнале. При синусоидальном входном сигнале в системе с гибридным РНЛ в контуре управления практически отсутствует задержка выходного сигнала, тогда как в системе с ПИД-регулятором она значительна. При слежении за сигналом произвольной формы наилучшими временными показателями обладает система с ПИД-регулятором. Система с гибридным РНЛ обрабатывает данный сигнал с перерегулированием, в десять раз меньшим, однако при этом время переходного процесса в два раза больше, чем у системы с традиционным регулятором. В [34] выводы, приведенные в работе [33], подтверждены экспериментально с использованием объекта управления в виде механического манипулятора. В [35] предложена структура гибридного РНЛ, состоящего из традиционного П-регулятора и РНЛ И-типа в системе векторного управления двигателем. Предложено использовать четыре гибридных РНЛ – скорости, магнитного потока, момента и вектора намагничивания. При экспериментальном подтверждении предложенной структуры управления показано, что система обладает робастностью, это также подтверждено экспериментом со вторым типом двигателя. В [36] выполнен синтез гибридного РНЛ, состоящего из последовательно соединенных РНЛ ПИД-типа и традиционного ПИД-регулятора для преобразователя DC-DC. Показано, что гибридный РНЛ имеет наименьшее время переходного процесса, чем РНЛ, а по сравнению с традиционным ПИД-регулятором в гибридном РНЛ отсутствует статическая ошибка.

РНЛ со скользящим режимом (fuzzy sliding-mode controller) применяется в системах управления нелинейными системами с неопределенностями. Ключевой идеей РНЛ скользящей системы является симбиоз РНЛ и традиционного релейного регулятора в скользящем режиме работы: как правило, данные регуляторы соединяются последовательно. В [39] выполнено сравнение РНЛ и регулятора с использованием скользящего режима, показано, что при имитационном моделировании РНЛ отслеживает синусоидальный сигнал без ошибки, он более эффективен для компенсации вибрации, чем традиционный регулятор с использованием скользящего режима. В [40] приведен синтез РНЛ со скользящей поверхностью размерности $r \times m$ (r – число входных переменных РНЛ, m – число выходных фазифицированных уровней функции принадлежности). В исследовании рассмотрены три типа нечеткой аппроксимации – $\text{sign}(S)$, $\text{sat}(S)$, $\text{tanh}(S)$ и проведены верификационные исследования синтезированных регуляторов для системы «брус–шар». В [41] проведен синтез РНЛ, реализующего скользящий режим при управлении движением пальцев руки робота с пятью степенями свободы. Предложенный алгоритм управления устраняет дребезжание конструкции, характерное для режима с традиционным управлением в режиме скольжения. Экспериментальные исследования показали, что предлагаемый регулятор минимизирует ударную силу в процессе захвата детали, он нечувствителен к внешним возмущениям. Адаптивное нейронечеткое управление в скользящем режиме для системы с неизвестными нелинейными параметрами представлено в [42]. Асимптотическая устойчивость полученной системы исследована с помощью функции Ляпунова. Полученные результаты обобщены на класс динамических систем с неопределенными нелинейными функциями. В статье [43] выполнен синтез РНЛ со скользящим режимом для динамических систем произвольного вещественного порядка. Разработанный РНЛ с режимом скольжения гарантирует стабильность унифицированных хаотических систем. Эффективность применения данного подхода иллюстрируется тремя примерами численного моделирования. В [44] представлен синтез РНЛ со скользящим режимом в контуре управления скоростью вентильного двигателя.

Вычисление коэффициентов нормализации и денормализации до настоящего времени не является строго формализованной задачей, часто они находятся эмпирически. В связи с этим используют нейронечеткие и эволюционные методы при настройке РНЛ и РНЛА. В книге [45] рассматриваются три фундаментальных вычислительных интеллекта: нейронные сети, системы с нечеткой логикой и эволюционные алгоритмы. Проведен синтез регуляторов на их основе для технических систем. Рассмотрено практическое применение таких систем. В [46] приведены архитектура *адаптивной нейронечеткой системы вывода (adaptive network-based fuzzy inference system, ANFIS)* и алгоритмы ее обучения. Данное исследование по изучению и синтезу нейронечеткой сети ANFIS продолжено в [47], выполнен синтез регуляторов в технических системах на основе нейронечеткого управления. В книге [48] проведен синтез нейронечетких систем управления, рассматриваются робастность таких систем, функции Ляпунова, H^∞ -регулирование, LQR-регуляторы. В работах [49–51] приведен синтез нейронечетких регуляторов для трехфазного инвертора для трехфазной синхронной машины, инвертора для системы на возобновляемых источниках электрической энергии и электрической машины с эластичными связями соответственно. Данные системы различаются лишь количеством слоев нейронечеткой сети и основаны на методике синтеза, приведенного в [45].

В работах В.В. Курейчика [52, 53] приведены методики настройки коэффициентов РНЛ с использованием эволюционных методов, в частности, генетических алгоритмов (ГА), выполнен синтез таких

систем. В статье [54] представлен пример синтеза системы управления электроприводом с подстройкой при помощи генетического алгоритма трех РНЛ – П-типа, И-типа и Д-типа, которые являются частью гибридного РНЛ, состоящего из традиционного ПИД-регулятора и трех П-, И-, и Д- РНЛ. Входными сигналами блока, реализующего генетический алгоритм поиска, являются дефазифицированные сигналы выхода РНЛ П-, И- и Д-типов (G_p , G_I и G_D соответственно), а также ошибка по скорости (e) электропривода. Фитнес-функция в такой системе:

$$F(G_p, G_I, G_D) = \frac{1}{\left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (e(k))^2 \right)}$$

Имитационное моделирование и эксперимент показали, что предложенный РНЛ обладает робастностью, приводятся рекомендации по его применению в высокоточных электроприводах с неизвестными внешними возмущениями. В статье [55] представлен синтез РНЛ скорости вентильного двигателя с подстройкой его коэффициентов при помощи генетического алгоритма.

ГА используются не только для расчета коэффициентов нормализации и денормализации РНЛ, но и для оптимизации правил РНЛ, а также для подстройки функций принадлежности (ФП) регулятора. Используемая фитнес-функция в данной системе также зависит от скоростной ошибки e :

$$F = \frac{1}{(J + 10^{-10})},$$

где $J = \int_0^{\infty} [\omega_1 |e(t)| + \omega_2 u^2(t) + \omega_4 e(t)y(t)] dt + \omega_3 t_u$; $\omega_1 - \omega_4$ – коэффициенты; $e(t)$ – сигнал ошибки, $u(t)$ – сигнал управления, $y(t)$ – выходной сигнал. Имитационное моделирование подтвердило работоспособность предложенного регулятора, продемонстрировано, что РНЛ с ГА обладает более высоким откликом, по сравнению с обычным РНЛ, также показано, что в системе отсутствует перерегулирование – процесс носит апериодический характер.

