

ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ANFIS-СТРУКТУР ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МОДУЛЬНЫМИ МАНИПУЛЯЦИОННЫМИ РОБОТАМИ

Быковцев Ю.А., Лохин В.М., Манько С.В., Смирнов А.В.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА — Российский технологический университет», 119454, Российская Федерация, г. Москва, проспект Вернадского, 78, e-mail: alexandersmirnov1903@gmail.com

Модульный подход к построению манипуляционных роботов находит всё более широкое применение в различных областях, т.к. обеспечивает возможность реконфигурации кинематической структуры, расширяя тем самым спектр возможного применения робототехнических средств в условиях неопределенности рабочей среды, а также позволяет повысить унифицированность составных частей конструкции и надежность системы в целом. Несмотря на преимущества данной концепции, ее повсеместное внедрение ограничено рядом недостатков. Показано, что одной из основных проблем при управлении модульными манипуляционными роботами является взаимное динамическое влияние степеней подвижности, для решения которой рассмотрено применение ANFIS-структур на различных уровнях иерархии интеллектуальной системы управления. В работе предложен подход к динамической развязке приводов модульного манипуляционного робота за счёт применения данного класса нейро-нечетких систем логического вывода на тактическом уровне для аппроксимации решения обратной задачи динамики и компенсации взаимовлияния исполнительных механизмов.

Ключевые слова: модульный манипуляционный робот, динамическая коррекция, интеллектуальное управление, нейро-нечеткие системы, ANFIS.

FEATURES AND PROSPECTS OF USING ANFIS STRUCTURES FOR BUILDING CONTROL SYSTEMS FOR MODULAR MANIPULATIVE ROBOTS

Bykovtsev Y.A., Lokhin V.M., Manko S.V., Smirnov A.V.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «MIREA – Russian Technological University», 119454, Russian Federation, Moscow, Vernadskogo Ave., 78, e-mail: alexandersmirnov1903@gmail.com

The modular approach to the construction of manipulative robots is increasingly being used in various fields, as it provides the possibility of reconfiguring the kinematic structure, thereby expanding the range of possible applications of robotic tools in an uncertain working environment, as well as improving the uniformity of the components of the structure and the reliability of the system as a whole. Despite the advantages of this concept, its widespread adoption is limited by a number of disadvantages. It is shown that one of the main problems in the control of modular manipulative robots is the mutual dynamic influence of degrees of mobility, for the solution of which the application of ANFIS structures at various levels of the hierarchy of an intelligent control system is considered. The paper proposes an approach to dynamically decoupling the drives of a modular manipulative robot by using this class of neuro-fuzzy inference systems at the tactical level to approximate the solution.

Keywords: modular manipulation robot, dynamic correction, intelligent control, neuro-fuzzy systems, ANFIS.

1. Введение

Одной из главных тенденций развития робототехники на протяжении последних десятилетий является повышение степени адаптивности, обусловленное, с одной стороны, высоким уровнем неопределенности и непредсказуемости рабочей среды, а с другой, повышением унификации и универсальности разрабатываемых средств. В этой связи можно выделить два ключевых подхода к повышению адаптивных свойств:

- адаптация за счет реконфигурации аппаратных средств (АРАС) подразумевает возможность оперативной перестройки конфигурации робота, а также замены его рабочего органа с целью удовлетворения требованиям выполняемой задачи;
- адаптация за счет совершенствования алгоритмического (программного) обеспечения (АСАО) систем управления заключается в изменении параметров и структуры системы управления для обеспечения

стабильного функционирования робототехнических средств в соответствии с заданными критериями качества в определенном диапазоне условий окружающей среды.

Основным подходом к обеспечению АРАС манипуляционных роботов является модульность исполнения элементов кинематической цепи [1,2]. Сложность построения манипуляторов данного класса заключается, среди прочего, в том, что заранее оптимизировать механику их конструкции путем распределения масс и инерций ее элементов (что обычно выполняется для роботов с фиксированной кинематикой), представляется невозможным в силу многообразия реализуемых конфигураций. По этой причине возникает необходимость компенсации взаимного динамического влияния степеней подвижности модульных манипуляционных роботов, которая особенно актуальна при реализации непрерывного (контурного) управления движением [3]. Современный и активно развивающийся подход к её решению состоит в построении систем управления на основе знаний и методах их интеллектуальной обработки (например, технологии ассоциативной памяти, как показано в работе [4]). В то же время перспективным подходом (за счёт высокого быстродействия, возможности формирования законов управления на формальном языке и самообучения) представляется применение технологий нейро-нечёткого управления, из которых наибольшее распространение получили ANFIS-структуры (Adaptive-Neuro-Based Fuzzy Inference System) [5].

2. Анализ особенностей построения модульных манипуляционных роботов

Концепция модульного построения манипуляционных роботов, существующая со второй половины 80-х годов XX века [1,2], заключается в реализации составляющих кинематической цепи в виде отдельных модулей с целью повышения ремонтпригодности робота и унифицированности составных частей конструкции, а также обеспечения возможности его реконфигурации. В свою очередь, реконфигурация, по сути представляющая собой АРАС, открывает перспективы применения модульных манипуляторов в малодетерминированных средах. Несмотря на отмеченные преимущества, роботы данного класса имеют и ряд недостатков, осложняющих их внедрение:

- Усложнение конструкции и увеличение массы робота, связанные с наличием стыковочных узлов.
- Дилемма между минимизацией числа используемых типоразмеров модулей и потенциальной сложностью реализуемых структур.
- Зависимость решения задач кинематики и динамики от конкретной конфигурации, а также сложность минимизации взаимного влияния степеней подвижности, обусловленная невозможностью оптимального распределения масс и инерций для всех предполагаемых кинематик, что требует обеспечения АСАО при построении их систем управления.

Проведенный в рамках настоящей работы анализ источников, посвященных проектированию модульных манипуляционных роботов, позволяет сделать следующие выводы:

1. Хотя потенциально спектр возможных применений модульных манипуляторов крайне широк, особенно следует отметить следующие сферы и присущие им задачи:

- Промышленность: роботы для выполнения сборочных операций [6,7] и роботы общепромышленного назначения [8-12]. Несмотря на высокую детерминированность производственной среды, изменение технологических процессов и появление новых изделий может потребовать обновления конфигураций используемых манипуляторов (особенно для штучного и опытного производства). На рисунке 1 представлен набор модулей промышленного манипуляционного робота [8].