В статье [56] представлен алгоритм синтеза функций принадлежности и выполнен расчет коэффициентов нормализации с применением генетического алгоритма для РНЛ скорости асинхронного двигателя. Система управления скоростью построена на базе векторного управления координатами электропривода. Используемая фитнес-функция генетического алгоритма зависит от ошибки – e и времени переходного процесса – t_r , а также от постоянных α и β :

$$F = \frac{1}{1 + \alpha \cdot t_r + \beta \sum |e|}$$

Эксперименты показали, что ФП синтезированного регулятора, настроенного на управление скоростью «двигателя № 1», автоматически подстраиваются для управления скоростью «двигателя № 2», обладающего моментом инерции, в четыре раза большим по сравнению с «двигателем № 1» причем без изменения времени переходного процесса. Аналогичный алгоритм синтеза РНЛ с применением ГА приведен в [57]. Объектом управления в этом исследовании является синхронный двигатель с постоянными магнитами, и РНЛ управляет скоростью двигателя. Поиску ГА подлежат коэффициенты нормализации, а для сжатия используется линейная обратная квадратичная функция:

$$F = \left(\int_0^{t_r} \left[\omega_e^2(t) + \frac{1}{\rho} i_{qsd}^2(t) \right] dt \right)^{-1},$$

где ρ – произвольно заданное положительное число.

В статье [58] нечеткая система с алгоритмом Сугено совместно с ГА использована для настройки коэффициентов традиционного регулятора напряжения в онлайн-режиме. В статье [59] выполнен синтез адаптивного фильтра Калмана с использованием нечеткой логики в системе управления скоростью электропривода с упругими связями. Нечеткая логика с применением ГА используется для определения коэффициентов q_{44} и q_{55} матрицы Q в зависимости от механического момента и изменения скорости соответственно. Данные элементы матрицы Q изменяются в онлайн-режиме. Экспериментальная проверка разработанных алгоритмов осуществлена с применением лабораторного стенда, включающего в себя два двигателя постоянного тока, соединенные между собой стальным валом. Показано, что разработанная система обеспечивает заданные показатели качества. В статье [60] для электропривода, представленного в статье [59], методом нечеткой логики с ГА оптимизирован традиционный регулятор с предсказательными моделями. Подстройка матриц происходит оффлайн. Экспериментально показано, что данный алгоритм управления скоростью применим к системам с упругими связями.

Регулятор на основе теории нечеткой логики с ФП второго типа

Функции принадлежности второго типа для РНЛ (РНЛ 2-го типа) предложены Л. Заде в 1975 г., однако получили свое развитие сравнительно недавно. Структура РНЛ 2-го типа представлена в статье

[61], по сравнению с РНЛ 1-го типа, рассмотренным ранее, он включает дополнительный преобразователь ФП из второго типа в первый. В отличие от ФП первого типа, ФП второго типа является областью возможных значений (гауссова или трапецеидального типа), а не линейной функцией. Наибольшее распространение в данных системах получил метод дефаззификации Карника–Менделя [62] для преобразования вход–выход в РНЛ 2-го типа. В исследованиях [61, 63] приведен алгоритм синтеза РНЛ 2-го типа для настройки регулятора: выбор коэффициентов ФП, соотношений в базе правил и т.д. Для этого используются как градиентные, так и эволюционные методы. Предложенный алгоритм дефаззификации для РНЛ 2-го типа был усовершенствован Менделем в [64], так как предыдущие исследования показали, что использование методов дефаззификации алгоритмом Карника–Менделя и расширенным алгоритмом Карника–Менделя путем объединения центроидов каждой из α -плоскостей приводит к обширной вычислительной нагрузке на процессор. Предложенный метод дефаззификации – «метод потока центра» (centroid-flow), алгоритм которого представлен в [65], позволил сократить время вычисления на 50–80 % в зависимости от режима работы и повысить точность решения, при условии достаточной дискретизации α -плоскости. Проведенные имитационные моделирования показали корректность предложенного метода. В статье [66] приведено детальное математическое описание ФП РНЛ 2-го типа, а также представлены примеры использования данных видов регуляторов в различных технических системах. В статье [67] выполнен синтез адаптивного РНЛ с эталонной моделью на базе РНЛ 2-го типа для управления скоростью двухмассового механизма с упругими связями. При этом различным соотношениям в базе правил присваиваются разные «веса», которые учитываются в алгоритме работы РНЛ. Исследованы режимы работы на высоких и ультранизких скоростях, где, по сравнению с ПИ-регулятором скорости, РНЛ 2-го типа показал лучшие точностные характеристики. Особенности применения РНЛ 2-го типа для технических систем (управление движением робота, управление скоростью дизельного судна) рассмотрены в исследовании команды Университета Эссекса (Великобритания) [68].

Устойчивость систем с нечеткой логикой

Важной составляющей в реализации систем с нечеткой логикой является исследование ее устойчивости, что трудно реализуемо в условиях нелинейности и неопределенности данных систем. Большой вклад в данные исследования внесли Танака (Kazuо Tanaka) и Хуа Ванг (Hua O. Wang) [69–73]. В их работах найдены условия асимптотической устойчивости для систем с регуляторами, построенными на основе нечеткой логики. В работе [69] вводится понятие нечеткой функции Ляпунова и на ее основе исследуются методы обеспечения устойчивости систем с РНЛ. В работах [70, 71] исследуются кусочно-квадратичная и неквадратичная функции Ляпунова для систем с нечеткой логикой. Впервые применена минимально-кусочная функция Ляпунова для исследования устойчивости непрерывной системы типа Такаги–Сугено, а ее исследование продолжено в работах [72–75]. Также проблемами устойчивости систем с нечеткой логикой занимается В.А. Горюшкин, в работах которого [76, 77] приводятся условия асимптотической устойчивости систем с применением РНЛ на основе метода функций Ляпунова.

Заключение

В настоящей статье приведены основные положения теории нечеткой логики применительно к синтезу соответствующих регуляторов систем управления, а также представлены результаты опубликованных исследований по применению таких регуляторов для управления электромеханическими объектами. На примерах различных систем показано, что основанием для использования теории нечеткой логики является неизвестная или нелинейная математическая модель объекта управления, а также наличие нелинейных возмущающих воздействий. В этом случае использование регуляторов с нечеткой логикой позволяет получить лучшие статические и динамические характеристики всей системы по сравнению с использованием традиционных регуляторов. Описана базовая структура регуляторов с нечеткой логикой, на основе которой строится их классификация по различным признакам: топологиям структур, методам формирования логического решения, методам дефаззификации. Рассматриваются примеры использования нейронечеткого подхода к построению регуляторов. Приведенный обзор публикаций, содержащих не только теоретические исследования, но и экспериментальные подтверждения, позволяет сделать вывод об обоснованности применения регуляторов с нечеткой логикой как при управлении движением роботизированных систем, так и в силовых энергетических цепях. Также рассмотрены наиболее часто используемые критерии нахождения оптимальности для настройки нечетких регуляторов с применением генетических алгоритмов.

Отмечается, что в настоящее время ведутся исследования новых структур регуляторов с нечеткой логикой, в частности, разработаны новые типы функций принадлежности, активно исследуются методы анализа асимптотической устойчивости систем, имеющих в своем составе регуляторы с нечеткой логикой на основе нечетких функций Ляпунова. Большое число используемых при составлении обзора иностранных источников обусловлено тем, что отечественные исследования, в общей массе, значительно отстают от иностранных разработок и часто повторяют их.

Литература

1. Васильев В.Н., Томасов В.С., Шаргородский В.Д., Садовников М.А. Состояние и перспективы развития прецизионных электроприводов комплексов высокоточных наблюдений // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2008. № 6. Т. 51. С. 5–12.
2. Zadeh L.A. Fuzzy sets // *Information and Control*. 1965. V. 8. N 3. P. 338–353. doi: 10.1016/s0019-9958(65)90241-x
3. Zadeh L.A. Fuzzy algorithm // *Information and Control*. 1968. V. 12. N 2. P. 94–102. doi: 10.1016/s0019-9958(68)90211-8
4. Zadeh L.A. Similarity relations and fuzzy orderings // *Information Science*. 1971. V. 3. N 2. P. 177–200. doi: 10.1016/s0020-0255(71)80005-1
5. Zadeh L.A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1973. V. SMC-3. N 1. P. 28–44. doi: 10.1109/tsmc.1973.5408575
6. Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning - I // *Information Sciences*. 1975. V. 8. N 3. P. 199–249. doi: 10.1016/0020-0255(75)90036-5
7. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for simple dynamic plant // *Proc. Institution of Electrical Engineers*. 1974. V. 121. N 12. P. 1585–1588. doi: 10.1049/piee.1974.0328
8. Mamdani E.H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // *International Journal of Man-Machine Studies*. 1975. V. 7. N 1. P. 1–13. doi: 10.1016/s0020-7373(75)80002-2
9. King P.J., Mamdani E.H. The application of fuzzy control systems to industrial process // *Automatica*. 1977. V. 13. N 3. P. 235–242. doi: 10.1016/0005-1098(77)90050-4
10. Pappis C.P., Mamdani E.H. A fuzzy logic controller for a traffic junction // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1977. V. 7. N 10. P. 707–717. doi: 10.1109/tsmc.1977.4309605
11. Sugeno M. (ed.) *Industrial Applications of Fuzzy Control*. New York: Elsevier, 1985.
12. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1985. V. SMC-15. N 1. P. 116–132. doi: 10.1109/TSMC.1985.6313399
13. Sugeno M., Nishida M. Fuzzy control of model car // *Fuzzy Sets and Systems*. 1985. V. 16. N 2. P. 103–113. doi: 10.1016/s0165-0114(85)80011-7
14. Tanaka K., Sugeno M. Stability analysis and design of fuzzy control systems // *Fuzzy Sets and Systems*. 1992. V. 45. N 2. P. 135–156. doi: 10.1016/0165-0114(92)90113-i
15. Sugeno M., Yasukawa T. A fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 1993. V. 1. N 1. P. 7–31. doi: 10.1109/tfuzz.1993.390281
16. Sugeno M. On stability of fuzzy systems expressed by fuzzy rules with singleton consequents // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 1999. V. 7. N 2. P. 201–224. doi: 10.1109/91.755401
17. Taniguchi T., Sugeno M. Stabilization of nonlinear systems based on piecewise Lyapunov functions // *Proc. 13th IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*. Budapest, Hungary, 2004. P. 1607–1612. doi: 10.1109/fuzzy.2004.1375420
18. Wang P.P., Ruan D., Kerre E.E. *Fuzzy Logic. A Spectrum of Theoretical and Practical Issues*. Springer Berlin Heidelberg, 2007. doi: 10.1007/978-3-540-71258-9
19. Trillas E., Eciolaza L. *Fuzzy Logic An Introductory Course for Engineering Students*. Springer, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-14203-6
20. Harris J. *Fuzzy Logic Applications in Engineering Science*. Springer, 2006. doi: 10.1007/1-4020-4078-4
21. Демидова Г.Л., Кузин А.Ю., Лукичев Д.В. Особенности применения нечетких регуляторов на примере управления скоростью вращения электродвигателя постоянного тока // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16 № 5. С. 872–878. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-872-878
22. Guo L., Hung J.Y., Nelms R.M. Evaluation of DSP-based PID and fuzzy controllers for DC–DC converters // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009. V. 56. N 6. P. 2237–2248. doi: 10.1109/TIE.2009.2016955

References

1. Vasiliev V.N., Tomasov V.S., Shargorodsky V.D., Sadovnikov M.A. Precision electric drive systems used in high accuracy complexes of watching for space objects, current statement and development prospects. *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 2008, vol. 51, no. 6, pp. 5–12. (in Russian)
2. Zadeh L.A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965, vol. 8, no. 3, pp. 338–353. doi: 10.1016/s0019-9958(65)90241-x
3. Zadeh L.A. Fuzzy algorithm. *Information and Control*, 1968, vol. 12, no. 2, pp. 94–102. doi: 10.1016/s0019-9958(68)90211-8
4. Zadeh L.A. Similarity relations and fuzzy orderings. *Information Science*, 1971, vol. 3, no. 2, pp. 177–200. doi: 10.1016/s0020-0255(71)80005-1
5. Zadeh L.A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1973, vol. SMC-3, no. 1, pp. 28–44. doi: 10.1109/tsmc.1973.5408575
6. Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning – I. *Information Sciences*, 1975, vol. 8, no. 3, pp. 199–249. doi: 10.1016/0020-0255(75)90036-5
7. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for simple dynamic plant. *Proc. Institution of Electrical Engineers*, 1974, vol. 121, no. 12, pp. 1585–1588. doi: 10.1049/piee.1974.0328
8. Mamdani E.H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 1975, vol. 7, no. 1, pp. 1–13. doi: 10.1016/s0020-7373(75)80002-2
9. King P.J., Mamdani E.H. The application of fuzzy control systems to industrial process. *Automatica*, 1977, vol. 13, no. 3, pp. 235–242. doi: 10.1016/0005-1098(77)90050-4
10. Pappis C.P., Mamdani E.H. A fuzzy logic controller for a traffic junction. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1977, vol. 7, no. 10, pp. 707–717. doi: 10.1109/tsmc.1977.4309605
11. Sugeno M. (ed.) *Industrial Applications of Fuzzy Control*. New York, Elsevier, 1985.
12. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1985, vol. SMC-15, no. 1, pp. 116–132. doi: 10.1109/TSMC.1985.6313399
13. Sugeno M., Nishida M. Fuzzy control of model car. *Fuzzy Sets and Systems*, 1985, vol. 16, no. 2, pp. 103–113. doi: 10.1016/s0165-0114(85)80011-7
14. Tanaka K., Sugeno M. Stability analysis and design of fuzzy control systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 1992, vol. 45, no. 2, pp. 135–156. doi: 10.1016/0165-0114(92)90113-i
15. Sugeno M., Yasukawa T. A fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1993, vol. 1, no. 1, pp. 7–31. doi: 10.1109/tfuzz.1993.390281
16. Sugeno M. On stability of fuzzy systems expressed by fuzzy rules with singleton consequents. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1999, vol. 7, no. 2, pp. 201–224. doi: 10.1109/91.755401
17. Taniguchi T., Sugeno M. Stabilization of nonlinear systems based on piecewise Lyapunov functions. *Proc. 13th IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*. Budapest, Hungary, 2004, pp. 1607–1612. doi: 10.1109/fuzzy.2004.1375420
18. Wang P.P., Ruan D., Kerre E.E. *Fuzzy Logic. A Spectrum of Theoretical and Practical Issues*. Springer Berlin Heidelberg, 2007. doi: 10.1007/978-3-540-71258-9
19. Trillas E., Eciolaza L. *Fuzzy Logic An Introductory Course for Engineering Students*. Springer, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-14203-6
20. Harris J. *Fuzzy Logic Applications in Engineering Science*. Springer, 2006. doi: 10.1007/1-4020-4078-4
21. Demidova G.L., Kuzin A.Yu., Lukichev D.V. Application features of fuzzy controllers on example of DC motor speed control. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 5, pp. 872–878. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-872-878
22. Guo L., Hung J.Y., Nelms R.M. Evaluation of DSP-based PID and fuzzy controllers for DC–DC converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 2237–2248. doi: 10.1109/TIE.2009.2016955
23. Preeti M., Beniwal N.S. Comparison of conventional and fuzzy P/PI/PD/PID controller for higher order non linear plant with high dead time. *International Journal of Scientific and Research*