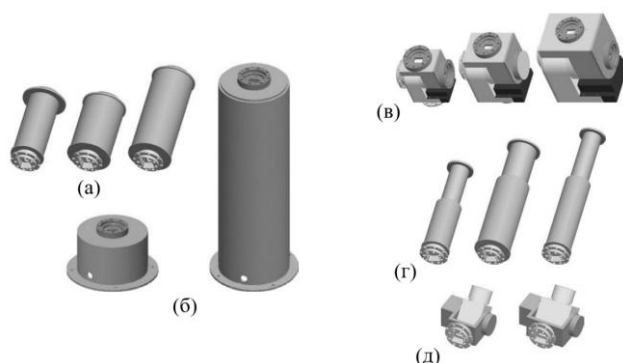


Рисунок 1 – Внешний вид модулей промышленного манипулятора: а – модули звеньев; б – модули основания робота; в – шарнирные модули; г – линейные модули; д – запястные модули

- Космические исследования: роботы для обслуживания орбитальной станции [1,2,13-17] и роботы для функционирования на поверхности планеты [18,19]. Разработка модульных манипуляторов космического

назначения оправдана в первую очередь неопределенностью и непредсказуемостью рабочей среды и выполняемых задач. Кроме того, стоит отметить бóльшую возможность унификации по сравнению с другими областями: в условиях невесомости нагрузка на подвижные соединения и звенья практически не зависит от их положения в кинематической цепи. Модульный манипулятор для контроля аппаратуры в космосе [16] представлен на рисунке 2.

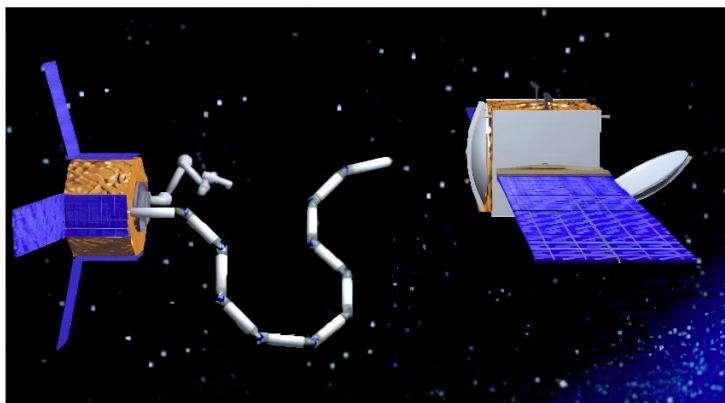


Рисунок 2 – Модульный манипулятор для контроля аппаратуры в космосе

– Сельское хозяйство: уборка урожая [20,21]. На сегодняшний день существует ряд работ, связанных с проектированием наиболее эффективных манипуляторов для сбора конкретного вида плодов [22-24]. Учитывая, что уборка урожая, как правило, производится только несколько недель в году, сложно добиться рентабельности подобного типа роботов. С этой точки зрения применение модульных манипуляторов, позволяющих формировать относительно простые и наиболее подходящие для выполнения конкретной задачи конфигурации, выглядит крайне перспективным. Внешний вид модулей манипулятора для сбора фруктов [21] представлен на рисунке 3

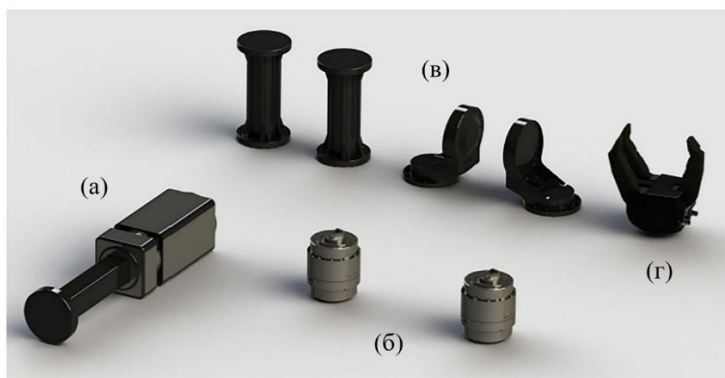


Рисунок 3 – Модули манипуляционного робота для сбора фруктов; а – линейный модуль; б – шарнирные модули; в – модули звеньев; г – модуль рабочего органа

2. Следует также отметить некоторые особенности реализации модулей:

– Раздельная реализация звеньев и подвижных соединений наиболее типична для модульных манипуляторов. Такой подход позволяет увеличить количество потенциальных конфигураций при минимизации числа модулей. Исключения характерны для манипуляторов космического назначения, где возможно совместное исполнение звена и связанного с ним подвижного соединения [13] [18], что обусловлено спецификой используемых кинематических структур и требованиями к взаимозаменяемости модулей.

– Отмеченная ранее дилемма выбора между потенциальной сложностью конфигураций и числом типов модулей может быть отчасти решена применением шарнирных соединений, имеющих два или три входных или выходных стыковочных узла и реализующих таким образом различные варианты вращательного движения [8] (рисунок 1). Кроме того, для манипуляторов космического назначения, предназначенных для работы в условиях невесомости или малого притяжения, возможно использование лишь одного типоразмера модулей каждого вида [13,17,18].

3. Особенно необходимо отметить вопрос реализации АСАО. В приведенных работах рассмотрение, как правило, ограничено лишь автоматизацией решения кинематических задач. Подробное описание данного

вопроса представлено только в публикации [12] и рассматривается лишь для работы в пределах базовой конфигурации робота. Столь малую освещенность данного вопроса можно объяснить тем, что большинство рассмотренных работ посвящено скорее представлению концепции модульных манипуляторов того или иного назначения, а не всесторонней проработке вопросов их проектирования.

3. Подходы к построению систем управления модульного манипуляционного робота на базе ANFIS-структур

3.1. Способы обеспечения динамической развязки приводов

Как известно, динамическая модель манипуляционного робота характеризуется, прежде всего, взаимным влиянием отдельных степеней подвижности. Его минимизация (которую также можно назвать динамической развязкой приводов) выполняется на различных уровнях робототехнической системы [3,4,25,26]:

- механическая развязка может быть обеспечена выбором структуры кинематики, оптимальным размещением центров масс, введением уравновешивающих механизмов, а также путем применения редукторов с высокими передаточными числами и двигателей с большими крутящими моментами;
- на исполнительном уровне управления возможна реализация адаптивных (или интеллектуальных) САУ, применение скользящего режима или реализация управления по моменту на валу двигателя;
- на тактическом уровне управления возможно обеспечение динамической коррекции, которая определяется либо на этапе формирования траектории, либо непосредственно во время движения.