23. Preeti M., Beniwal N.S. Comparison of conventional and fuzzy P/PI/PD/PID controller for higher order non linear plant with high dead time // *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2012. V. 2. N 8. P. 377–382.
24. Lin P.H., Hwang S., Chou J. Comparison on fuzzy logic and PID controls for a DC motor position controller // *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1994. V. 3. P. 1930–1935. doi: 10.1109/IAS.1994.377695
25. Santos M., Dormido S., de la Cruz J.M. Fuzzy-PID controllers vs. fuzzy-PI controllers // *Proc. IEEE 5th Int. Fuzzy Systems*. 1996. V. 3. P. 1598–1604. doi: 10.1109/FUZZY.1996.552571
26. Лукичев Д.В., Демидова Г.Л. Нечеткая система управления позиционным следящим электроприводом опорно-поворотных устройств с нежесткими осями // *Вестник ИГЭУ*. 2013. № 6. С. 60–64.
27. Wang Q., Liang D., Du J. Design of mining flameproof voltage stabilizing transformer adopting adaptive fuzzy PID controller // *Proc. 17th Int. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. 2014. P. 678–681. doi: 10.1109/ICEMS.2014.7013554
28. Lukichev D.V., Demidova G.L., Brock S. Fuzzy adaptive PID control for two-mass servo-drive system with elasticity and friction // *Proc. IEEE 2nd Int. Conf. on Cybernetics (CYBCONF)*. 2015. P. 443–448. doi: 10.1109/CYBCONF.2015.7175975
29. Lukichev D.V., Demidova G.L. PID-type fuzzy adaptive control for two-mass servo-drive system: Design, simulation and experiment // *Proc. IX Int. Conf. on Power Drives Systems (ICPDS)*. 2016. P. 1–5. doi: 10.1109/ICPDS.2016.7756679
30. Иванченко А.Я. Применение адаптивной настройки пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора для управления антенной радиолокатора // *Труды МАИ*. 2013. № 66. С. 19.
31. Kandiban R., Arulmozhiyal R. Speed control of BLDC motor using adaptive fuzzy PID controller // *Procedia Engineering*. 2012. V. 38. P. 306–313. doi: 10.1016/j.proeng.2012.06.039
32. Brehm T., Rattan. K.S. Hybrid fuzzy logic PID controller // *Proc. IEEE 1993 National Aerospace and Electronics Conference*. 1993. V. 2. P. 807–813 doi: 10.1109/NAECON.1993.290839
33. Li W. Design of a hybrid fuzzy logic proportional plus conventional integral-derivative controller // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 1998. V. 6. N 4. P. 449–463. doi: 10.1109/91.728430
34. Li W., Chang X.G., Farrell J., Wahl F.M. Design of an enhanced hybrid fuzzy P+ID controller for a mechanical manipulator // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*. 2001. V. 31. N 6. P. 938–945. doi: 10.1109/3477.969497
35. Cortajarena J.A., De Marcos J., Alvarez P., Vicandi F.J., Alkorta P. Indirect vector controlled induction motor with four hybrid P+fuzzy PI controllers // *Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. 2007. P. 197–202. doi: 10.1109/ISIE.2007.4374598
36. Vindhya V., Reddy V. PID-fuzzy logic hybrid controller for a digitally controlled DC-DC converter // *Proc. Int. Conf. on Green Computing, Communication and Conservation of Energy (ICGCE)*. 2013. P. 362–366. doi: 10.1109/ICGCE.2013.6823461
37. Уткин В.И. Скользящие режимы и их применения в системах с переменной структурой. М.: Наука, 1974. 272 с.
38. Palm R. Robust control by fuzzy sliding mode // *Automatica*. 1994. V. 30. N 9. P. 1429–1437. doi: 10.1016/0005-1098(94)90008-6
39. Bonivento C., Fantuzzi C., Martin L. Adaptive fuzzy logic controller synthesis via a sliding mode approach // *Proc. European Control Conference*. 1995. ECC 95. V. 2.
40. Glower J.S., Munighan J. Designing fuzzy controllers from a variable structures standpoint // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 1997. V. 5. N 1. P. 138–144. doi: 10.1109/91.554460
41. Wang K.J. Fuzzy sliding mode joint impedance control for a tendon-driven robot hand performing peg-in-hole assembly // *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. 2016. P. 2087–2092. doi: 10.1109/ROBIO.2016.7866637
42. Wen S., Chen M.Z.Q., Zeng Z., Huang T., Li C. Adaptive neural-fuzzy sliding-mode fault-tolerant control for uncertain nonlinear systems // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2017. V. 47. N 8. P. 2268–2278. doi: 10.1109/TSMC.2017.2648826
43. Song X., Song S. Fuzzy sliding mode control for fractional-order unified chaotic system. *Proc. IEEE Int. Conf. on Information and Automation*, 2016, pp. 1090–1095. doi: 10.1109/ICInfA.2016.7831981
44. Nigam V., Hussain S., Agarwal S.N. A hybrid fuzzy sliding mode control for a DC motor position controller. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1994, vol. 3, pp. 1930–1935. doi: 10.1109/IAS.1994.377695
45. Santos M., Dormido S., de la Cruz J.M. Fuzzy-PID controllers vs. fuzzy-PI controllers. *Proc. IEEE 5th Int. Fuzzy Systems*, 1996, vol. 3, pp. 1598–1604. doi: 10.1109/FUZZY.1996.552571
46. Lukichev D.V., Demidova G.L. Fuzzy control system of positioning servo drives of elastic coupling rotary supports. *Vestnik ISPU*, 2013, no. 6, pp. 60–64. (in Russian)
47. Wang Q., Liang D., Du J. Design of mining flameproof voltage stabilizing transformer adopting adaptive fuzzy PID controller. *Proc. 17th Int. Conf. on Electrical Machines and Systems, ICEMS*, 2014, pp. 678–681. doi: 10.1109/ICEMS.2014.7013554
48. Lukichev D.V., Demidova G.L., Brock S. Fuzzy adaptive PID control for two-mass servo-drive system with elasticity and friction. *Proc. IEEE 2nd Int. Conf. on Cybernetics, CYBCONF*, 2015, pp. 443–448. doi: 10.1109/CYBCONF.2015.7175975
49. Lukichev D.V., Demidova G.L. PID-type fuzzy adaptive control for two-mass servo-drive system: Design, simulation and experiment. *Proc. IX Int. Conf. on Power Drives Systems, ICPDS*, 2016, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICPDS.2016.7756679
50. Ivanchenko A.Ya. The use of adaptive tuning of proportional-integral-differential controller for antenna radar controlling. *Trudy MAI*, 2013, no. 66, p. 19. (in Russian)
51. Kandiban R., Arulmozhiyal R. Speed control of BLDC motor using adaptive fuzzy PID controller. *Procedia Engineering*, 2012, vol. 38, pp. 306–313. doi: 10.1016/j.proeng.2012.06.039
52. Brehm T., Rattan. K.S. Hybrid fuzzy logic PID controller. *Proc. IEEE 1993 National Aerospace and Electronics Conference*, 1993, vol. 2, pp. 807–813 doi: 10.1109/NAECON.1993.290839
53. Li W. Design of a hybrid fuzzy logic proportional plus conventional integral-derivative controller. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1998, vol. 6, no. 4, pp. 449–463. doi: 10.1109/91.728430
54. Li W., Chang X.G., Farrell J., Wahl F.M. Design of an enhanced hybrid fuzzy P+ID controller for a mechanical manipulator. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2001, vol. 31, no. 6, pp. 938–945. doi: 10.1109/3477.969497
55. Cortajarena J.A., De Marcos J., Alvarez P., Vicandi F.J., Alkorta P. Indirect vector controlled induction motor with four hybrid P+fuzzy PI controllers. *Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2007, pp. 197–202. doi: 10.1109/ISIE.2007.4374598
56. Vindhya V., Reddy V. PID-fuzzy logic hybrid controller for a digitally controlled DC-DC converter. *Proc. Int. Conf. on Green Computing, Communication and Conservation of Energy, ICGCE*, 2013, pp. 362–366. doi: 10.1109/ICGCE.2013.6823461
57. Utkin V.I. *Sliding Modes and their Application in Variable Structure Systems*. Moscow, Nauka Publ., 1974, 272 p. (in Russian)
58. Palm R. Robust control by fuzzy sliding mode. *Automatica*, 1994, vol. 30, no. 9, pp. 1429–1437. doi: 10.1016/0005-1098(94)90008-6
59. Bonivento C., Fantuzzi C., Martin L. Adaptive fuzzy logic controller synthesis via a sliding mode approach. *Proc. European Control Conference*, 1995, ECC 95, vol. 2.
60. Glower J.S., Munighan J. Designing fuzzy controllers from a variable structures standpoint. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1997, vol. 5, no. 1, pp. 138–144. doi: 10.1109/91.554460
61. Wang K.J. Fuzzy sliding mode joint impedance control for a tendon-driven robot hand performing peg-in-hole assembly. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, ROBIO*, 2016, pp. 2087–2092. doi: 10.1109/ROBIO.2016.7866637
62. Wen S., Chen M.Z.Q., Zeng Z., Huang T., Li C. Adaptive neural-fuzzy sliding-mode fault-tolerant control for uncertain nonlinear systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, vol. 47, no. 8, pp. 2268–2278. doi: 10.1109/TSMC.2017.2648826
63. Song X., Song S. Fuzzy sliding mode control for fractional-order unified chaotic system. *Proc. IEEE Int. Conf. on Information and Automation*, 2016, pp. 1090–1095. doi: 10.1109/ICInfA.2016.7831981
64. Nigam V., Hussain S., Agarwal S.N. A hybrid fuzzy sliding

43. Song X., Song S. Fuzzy sliding mode control for fractional-order unified chaotic system // Proc. IEEE Int. Conf. on Information and Automation. 2016. P. 1090–1095. doi: 10.1109/ICInfA.2016.7831981
44. Nigam V., Hussain S., Agarwal S.N. A hybrid fuzzy sliding mode controller for a BLDC motor drive // Proc. IEEE 1st Int. Conf. on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems. 2016. P. 1–4. doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853249
45. Fogel D.B., Liu D., Keller J.M. *Fundamentals of Computational Intelligence: Neural Networks, Fuzzy Systems, and Evolutionary Computation*. Wiley, IEEE Press, 2016, 378 p. doi: 10.1002/9781119214403
46. Jang J.-S.R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1993. V. 23. N 3. P. 665–685. doi: 10.1109/21.256541
47. Jang J.-S.R., Sun C.T. Neuro-fuzzy modeling and control // Proceedings of the IEEE. 1995. V. 83. N 3. P. 378–406. doi: 10.1109/5.364486
48. Jang J.-S.R., Sun C.-T. *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*. Prentice Hall, 1997.
49. Massoum A., Chiali E.M., Massoum S., Attou A., Meroufel A. Neuro-fuzzy control of an input output linearization of a permanent magnet synchronous machine fed by a three levels inverter // Proc. 4th Int. Conf. on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. 2013. P. 92–96. doi: 10.1109/PowerEng.2013.6635587
50. Singh M., Chandra A. Real-time implementation of ANFIS control for renewable interfacing inverter in 3P4W distribution network // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013. V. 60. N 1. P. 121–128. doi: 10.1109/TIE.2012.2186103
51. Kaminski M., Szabat K. Neuro-fuzzy state space controller for drive with elastic joint // Proc. 11th Int. Conf. on Power Electronics and Drive Systems. 2015. P. 373–378. doi: 10.1109/PEDS.2015.7203559
52. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. М.: Физматлит, 2006. 320 с.
53. Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И. Теория эволюционных вычислений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 260 с.
54. Rubaai A., Castro-Sitiriche M.J., Ofoli A.R.. DSP-based laboratory implementation of hybrid fuzzy-PID controller using genetic optimization for high-performance motor drives // IEEE Transactions on Industry Applications. 2008. V. 44. N 6. P. 1977–1986. doi: 10.1109/TIA.2008.2006347
55. Gu Deying, Xia Rui. The speed control of brushless DC motor based on fuzzy genetic algorithm // Proc. 25th Chinese Control and Decision Conference. Guiyang, China, 2013. doi: 10.1109/ccdc.2013.6561598
56. Oh W.S., Kim Y.T., Kim C.S., Kwon T.S., Kim H.J. Speed control of induction motor using genetic algorithm based fuzzy controller // Proc. 25th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 1999. P. 625–629. doi: 10.1109/IECON.1999.816464
57. Choi H.H., Yun H.M., Kim Y. Implementation of evolutionary fuzzy PID speed controller for PM synchronous motor // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2015. V. 11. N 2. P. 540–547. doi: 10.1109/TII.2013.2284561
58. Devaraj D., Selvabala B. Real-coded genetic algorithm and fuzzy logic aP. roach for real-time tuning of proportional-integral-derivative controller in automatic voltage regulator system // IET Generation, Transmission and Distribution. 2009. V. 3. N 7. P. 641–649. doi: 10.1049/iet-gtd.2008.0287
59. Drozd K. Estimation of the mechanical state variables of the two-mass system using fuzzy adaptive Kalman filter - Experimental study // Proc. IEEE 2nd Int. Conf. on Cybernetics. Gdynia, Poland, 2015. P. 455–459. doi: 10.1109/CYBConf.2015.7175977
60. Wrobel K. Multilayer soft switchable predictive speed controller for the drive with elastic coupling // Proc. IEEE 2nd Int. Conf. on Cybernetics. Gdynia, Poland, 2015. P. 439–442. doi: 10.1109/CYBConf.2015.7175974
61. Karnik N.N., Mendel J.M. Centroid of a type-2 fuzzy set. *Information Sciences*, 2001, vol. 132, no. 1-4, pp. 195–220. doi: 10.1016/s0020-0255(01)00069-x
62. Wu D., Mendel J.M. Designing practical interval type-2 fuzzy logic systems made simple. *Proc. IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, 2014, pp. 800–807. doi: 10.1109/fuzz-ieee.2014.6891534
63. Begian M.B., Melek W.W., Mendel J.M. Stability analysis of type-2 fuzzy systems. *Proc. IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, 2008, pp. 947–953. doi: 10.1109/fuzzy.2008.4630483
64. Zhai D., Mendel J.M. Computing the centroid of a general type-2 fuzzy set by means of the centroid-flow algorithm. *IEEE*
- method controller for a BLDC motor drive. *Proc. IEEE 1st Int. Conf. on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems*, 2016, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853249