Рассматривая в качестве объекта управления модульный манипуляционный робот, следует отметить особую сложность обеспечения динамической развязки. Реконфигурируемость не позволяет обеспечить оптимальную (с точки зрения масс и инерций) механику для всех возможных конфигураций манипулятора. Следовательно, требуется обеспечение динамической развязки на исполнительном или тактическом уровнях управления. Решение указанной задачи может быть получено за счёт применения интеллектуальных подходов, например, технологии ассоциативной памяти. Как показано в работе [4] динамическая развязка обеспечивается за счёт передачи с тактического уровня САУ на исполнительный не только значений обобщенных координат, но и параметров регулятора, расчёт которых реализуется с помощью набора модулей ассоциативной памяти, настроенных под конкретный тип движения.

3.2. Нейро-нечеткое управление

Согласно [4], можно выделить четыре базовые технологии интеллектуального управления: экспертные системы, нейро-сетевые структуры, ассоциативная память и нечеткая логика. Учитывая достоинства и недостатки данных подходов, наиболее оправданным выглядит их совместное применение. Так, крайне удачным оказалось комбинирование технологий нечеткой логики и нейро-сетевых структур: существующие алгоритмы обучения нейронных сетей позволяют решить вопрос оптимизации параметров систем нечеткого логического вывода, в то время как априорная информация, закладываемая в структуру последних на формальном языке, предохраняет систему от характерного для нейронных сетей непредсказуемого поведения при нетипичных входных данных.

Существуют различные подходы к реализации нейро-нечетких систем. Например, Хидеюки Такаги и Исао Хаяши в своей работе [27] предлагают использование нескольких нейронных сетей в одной структуре (рисунок 4): NN_{mem} для фаззификации входных переменных и NN_i ($i = 1 \dots r$) для обработки каждого продукционного правила.

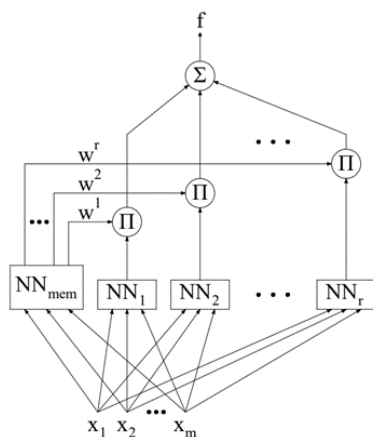


Рисунок 4 – Нейро-нечеткая структура Такаги-Хаяши

Другой подход заключается в представлении всего процесса нечеткого логического вывода в виде особой нейронной сети и применении к ней известных алгоритмов обучения для оптимизации параметров фаззификации/дефаззификации [28]. Стоит при этом отметить, что форма представления не влияет на процесс функционирования системы, обеспечивая лишь наглядность применяемых алгоритмов аналогией с классическими нейронными сетями. Такой подход отличается от предыдущего простотой и не уступает в эффективности.

Среди систем данного типа наибольшее распространение получили ANFIS-структуры, предложенные Джинг Роджером Джангом в работе [5]. На рисунке 5 представлена топология ANFIS-сети для двух входов (x_1, x_2) и двух продукционных правил; назначение и параметры слоев описаны в таблице 1. Применение гибридного алгоритма обучения, совмещающего метод наименьших квадратов при прямом проходе и градиентный спуск при обратном (обратное распространение ошибки), позволило добиться большой скорости как пакетного, так и последовательного обучения. Неоспоримые преимущества ANFIS-структур делают их наиболее перспективным классом нейро-нечетких систем.

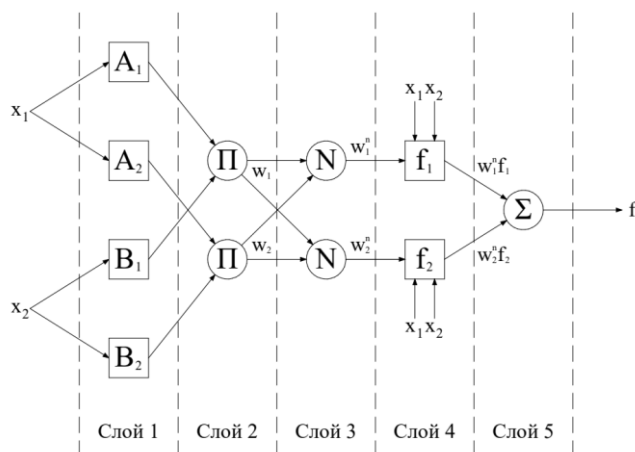


Рисунок 5 – Топология ANFIS

Таблица 1 – Слои ANFIS-структуры

Слой	Число нейронов	Адаптивность	Назначение
1	Равно общему числу функций принадлежности	Да	Фаззификация
2	Равно числу продукционных правил	Нет	Определение весов продукционных правил
3	Равно числу продукционных правил	Нет	Нормализация весов продукционных правил
4	Равно числу продукционных правил	Да	Локальная дефаззификация
5	Один	Нет	Общая дефаззификация

3.3. Системы управления приводного уровня на базе ANFIS-структур

Анализ работ, посвященных реализации систем управления приводного уровня на базе ANFIS-структур, позволяет сделать следующие выводы:

1. Существует два ключевых подхода к реализации систем управления на базе ANFIS:

– Непосредственное применение ANFIS-структуры в качестве регулятора (рисунок 6). Выбирая ошибку регулирования и некоторые функции от нее (дифференциальные или интегральные) в качестве входных параметров, потенциально возможно обеспечение как структурной, так и параметрической адаптации, однако, сложность топологии сети и формирования обучающих данных будут напрямую зависеть от количества учитываемых факторов неопределённости работы САУ. Данный подход рассмотрен в работах [29–38] для управления скоростью коллекторных и бесколлекторных двигателей постоянного тока соответственно; в работе [39] для управления моментом, а в работах [40, 41] скоростью асинхронного двигателя переменного тока.