- 10.1016/s0020-0255(01)00069-x
62. Wu D., Mendel J.M. Designing practical interval type-2 fuzzy logic systems made simple // Proc. IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems. 2014. P. 800–807. doi: 10.1109/fuzz-ieee.2014.6891534
 63. Begian M.B., Melek W.W., Mendel J.M. Stability analysis of type-2 fuzzy systems // Proc. IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems. 2008. P. 947–953. doi: 10.1109/fuzzy.2008.4630483
 64. Zhai D., Mendel J.M. Computing the centroid of a general type-2 fuzzy set by means of the centroid-flow algorithm // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2011. V. 19. N 3. P. 401–422. doi: 10.1109/tfuzz.2010.2103076
 65. Zhai D., Mendel J.M. Enhanced centroid-flow algorithm for computing the centroid of general type-2 fuzzy sets // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2012. V. 20. N 5. P. 939–956. doi: 10.1109/tfuzz.2012.2190075
 66. Mazandarani M., Najariyan M. Differentiability of type-2 fuzzy number-valued functions // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2014. V. 19. N 3. P. 710–725. doi: 10.1016/j.cnsns.2013.07.002
 67. Wrobel K. Fuzzy adaptive control of nonlinear two-mass system // Power Electronics and Drives. 2016. V. 1 (36). N 2. P. 133–146.
 68. Hagrass H. Type-2 FLCs: a new generation of fuzzy controllers // IEEE Computational Intelligence Magazine. 2007. V. 2. N 1. P. 30–43. doi: 10.1109/mci.2007.357192
 69. Tanaka K., Hori T., Wang H.O. A multiple Lyapunov function approach to stabilization of fuzzy control systems // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2003. V. 11. N 4. P. 582–589. doi: 10.1109/tfuzz.2003.814861
 70. Tanaka K., Hiroto Y., Hiroshi O., Wang H.O. A sum of squares approach to stability analysis of polynomial fuzzy systems // Proc. American Control Conference. 2007. P. 4071–4076. doi: 10.1109/ACC.2007.4282579
 71. Chen Y.J., Ohtake H., Tanaka K., Wang W.J., Wang H.O. Relaxed stabilization criterion for T-S fuzzy systems by minimum-type Piecewise-Lyapunov-function-based switching fuzzy controller // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2012. V. 20. N 6. P. 1166–1173. doi: 10.1109/TFUZZ.2012.2196049
 72. Ohtake H., Machida S., Tanaka K., Wang H.O. A descriptor system approach to servo control for nonlinear systems // Proc. IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems. 2012. P. 1–6. doi: 10.1109/FUZZ-IEEE.2012.6251284
 73. Esterhuizen W., Wang H.O., Tanaka K., Wang X. Stability and stabilization conditions for Takagi-Sugeno fuzzy model via polyhedral Lyapunov functions // Proc. American Control Conference. 2013. P. 5637–5642. doi: 10.1109/ACC.2013.6580720
 74. Chen Y.J., Tanaka M., Tanaka K., Wang H.O. Piecewise polynomial lyapunov functions based stability analysis for polynomial fuzzy systems // Proc. IEEE Int. Conf. on Control System, Computing and Engineering. 2013. P. 34–39. doi: 10.1109/ICCSCE.2013.6719928
 75. Chen Y.J., Tanaka M., Tanaka K., Wang H.O. Stability analysis and region-of-attraction estimation using piecewise polynomial Lyapunov functions: polynomial fuzzy model approach // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2015. V. 23. N 4. P. 1314–1322. doi: 10.1109/TFUZZ.2014.2347993
 76. Горюшкин В.А. Об устойчивости нечетких систем управления // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2011. № 1(2). С. 17–25.
 77. Горюшкин В.А. О синтезе регулятора для стабилизации нечеткой системы с неопределенностью // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки, 2011. № 2(3). С. 5–11.
 - Transactions on Fuzzy Systems, 2011, vol. 19, no. 3, pp. 401–422. doi: 10.1109/tfuzz.2010.2103076
 78. Zhai D., Mendel J.M. Enhanced centroid-flow algorithm for computing the centroid of general type-2 fuzzy sets. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2012, vol. 20, no. 5, pp. 939–956. doi: 10.1109/tfuzz.2012.2190075
 79. Mazandarani M., Najariyan M. Differentiability of type-2 fuzzy number-valued functions. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2014, vol. 19, no. 3, pp. 710–725. doi: 10.1016/j.cnsns.2013.07.002
 80. Wrobel K. Fuzzy adaptive control of nonlinear two-mass system. *Power Electronics and Drives*, 2016, vol. 1, no. 2, pp. 133–146.
 81. Hagrass H. Type-2 FLCs: a new generation of fuzzy controllers. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2007, vol. 2, no. 1, pp. 30–43. doi: 10.1109/mci.2007.357192
 82. Tanaka K., Hori T., Wang H.O. A multiple Lyapunov function approach to stabilization of fuzzy control systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2003, vol. 11, no. 4, pp. 582–589. doi: 10.1109/tfuzz.2003.814861
 83. Tanaka K., Hiroto Y., Hiroshi O., Wang H.O. A sum of squares approach to stability analysis of polynomial fuzzy systems. *Proc. American Control Conference*, 2007, pp. 4071–4076. doi: 10.1109/ACC.2007.4282579
 84. Chen Y.J., Ohtake H., Tanaka K., Wang W.J., Wang H.O. Relaxed stabilization criterion for T-S fuzzy systems by minimum-type Piecewise-Lyapunov-function-based switching fuzzy controller. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2012, vol. 20, no. 6, pp. 1166–1173. doi: 10.1109/TFUZZ.2012.2196049
 85. Ohtake H., Machida S., Tanaka K., Wang H.O. A descriptor system approach to servo control for nonlinear systems. *Proc. IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, 2012, pp. 1–6. doi: 10.1109/FUZZ-IEEE.2012.6251284
 86. Esterhuizen W., Wang H.O., Tanaka K., Wang X. Stability and stabilization conditions for Takagi-Sugeno fuzzy model via polyhedral Lyapunov functions. *Proc. American Control Conference*, 2013, pp. 5637–5642. doi: 10.1109/ACC.2013.6580720
 87. Chen Y.J., Tanaka M., Tanaka K., Wang H.O. Piecewise polynomial lyapunov functions based stability analysis for polynomial fuzzy systems. *Proc. IEEE Int. Conf. on Control System, Computing and Engineering*, 2013, pp. 34–39. doi: 10.1109/ICCSCE.2013.6719928
 88. Chen Y.J., Tanaka M., Tanaka K., Wang H.O. Stability analysis and region-of-attraction estimation using piecewise polynomial Lyapunov functions: polynomial fuzzy model approach. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2015, vol. 23, no. 4, pp. 1314–1322. doi: 10.1109/TFUZZ.2014.2347993
 89. Goryushkin V.A. On stability of fuzzy control systems. *Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences*, 2011, no. 1, pp. 17–25. (in Russian)
 90. Goryushkin V.A. On stabilizing controller design for fuzzy system with uncertainty. *Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences*, 2011, no. 2, pp. 5–11. (in Russian)