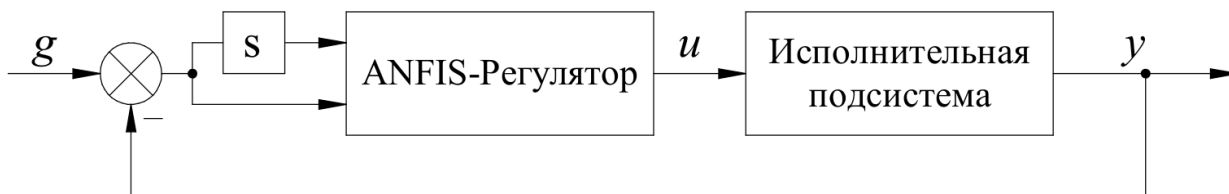


Рисунок 6 – Система управления с ANFIS-структурой в качестве регулятора

– Использование ANFIS-структур для настройки параметров регулятора классической конфигурации (рисунок 7). В качестве входных параметров также характерен выбор ошибки регулирования и ее дифференциальных (или интегральных) функций, однако, на вход могут подаваться и параметры объекта управления (пунктирные линии на рисунке). Данный метод, с одной стороны, отличается большей «прозрачностью» и предсказуемостью функционирования, однако, не предусматривает структурной неопределенности объекта управления. Кроме того, регулятор оказывается более громоздким: требуется отдельная ANFIS-сеть для каждого коэффициента усиления (при использовании классической архитектуры, когда ANFIS имеет лишь один выход). Система управления данного типа реализована в работах [42-44] для управления скоростью, а в работе [45] для управления скоростью и током бесколлекторного двигателя. Отдельно стоит отметить работу [46], в которой ANFIS применялся в качестве «черного ящика» для моделирования асинхронного двигателя и используемых с ним средств аппаратной поддержки систем управления. Обучающие данные получены на экспериментальной установке. Входами являются параметры ПИ-регулятора, выходом – функционал, оценивающий прямые показатели качества системы. Полученная ANFIS-модель использовалась для нахождения оптимальных параметров регулятора посредством генетического алгоритма.

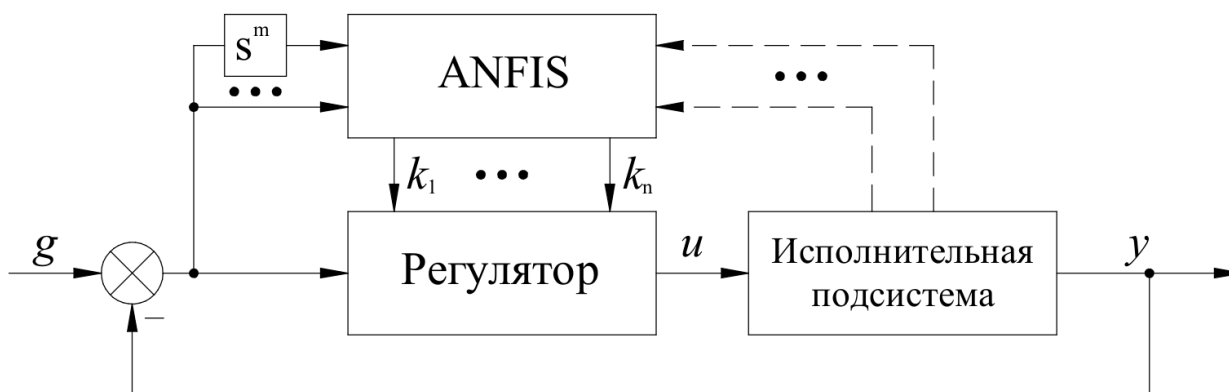


Рисунок 7 – Система управления с ANFIS-структурой, используемой для настройки параметров регулятора

2. Согласно результатам представленных работ, оба подхода позволяют добиться повышения адаптивных свойств и более высокого качества управления по сравнению с классическими структурами регуляторов (ПИ, ПИД и т.д.), а также интеллектуальными регуляторами других типов (нечетких и нейро-сетевых).

3. В качестве входных параметров наиболее характерно использование ошибки регулирования и ее производной. В то же время в работе [45] на вход ANFIS-структур подаются параметры двигателя – электрическое сопротивление якоря, а также моменты нагрузки и инерции системы.

4. Для обеспечения фаззификации, как правило, используются Гауссовы или треугольные функции принадлежности, количество которых варьируется от двух до семи для каждой переменной. Согласно результатам работы [33], наилучшее качество управления скоростью бесколлекторного двигателя обеспечивается при фаззификации входных переменных пятью Гауссианами.

5. Будучи наиболее простым в реализации, нечеткий логический вывод Такаги-Сугено находит широкое применение (хотя данный метод дефаззификации не является единственным возможным для ANFIS [5]).

6. Особенно стоит отметить, что во всех рассмотренных исследованиях крайне малое внимание уделено вопросу анализа устойчивости систем управления: оценка устойчивости проведена только в одной из представленных работ [42], причем рассмотрен лишь номинальный режим самонастраивающейся системы, что не позволяет судить о ее устойчивости при изменении параметров объекта или воздействии внешних возмущений. Также практически не освещен вопрос синтеза систем управления – в большинстве работ как

данность выбираются классические структуры (обычно ПИ или ПИД), которые вовсе не являются универсальными. Полноценное же раскрытие потенциала нейро-нечетких структур (как и других интеллектуальных подходов), вероятно, потребует привлечения методов классической теории автоматического управления в вопросах синтеза, устойчивости, качества и оптимальности.

3.4. Применение ANFIS-структур для динамической развязки на тактическом уровне

Динамическая развязка приводов посредством ANFIS-структур может быть выполнена также на тактическом уровне управления. Возможным подходом является реализация ANFIS-компенсатора, выполняющего аппроксимацию решения обратной задачи динамики манипулятора (рисунок 8).

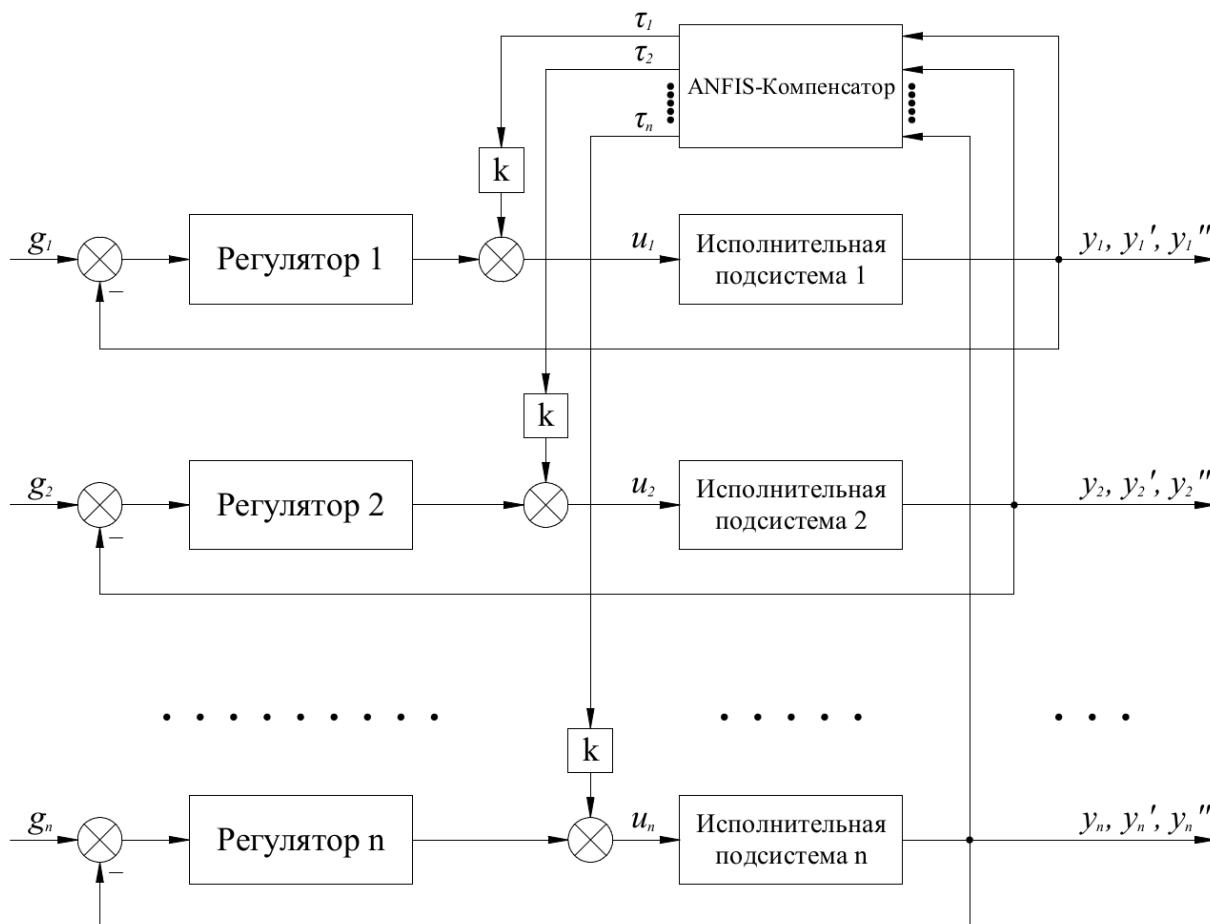


Рисунок 8 – Система управления тактического уровня с ANFIS-компенсатором

Данный подход позволяет сформировать желаемый управляющий момент согласно текущим обобщенным координатам, их скоростям и ускорениям. Поправка же, необходимость которой обусловлена неточностью математической модели и неучтенными внешними возмущениями, обеспечивается замкнутыми САУ приводного уровня. Обучающие данные могут быть вычислены аналитически, например, методом Эйлера-Лагранжа или Ньютона-Эйлера. Оправданность реализации динамического компенсатора на базе ANFIS-структур обусловлена их быстродействием за счёт параллельной обработки входной информации, что позволяет решить проблему высокой вычислительной сложности классического варианта динамической коррекции [25]. Недостаток данного подхода заключается в том, что, либо все возможные конфигурации модульного манипулятора должны быть заданы заранее, либо потребуется предусмотреть возможность самообучения.

4. Заключение

Проведенный анализ работ показывает, с одной стороны, перспективность применения модульных манипуляционных роботов в различных сферах, в том числе в промышленности, космической технике и сельском хозяйстве. Обеспечение высокого динамического качества непрерывного управления является одной из приоритетных задач для манипуляторов данного класса. Решением может являться реализация адаптивных САУ приводного уровня на базе ANFIS-структур. Обзор исследований в данной области подтверждает эффективность такого подхода. Однако, нейро-нечеткие структуры могут быть применены не только на

приводном, но и на тактическом уровне управления. При таком подходе на базе ANFIS предлагается реализация динамического компенсатора, аппроксимирующего решение обратной задачи динамики.