Авторы

Стжелецки Рышард – доктор технических наук, профессор, профессор, Гданьский политехнический Университет, Гданьск, 80-233, Польша, Scopus ID: 7003422441, ryszard.strzelecki@pg.edu.pl

Демидова Галина Львовна – кандидат технических наук доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 56974083200, ORCID ID: 0000-0002-7892-8998, demidova@ets.ifmo.ru

Authors

Ryszard Strzelecki – D.Sc., Full Professor, Gdańsk University of Technology, Gdańsk, 80-233, Poland, Scopus ID: 7003422441, ryszard.strzelecki@pg.edu.pl

Galina L. Demidova – PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 56974083200, ORCID ID: 0000-0002-7892-8998, demidova@ets.ifmo.ru

Лукичев Дмитрий Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 6507090891, ORCID ID: 0000-0003-2168-3755, ludimit@yandex.ru

Поляков Николай Александрович – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57192640472, ORCID ID: 0000-0002-0263-4811, Polyakov.ets.itmo@gmail.com

Абдуллин Артур Александрович – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-1767-6974, artur.abdullin@corp.ifmo.ru

Ловлин Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-9118-5773, sjlovlin@corp.ifmo.ru

Dmitry V. Lukichev – PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 6507090891, ORCID ID: 0000-0003-2168-3755, ludimit@yandex.ru

Nikolay A. Polyakov – PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57192640472, ORCID ID: 0000-0002-0263-4811, Polyakov.ets.itmo@gmail.com

Artur A. Abdullin – PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-1767-6974, artur.abdullin@corp.ifmo.ru

Sergey Yu. Lovlin – PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-9118-5773, sjlovlin@corp.ifmo.ru



Стжелецки Рышард родился 28 сентября 1955 г. в г. Быдгощ (Польша).

В 1981 году окончил с отличием Политехнический Институт Киева, кафедра электроники. В 1984 году защитил кандидатскую диссертацию по теме «Анализ и синтез преобразователей напряжения на основе теории моментов». В 1991 в Институте Электродинамики УССР в Киеве защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук по теме «Упреждающее управление вентильными преобразователями с принудительной коммутацией». Стжелецки Рышард является экспертом в области силовой электроники, в частности, топологии, методов и алгоритмов управления и промышленного применения силовых электронных систем, в области повышения качества электроэнергии, управления потоком мощности и синтеза распределенных электрических цепей, включая умные сети. Автор более 200 научных статей в журналах и трудах научных конференций, а также 6 монографий и 13 патентов (2 - СССР и 11 – Польша). Он также имеет опыт управления исследовательскими группами, а также как научно-исследовательскими центрами, в том числе в Университете ИТМО, так и в области производства. В настоящее время является профессором в Гданьском политехническом университете и управляет Балтийской лабораторией силовой электроники (расположенной в Гдыне) Электротехнического института в Варшаве.

Ryszard Strzelecki was born on September 28, 1955 in Bydgoszcz (Poland). In 1981 he graduated with honors from Kiev Polytechnic Institute, Department of Electronics. In 1984 in the same Institute he completed postgraduate studies and defended his thesis for the degree of the Candidate of Technical Sciences on the theme "Application of Theory of Moments for Analysis and Synthesis of Voltage Converters". In 1991 in Institute of Electrodynamics UkrSSR in Kiev he defended his dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences on the theme "Prediction Control of the Self Commutation Power Electronics Converters". Ryszard Strzelecki is an expert in the field of power electronics, especially in the area focused on topologies, methods and algorithms of control and industrial application of power electronics systems, in particular, in the field of power quality improvement, power flow control and distributed power supply including smart grid. He is the author of over 200 scientific articles in journals and at conferences, as well as 6 monographs and 13 patents (2 – USSR, 11 – Poland). He also has experience in managing research teams and cooperation with different research and development centers (including, in particular, ITMO University) and industry representatives. Currently, he is working at Gdansk University of Technology (Faculty of Electrical and Control Engineering) and is managing the Baltic Laboratory of Power Electronics Technology (located in Gdynia) of Electrotechnical Institute in Warsaw.



Демидова Галина Львовна родилась 17.04.1983 в г. Ленинграде. Поступила в СПбГУ ИТМО (ГУ) в 2000 году, имеет дипломы бакалавра по направлению

«Электротехника, электромеханика и электротехнологии» и инженера по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов». В 2017 году получила диплом кандидата технических наук по специальности 05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка информации (в технических системах) (технические науки), название диссертации «Разработка и исследование регуляторов с нечеткой логикой для следящих электроприводов оптико-механических комплексов». Автор более 30 научных статей. В настоящее время – доцент факультета систем управления и робототехники Университета ИТМО, инженер НИЦ «Прецизионная электромеханика», сотрудник международной научной лаборатории «Силовая электроника и автоматизированный электропривод» Университета ИТМО. Область научных интересов: адаптивные системы управления движением прецизионных электроприводов приборных комплексов нового поколения и модификация их за счет применения таких алгоритмов управления как нечеткая логика; электромеханические устройства систем автоматического управления.

Galina L. Demidova was born on April 17, 1983 in Leningrad. She started higher education in 2000 in ITMO University, she has a bachelor's degree in Electrical Engineering and an engineer's degree in the Electric Drive and Automation of Industrial Installations and Technological Complexes. In 2017 she received the Ph.D. degree in system analysis and control from ITMO University, with the thesis on the topic "Development and research of fuzzy logic controllers for tracking electric drives of optical-mechanical complexes". She is the author of over 30 scientific articles. At present she is an Associate Professor at the Faculty of Control Systems and Robotics, Engineer of the Scientific and Industry center "Precision Electromechanics", an employee of the International Scientific Laboratory "Power electronics and Automated Electric Drive", ITMO University. Her current research interests include adaptive control, fuzzy logic control, motion control, automatic control, fuzzy neural networks, hybrid intelligent systems, genetic algorithms, electromechanical systems.