Список литературы

1. D. Schmitz, T. Kanade. Design of a Reconfigurable Modular Manipulator System // Jet Propulsion Lab., California Inst. of Tech., Proceedings of the Workshop on Space Telerobotics, Volume 3. – 1987.
2. Donald Schmitz, Pradeep Khosla, Takm Kanade. The CMU Reconfigurable Modular Manipulator System // CMU-RI-TR-88-7. – 1988.
3. Основы робототехники: учебное пособие / Юревич Е.И. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2020. – 302 с.
4. Интеллектуальные системы автоматического управления / Под ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 576 с.
5. Jyh-Shing R. Jang. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Volume 23, Issue 3. – 1993: С. 665-685.
6. I-Ming Chen, Guilin Yang Configuration Independent Kinematics for Modular Robots // Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation Minneapolis, Minnesota. – 1996.
7. Guilin Yang, I-Ming Chen. Task-based optimization of modular robot configurations: minimized degree-of-freedom approach // Mechanism and Machine Theory Volume 35, Issue 4. – 2000: С. 517-540.
8. Acaccia, G., Bruzzone, L. and Razzoli, R., "A modular robotic system for industrial applications", Assembly Automation, Volume 28 No. 2. – 2008: С. 151-162.
9. Seonghun Hong, Dongeun Choi, Sungchul Kang, Hyeongcheol Lee, Woosub Lee. Design of manually reconfigurable modular manipulator with three revolute joints and links // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2016.
10. Yiming Liu, Hui Xu, Changxing Geng, Guodong Chen. A modular manipulator for industrial applications: Design and implement // 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE). – 2017.
11. Alchan Yun, Deaho Moon, Junhyoung Ha, Sungchul Kang, and Woosub Lee. ModMan: An Advanced Reconfigurable Manipulator System With Genderless Connector and Automatic Kinematic Modeling Algorithm // IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 5, NO. 3. – 2020: С. 4225 - 4232.
12. Wenfu Xu, Liang Han, Xin Wang, Han Yuan. A wireless reconfigurable modular manipulator and its control system // Mechatronics Volume 73. – 2021.
13. Shinichi Kimura, Shigeru Tsuchiya, Shin'ichiro Nishida, Tomoki Takegai. A module type manipulator for remote inspection in space // IEEE SMC'99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. – 1999.
14. Shinichi Kimura, Shigeru Tsuchiya, Yoshiaki Suauki. Decentralized Autonomous Mechanism for Fault-Tolerant Control of a Kinematically Redundant Manipulator // IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century. – 1995.
15. Shinichi Kimura, Masato Takahashi, Toshiyuki Okuyama, Shigeru Tsuchiya, Yoshiaki Suzuki. A Fault-Tolerant Control Algorithm Having a Decentralized Autonomous Architecture for Space Hyper-Redundant Manipulators // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, Volume 28, Issue 4. – 1998: С. 521-527.
16. Shinichi Kimura. A Decentralized Control Algorithm for Modular Manipulators Using Coupled Nonlinear Dynamics // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2001: С. 162-169.
17. ShiCai Shi, Da Wang, SiPu Ruan, Rong Li, MingHe Jin, Hong Liu High. Integrated Modular Joint for Chinese Space Station Experiment Module Manipulator // IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). – 2015.
18. John R. Cooper, James H. Neilan, Matthew K. Mahlin, Laura M. White. Assemblers: A Modular, Reconfigurable Manipulator for Autonomous in-Space Assembly // NASA Langley Research Center. – 2020.
19. James H. Neilan, John R. Cooper, Matthew K. Mahlin, Laura White, Jacob Cassady, John Mulvaney, Matthew P. Vaughan Assemblers Project Review: Building and Testing an Autonomous Modular and Reconfigurable Manipulation System // AIAA SCITECH 2022 Forum. – 2022.
20. Victor Bloch, Amir Degani, Avital Bechar. A methodology of orchard architecture design for an optimal harvesting robot // Biosystems Engineering, Volume 166. – 2018: С. 126-137.

21. Mark Levin, Amir Degani. A conceptual framework and optimization for a task-based modular harvesting manipulator // *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 166. – 2019.
22. E.J. Van Henten, D.A. Van't Slot, C.W.J. Hol, L.G. Van Willigenburg. Optimal manipulator design for a cucumber harvesting robot // *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 65, Issue 2. – 2009: C. 247-257.
23. Satoru Sakai, Michihisa Iida, Koichi Osuka, Mikio Umeda. Design and control of a heavy material handling manipulator for agricultural robots // *Autonomous Robots*, Volume 25. - 2008: C. 189-204.
24. B. Sivaraman, T. F. Burks. Geometric Performance Indices for Analysis and Synthesis of Manipulators for Robotic Harvesting // *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*, Volume 49. – 2006: C. 1589- 1597.
25. Робототехника / Фу К., Гонсалес Р., Ли К. – пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 624 с.
26. Теоретические основы робототехники. В 2 кн. / А.И. Корендяев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес – М.: Наука, 2006. – 383 с. (кн. 1).
27. Hideyuki Takagi, Isao Hayashi. NN-Driven Fuzzy Reasoning // *International Journal of Approximate Reasoning*, Volume 5, Issue 3. – 1991: C. 191-212.
28. Jyh-Shing R. Jang. Fuzzy modeling using generalized neural networks and Kalman filter algorithm // *Proceedings of the ninth National conference on Artificial intelligence*, Volume 2. - 1991: C. 762-767.
29. Yanling Guo, Mohamed Elhaj Ahmed Mohamed. Speed Control of Direct Current Motor Using ANFIS Based Hybrid P-I-D Configuration Controller // *IEEE Access*, Volume 8. – 2020.
30. P. Tripura, Y. Srinivasa Kishore Babu. Intelligent speed control of DC motor using ANFIS // *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, Volume 26. – 2014: C. 223-227.
31. Aisha Jilani, Sadia Murawwat, Syed Omar Jilani. Controlling Speed of DC Motor with Fuzzy Controller in Comparison with ANFIS Controller // *Intelligent Control and Automation*, Volume 6. – 2015: C. 64-74.
32. R. Shanmugasundaram, C. Ganesh, A. Singaravelan, B. Gunapriya, B. Adhavan. High-Performance ANFIS-Based Controller for BLDC Motor Drive // *Ubiquitous Intelligent Systems, Proceedings of ICUIS*. – 2021: C. 435-449.
33. Hidayat, P.H Sasongko, Sarjiya, Suharyanto. Performance analysis of Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems (ANFIS) for speed control of brushless DC motor // *Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics*. – 2011.
34. Ganesan R, S. Suresh, S. S. Sivaraju. ANFIS Based Multi-Sector Space Vector PWM Scheme for Sensorless BLDC Motor Drive // *Microprocessors and Microsystems*, Volume 76. – 2020.
35. K. Premkumar, B.V. Manikandan. Fuzzy PID supervised online ANFIS based speed controller For Brushless dc motor // *Neurocomputing*, Volume 157. – 2015: C. 76-90.
36. Amr A. Sarhan, Ahmed T. Hafez. UAV Brushless DC motor Speed Control via Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems (ANFIS) and Self-Adaptive PID // *AIAA Scitech 2019 Forum*. – 2019.
37. Hidayat, Sasongko Pramonohadi Sarjiya, Suharyanto. A Comparative Study of PID, ANFIS and Hybrid PID - ANFIS Controllers for Speed Control of Brushless DC Motor Drive // *International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA)*. – 2013.
38. Subbarao Mopidevi, Dasari Kiransai, Duvvuri SSSR Sarathbabu, K.R.K.V. Prasad, B.K. Narendra, V.B Murali Krishna. Design, control and performance comparison of PI and ANFIS controllers for BLDC motor driven electric vehicles // *Measurement: Sensors*, Volume 31. – 2024.
39. Rabi Narayan Mishra, Kanungo Barada Mohanty. Real time implementation of an ANFIS-based induction motor drive via feedback linearization for performance enhancement // *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Volume 19, Issue 4. – 2016: C. 1714-1730.
40. Kusagur Ashok, Dr. S. F. Kodad, Dr. B V. Sankar Ram. Modeling, design & simulation of an adaptive neuro - fuzzy inference system (ANFIS) for speed control of induction motor // *International Journal of Computer Applications*, Volume 6. – 2010.
41. Sakuntala Mahapatra, Raju Daniel, Deep Narayan Dey, Santanu Kumar Nayak. Induction Motor Control Using PSO-ANFIS // *Procedia Computer Science*, Volume 48. – 2015: C. 753-768.
42. K. Premkumar, B.V. Manikandan Stability and Performance Analysis of ANFIS Tuned PID Based Speed Controller for Brushless DC Motor // *Current Signal Transduction Therapy*, Volume 13. - 2018: C. 19-30.
43. Abdessamad Intidam, Hassan El Fadil, Halima Housny, Zakariae El Idrissi, Abdellah Lassioui, Soukaina Nady, Abdeslam Jabal Laafou. Development and Experimental Implementation of Optimized PI-ANFIS Controller for Speed Control of a Brushless DC Motor in Fuel Cell Electric Vehicles // *Energies*, Volume 16, No. 11. – 2023.
44. Murali Dasari, A Srinivasula Reddy, M Vijaya Kumar. GA-ANFIS PID compensated model reference adaptive control for BLDC motor // *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, Volume 10, No. 1. - 2019: C. 265-276.

45. Mohamed A. Awadallah, Ehab H. E. Bayoumi, Hisham M. Soliman. Adaptive deadbeat controllers for brushless DC drives using PSO and ANFIS techniques // *Journal of Electrical Engineering*, Volume 60, No. 1. - 2009: C. 3–11.
46. Seydi Vakkas Ustun, Metin Demirtas. Modeling and control of V/f controlled induction motor using genetic - ANFIS algorithm // *Energy Conversion and Management*, Volume 50, Issue 3. – 2009: C. 786-791.

References

1. D. Schmitz, T. Kanade. Design of a Reconfigurable Modular Manipulator System // *Jet Propulsion Lab., California Inst. of Tech., Proceedings of the Workshop on Space Telerobotics*, Volume 3. – 1987.
2. Donald Schmitz, Pradeep Khosla, Takm Kanade. The CMU Reconfigurable Modular Manipulator System // *CMU-RI-TR-88-7*. – 1988.
3. Osnovy robototekhniki: uchebnoe posobie / YUrevich E.I. – 4-e izd., pererab. i dop. – SPb.: BHV-Peterburg, 2020. – 302 s.
4. Intellektual'nye sistemy avtomaticheskogo upravleniya / Pod red. I.M. Makarova, V.M. Lohina – M.: FIZMATLIT, 2001. – 576 s.
5. Jyh-Shing R. Jang. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Volume 23, Issue 3. – 1993: C. 665-685.
6. I-Ming Chen, Guilin Yang Configuration Independent Kinematics for Modular Robots // *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation Minneapolis, Minnesota*. – 1996.
7. Guilin Yang, I-Ming Chen. Task-based optimization of modular robot configurations: minimized degree-of-freedom approach // *Mechanism and Machine Theory* Volume 35, Issue 4. – 2000: C. 517-540.
8. Acaccia, G., Bruzzone, L. and Razzoli, R., "A modular robotic system for industrial applications", *Assembly Automation*, Volume 28 No. 2. – 2008: C. 151-162.
9. Seonghun Hong, Dongeun Choi, Sungchul Kang, Hyeongcheol Lee, Woosub Lee. Design of manually reconfigurable modular manipulator with three revolute joints and links // *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. – 2016.
10. Yiming Liu, Hui Xu, Changxing Geng, Guodong Chen. A modular manipulator for industrial applications: Design and implement // *2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE)*. – 2017.
11. Alchan Yun, Deaho Moon, Junhyoung Ha, Sungchul Kang, and Woosub Lee. ModMan: An Advanced Reconfigurable Manipulator System With Genderless Connector and Automatic Kinematic Modeling Algorithm // *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, NO. 3. – 2020: C. 4225 - 4232.
12. Wenfu Xu, Liang Han, Xin Wang, Han Yuan. A wireless reconfigurable modular manipulator and its control system // *Mechatronics* Volume 73. – 2021.
13. Shinichi Kimura, Shigeru Tsuchiya, Shin'ichiro Nishida, Tomoki Takegai. A module type manipulator for remote inspection in space // *IEEE SMC'99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. – 1999.
14. Shinichi Kimura, Shigeru Tsuchiya, Yoshiaki Suauki. Decentralized Autonomous Mechanism for Fault-Tolerant Control of a Kinematically Redundant Manipulator // *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century*. – 1995.
15. Shinichi Kimura, Masato Takahashi, Toshiyuki Okuyama, Shigeru Tsuchiya, Yoshiaki Suzuki. A Fault-Tolerant Control Algorithm Having a Decentralized Autonomous Architecture for Space Hyper-Redundant Manipulators // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, Volume 28, Issue 4. – 1998: C. 521-527.
16. Shinichi Kimura. A Decentralized Control Algorithm for Modular Manipulators Using Coupled Nonlinear Dynamics // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. – 2001: C. 162-169.
17. ShiCai Shi, Da Wang, SiPu Ruan, Rong Li, MingHe Jin, Hong Liu High. Integrated Modular Joint for Chinese Space Station Experiment Module Manipulator // *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. – 2015.
18. John R. Cooper, James H. Neilan, Matthew K. Mahlin, Laura M. White. Assemblers: A Modular, Reconfigurable Manipulator for Autonomous in-Space Assembly // *NASA Langley Research Center*. – 2020.
19. James H. Neilan, John R. Cooper, Matthew K. Mahlin, Laura White, Jacob Cassidy, John Mulvaney, Matthew P. Vaughan Assemblers Project Review: Building and Testing an Autonomous Modular and Reconfigurable Manipulation System // *AIAA SCITECH 2022 Forum*. – 2022.