Лукичев Дмитрий Вячеславович родился 23.10.1979 г. в г. Ленинграде. В 2002 г. закончил с отличием Санкт-Петербургский государственный институт точной механики и оптики (Технический университет). В 2005 г. закончил аспирантуру СПб ГУИТМО (ТУ), закончившуюся защитой кандидатской диссертации «Исследование и разработка нейросетевого наблюдателя потокоцепления ротора в системе векторного управления асинхронным короткозамкнутым двигателем» по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина). В настоящее время – доцент факультета систем управления и робототехники Университета ИТМО, руководитель бакалаврской и магистерской образовательных программ «Цифровой электропривод робототехнических комплексов» и «Энергоэффективный автоматизированный электропривод» направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника», ведущий инженер НПЦ «Прецизионная электромеханика», сотрудник международной научной лаборатории «Силовая электроника и автоматизированный электропривод» Университета ИТМО. Область научных интересов: системы управления электроприводами переменного тока, вопросы моделирования и применения адаптивного управления, использование нейронечетких алгоритмов в системах управления сложными динамическими объектами. Автор 40 научных статей.

Dmitry V. Lukichev was born on October 23, 1979 in Leningrad. In 2002, he graduated with honors from the Department of Electrical Engineering and Precision Electromechanical Systems of St. Petersburg State Institute of Fine Mechanics and Optics (Technical University). In 2005 he received the Ph.D. degree in electrical engineering from ITMO, with the thesis on the topic "Research and design of a neural network observer of the rotor flux linkage in the vector control system of an asynchronous squirrel-cage motor". At present he is an Associate professor of the Faculty of "Control Systems and Robotics" at the ITMO University, Chief Engineer of the Scientific and Industry center "Precision Electromechanics", an employee of the International Scientific Laboratory "Power electronics and Automated Electric Drive", the Head of the bachelor and master educational programs "Digital electric drive of robotic complexes" and "Energy-efficient automated electric drive" educational course "Power and Electrical Engineering". His current research interests include control systems of AC drives, issues of modeling and application of adaptive control, the use of neuro-fuzzy algorithms in control systems of complex dynamic objects. He is the author of 40 scientific articles.



Поляков Николай Александрович родился 23.06.1988 в г. Ленинграде. В 2011 закончил с отличием магистратуру на кафедре электротехники и прецизионных электромеханических систем Санкт-Петербургского Национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО). В 2012 г. магистерская выпускная квалификационная работа Полякова Николая Александровича «Исследование трехфазных активных выпрямителей напряжения в системах автоматизированного электропривода» была отмечена дипломом лауреата конкурса выпускных магистерских квалификационных работ СПб НИУ ИТМО. В 2015 г. Поляков Н. А. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления» по теме «Анализ и синтез активных выпрямителей напряжения в системах управления энергоэффективными электроприводами». В настоящее время – доцент факультета систем управления и робототехники Университета ИТМО, научный сотрудник научно-производственного центра «Прецизионная электромеханика», сотрудник международной научной лаборатории «Силовая электроника и автоматизированный электропривод». Область научных интересов: активные преобразователи, энергоэффективные полупроводниковые усилительно-преобразовательные устройства, корректоры коэффициента мощности, анализ составляющих полной мощности, системы фазовой автоподстройки частоты, системы автоматического управления.

Nikolai A. Poliakov was born on June 23, 1988 in Leningrad. In 2011, he graduated with honors from the magistracy at the Department of Electrical Engineering and Precision Electromechanical Systems of St. Petersburg National Research University of Information Technology, Mechanics and Optics (University of ITMO). In 2012 his master thesis "Research on three-phase active voltage rectifiers in automated electric drive systems" was awarded the Diploma of the Laureate of competition of graduates' qualifying works in NIU ITMO (ITMO University). In 2015 he received the Ph.D. degree in electrical engineering from ITMO University, with the thesis on the topic "Analysis and synthesis of active rectifiers of voltage in the control systems of energy-efficient electric drives". At present he is an Associate professor of the Faculty of "Control Systems and Robotics" at the ITMO University, researcher of the Scientific and Industry center "Precision Electromechanics", an employee of the International Scientific Laboratory "Power electronics and Automated Electric Drive". His current research interests include active power converters, energy-efficient semiconductor converters, phase locked loop systems, power factor correction, apparent power components evaluation, closed loop control systems.



Абдуллин Артур Александрович – кандидат технических наук, доцент факультета систем управления и робототехники, инженер НПЦ «Прецизионная электромеханика», сотрудник международной научной лаборатории «Силовая электроника и автоматизированный электропривод» Университет ИТМО. Родился 10.02.1988 в г. Лангепас, Западная Сибирь. В 2011 году окончил СПб ГУИТМО по специальности «Автоматизация и управление». В 2014 году закончил аспирантуру Университета ИТМО и защитил диссертацию на соискание степени кандидата технических наук по теме «Разработка и исследование методов повышения точности следящих электроприводов с упругой нагрузкой». С 2011 года преподает в Университете ИТМО и работает в сфере создания прецизионных следящих электроприводов. Автор 27 научных статей. Область научных интересов: прецизионный электропривод, дискретное управление, адаптивное и робастное управление, робототехника.

Artur A. Abdullin is an Associate Professor, PhD at the Faculty of Control Systems and Robotics, Engineer of the Scientific and Industry center "Precision Electromechanics", employee of the International Scientific Laboratory "Power electronics and Automated Electric Drive", ITMO University. Artur Abdullin was born in Langepas, Western Siberia, on February 10, 1988. He graduated from ITMO University with a master's degree in Automation and Control in 2011 and PhD degree with the dissertation "Research and development of methods for improving the accuracy of servo drives with elastic load" in 2014. Since 2011 Artur Abdullin has been teaching in ITMO University and working in the field of creating precision servo drives. He is the author of 27 scientific articles. His current research interests include precision electric drive, discrete control, adaptive and robust control, robotics.



Ловлин Сергей Юрьевич родился 27.09.1987 г. в г. Ленинграде. В 2010 году окончил с отличием СПб ГУИТМО по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов». В 2013 году закончил аспирантуру Университета ИТМО и защитил диссертацию на соискание степени кандидата технических наук по теме «Разработка алгоритмов эффективного управления прецизионными электроприводами комплексов высокоточных наблюдений». С 2008 года работает в Университете ИТМО в сфере создания следящих электроприводов для комплексов высокоточных оптических измерений (в том числе системы апостериорного высокоточного определения эфемерид и временных поправок системы ГЛОНАСС, оптико-электронный комплекс обнаружения и измерения параметров движения космического мусора и др.). Автор

1 патента, 44 научных статей.

Sergey Yu. Lovlin was born on September, 27, 1987 in Leningrad. He graduated with honors from Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics with a degree in Electric Drive and Automation of Industrial Plants and Technological Complexes in 2010. He completed a postgraduate course at ITMO University and defended his thesis for the PhD degree with the topic "Development of algorithms for the effective control of precision electric drives of high-precision observation complexes" in 2013. Since 2008, he has been working at ITMO University in the field of creating servo drives for complexes of high-precision optical measurements (including a posteriori high-precision definition of ephemeris and time corrections of the GLONASS system, an optical-electronic complex for detecting and measuring the parameters of space debris motion, etc.). He is the author of 1 patent and 44 scientific articles.