20. Victor Bloch, Amir Degani, Avital Bechar. A methodology of orchard architecture design for an optimal harvesting robot // *Biosystems Engineering*, Volume 166. – 2018: C. 126-137.
21. Mark Levin, Amir Degani. A conceptual framework and optimization for a task-based modular harvesting manipulator // *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 166. – 2019.
22. E.J. Van Henten, D.A. Van't Slot, C.W.J. Hol, L.G. Van Willigenburg. Optimal manipulator design for a cucumber harvesting robot // *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 65, Issue 2. – 2009: C. 247-257.
23. Satoru Sakai, Michihisa Iida, Koichi Osuka, Mikio Umeda. Design and control of a heavy material handling manipulator for agricultural robots // *Autonomous Robots*, Volume 25. - 2008: C. 189-204.
24. B. Sivaraman, T. F. Burks. Geometric Performance Indices for Analysis and Synthesis of Manipulators for Robotic Harvesting // *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*, Volume 49. – 2006: C. 1589- 1597.
25. *Robototekhnika* / Fu K., Gonsales R., Li K. – per. s angl. – M.: Mir, 1989. – 624 s.
26. *Teoreticheskie osnovy robototekhniki. V 2 kn. / A.I. Korendyasev, B.L. Salamandra, L.I. Tyves – M.: Nauka, 2006. – 383 s. (kn. 1).*
27. Hideyuki Takagi, Isao Hayashi. NN-Driven Fuzzy Reasoning // *International Journal of Approximate Reasoning*, Volume 5, Issue 3. – 1991: C. 191-212.
28. Jyh-Shing R. Jang. Fuzzy modeling using generalized neural networks and Kalman filter algorithm // *Proceedings of the ninth National conference on Artificial intelligence*, Volume 2. - 1991: C. 762-767.
29. Yanling Guo, Mohamed Elhaj Ahmed Mohamed. Speed Control of Direct Current Motor Using ANFIS Based Hybrid P-I-D Configuration Controller // *IEEE Access*, Volume 8. – 2020.
30. P. Tripura, Y. Srinivasa Kishore Babu. Intelligent speed control of DC motor using ANFIS // *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, Volume 26. – 2014: C. 223-227.
31. Aisha Jilani, Sadia Murawwat, Syed Omar Jilani. Controlling Speed of DC Motor with Fuzzy Controller in Comparison with ANFIS Controller // *Intelligent Control and Automation*, Volume 6. – 2015: C. 64-74.
32. R. Shanmugasundaram, C. Ganesh, A. Singaravelan, B. Gunapriya, B. Adhavan. High-Performance ANFIS-Based Controller for BLDC Motor Drive // *Ubiquitous Intelligent Systems, Proceedings of ICUIS*. – 2021: C. 435-449.
33. Hidayat, P.H Sasongko, Sarjiya, Suharyanto. Performance analysis of Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems (ANFIS) for speed control of brushless DC motor // *Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics*. – 2011.
34. Ganesan R, S. Suresh, S. S. Sivaraju. ANFIS Based Multi-Sector Space Vector PWM Scheme for Sensorless BLDC Motor Drive // *Microprocessors and Microsystems*, Volume 76. – 2020.
35. K. Premkumar, B.V. Manikandan. Fuzzy PID supervised online ANFIS based speed controller For Brushless dc motor // *Neurocomputing*, Volume 157. – 2015: C. 76-90.
36. Amr A. Sarhan, Ahmed T. Hafez. UAV Brushless DC motor Speed Control via Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems (ANFIS) and Self-Adaptive PID // *AIAA Scitech 2019 Forum*. – 2019.
37. Hidayat, Sasongko Pramonohadi Sarjiya, Suharyanto. A Comparative Study of PID, ANFIS and Hybrid PID - ANFIS Controllers for Speed Control of Brushless DC Motor Drive // *International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA)*. – 2013.
38. Subbarao Mopidevi, Dasari Kiransai, Duvvuri SSSR Sarathbabu, K.R.K.V. Prasad, B.K. Narendra, V.B Murali Krishna. Design, control and performance comparison of PI and ANFIS controllers for BLDC motor driven electric vehicles // *Measurement: Sensors*, Volume 31. – 2024.
39. Rabi Narayan Mishra, Kanungo Barada Mohanty. Real time implementation of an ANFIS-based induction motor drive via feedback linearization for performance enhancement // *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Volume 19, Issue 4. – 2016: C. 1714-1730.
40. Kusagur Ashok, Dr. S. F. Kodad, Dr. B V. Sankar Ram. Modeling, design & simulation of an adaptive neuro - fuzzy inference system (ANFIS) for speed control of induction motor // *International Journal of Computer Applications*, Volume 6. – 2010.
41. Sakuntala Mahapatra, Raju Daniel, Deep Narayan Dey, Santanu Kumar Nayak. Induction Motor Control Using PSO-ANFIS // *Procedia Computer Science*, Volume 48. – 2015: C. 753-768.
42. K. Premkumar, B.V. Manikandan Stability and Performance Analysis of ANFIS Tuned PID Based Speed Controller for Brushless DC Motor // *Current Signal Transduction Therapy*, Volume 13. - 2018: C. 19-30.
43. Abdessamad Intidam, Hassan El Fadil, Halima Housny, Zakariae El Idrissi, Abdellah Lassioui, Soukaina Nady, Abdeslam Jabal Laafou. Development and Experimental Implementation of Optimized PI-ANFIS Controller for Speed Control of a Brushless DC Motor in Fuel Cell Electric Vehicles // *Energies*, Volume 16, No. 11. – 2023.

44. Murali Dasari, A Srinivasula Reddy, M Vijaya Kumar. GA-ANFIS PID compensated model reference adaptive control for BLDC motor // International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), Volume 10, No. 1. - 2019: C. 265-276.
45. Mohamed A. Awadallah, Ehab H. E. Bayoumi, Hisham M. Soliman. Adaptive deadbeat controllers for brushless DC drives using PSO and ANFIS techniques // Journal of Electrical Engineering, Volume 60, No. 1. - 2009: C. 3–11.
46. Seydi Vakkas Ustun, Metin Demirtas. Modeling and control of V/f controlled induction motor using genetic - ANFIS algorithm // Energy Conversion and Management, Volume 50, Issue 3. – 2009: C. 786-791.