

*Перминова Екатерина Антоновна,
студент, ФГАОУ ВО
«Московский государственный
технологический университет
«СТАНКИН»
г. Москва*

**ВЫБОР ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И АЛГОРИТМА
НЕЧЁТКОГО ВЫВОДА ПРИ РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ АВТОНОМНОЙ МОБИЛЬНОЙ
ТЕЛЕЖКИ**

***Аннотация:** В статье рассматривается техническая реализация системы нечёткого управления движением автономной внутрицеховой транспортной тележки (AGV). Обоснован выбор алгоритма нечёткого вывода Мамдани в сравнении с методами Сугено, Цукамото и Ларсена. Проведён сравнительный анализ сенсоров технического зрения — лидара, ультразвуковых датчиков и стереокамер, — на основании которого лидар выбран основным источником данных для контроллера. Рассмотрена кинематическая модель тележки с дифференциальным приводом и алгоритм пересчёта выходных команд контроллера в скорости вращения колёс. Проверены полнота и непротиворечивость продукционной базы из 36 правил, дана оценка вычислительной сложности нечёткого вывода. Приведены результаты тестирования разработанной системы в среде MATLAB Fuzzy Logic Designer на трёх характерных сценариях движения.*

***Ключевые слова:** нечёткая логика, алгоритм Мамдани, автономная мобильная тележка, AGV, лидар, дифференциальный привод, продукционная база правил, промышленная автоматизация.*

**Perminova Ekaterina Antonovna, Student,
Moscow State Technological University "STANKIN"
Moscow**

SELECTION OF TECHNICAL MEANS AND A FUZZY INFERENCE ALGORITHM FOR A MOTION CONTROL SYSTEM OF AN AUTONOMOUS MOBILE CART

***Abstract:** The paper addresses the engineering realization of a fuzzy logic motion control system for an autonomous in-shop transport cart (AGV). The choice of the Mamdani inference algorithm is substantiated in comparison with the Sugeno, Tsukamoto and Larsen methods. A comparative analysis of machine-vision sensors — LiDAR, ultrasonic sensors and stereo cameras — is carried out, on the basis of which LiDAR is selected as the primary data source for the controller. A kinematic model of the differential-drive cart and an algorithm for converting the controller output commands into wheel rotation speeds are considered. The completeness and consistency of the 36-rule production base are verified, and the computational complexity of the fuzzy inference is estimated. Testing results obtained in the MATLAB Fuzzy Logic Designer environment for three characteristic motion scenarios are presented.*

***Keywords:** fuzzy logic, Mamdani algorithm, autonomous mobile cart, AGV, LiDAR, differential drive, fuzzy rule base, industrial automation.*

Введение

Автоматизация внутрицеховой логистики — одно из ключевых направлений повышения эффективности машиностроительного производства. Автономные мобильные тележки (AGV) позволяют перевести транспортировку заготовок и комплектующих между рабочими позициями в безоператорный режим, однако реальная эффективность такой системы определяется не только общей архитектурой контроллера, но и конкретными

техническими решениями, положенными в его основу: выбором алгоритма нечёткого вывода, типом сенсорного оснащения, кинематической схемой привода и качеством проработки продукционной базы правил. Общая структура предлагаемой системы нечёткого управления и её лингвистические переменные были представлены ранее [1]. Настоящая статья продолжает эту работу и посвящена обоснованию инженерных решений, определяющих практическую реализуемость системы: почему выбран именно алгоритм Мамдани, почему основным сенсором служит лидар, как устроен пересчёт команд контроллера в управляющие сигналы приводов и насколько полна и вычислительно применима итоговая база правил.

Целью работы является обоснование выбора технических средств и алгоритмических решений для системы нечёткого управления автономной тележкой, обеспечивающих её работоспособность в условиях реального производственного цеха. Для достижения цели решены следующие задачи: проведён сравнительный анализ алгоритмов нечёткого вывода; выполнен сравнительный анализ датчиков технического зрения; построена кинематическая модель дифференциального привода; проверены полнота, непротиворечивость и вычислительная сложность продукционной базы правил; выполнено тестирование модели в среде моделирования.

1. Обоснование выбора алгоритма нечёткого вывода

Нечёткий вывод преобразует числовые показания сенсоров в числовые управляющие команды через промежуточный лингвистический слой: фаззификацию, агрегирование условий, активизацию и аккумуляцию заключений правил, дефаззификацию [2, с. 41]. Конкретная реализация шагов агрегирования, активизации и дефаззификации зависит от выбранного алгоритма нечёткого вывода, поэтому его выбор — одно из первых и наиболее значимых проектных решений.

Рассмотрены четыре наиболее распространённых алгоритма. Алгоритм Мамдани использует операции минимума и максимума для агрегирования и аккумуляции, а заключения правил представлены нечёткими

подмножествами, дефаззифицируемыми методом центра тяжести; это обеспечивает содержательную физическую интерпретацию каждой выходной команды — «скорость низкая», «поворот вправо» — без обращения к числовым коэффициентам. Алгоритм Сугено заменяет нечёткое заключение линейной функцией входных переменных, что повышает вычислительную эффективность, но снижает интерпретируемость выходного сигнала. Алгоритм Цукамото требует монотонности функций принадлежности заключений и потому исключает удобные для настройки треугольные термы с плоскими вершинами. Алгоритм Ларсена структурно близок к методу Мамдани, но использует умножение вместо операции минимума, что применяется, когда важно сохранить форму функции принадлежности, но на практике даёт результат, близкий к алгоритму Мамдани [3, с. 121].

Для задачи управления тележкой определяющими стали два требования: возможность прямой проверки продукционной базы технологом-непрограммистом и совместимость выбранной формы термов с треугольными функциями принадлежности, принятыми для всех входных и выходных переменных. Этим требованиям в полной мере отвечает только алгоритм Мамдани, тогда как методы Сугено и упрощённый (singleton) снижают лингвистическую прозрачность правил, а метод Цукамото несовместим с треугольными термами, имеющими плоские вершины. Дополнительным аргументом послужила широкая практика применения алгоритма Мамдани именно в задачах навигации автономных мобильных платформ [4, с. 58; 5]. Итоговое сравнение алгоритмов приведено в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение алгоритмов нечёткого вывода

Алгоритм	Форма заключения	Интерпретируемость	Ограничения
Мамдани	Нечёткое подмножество	Высокая	Более высокая вычислительная нагрузка
Сугено	Линейная функция входов	Низкая	Числовые, не лингвистические заключения
Цукамото	Монотонная функция	Средняя	Требует монотонности термов
Ларсен	Нечёткое подмножество (масштаб.)	Высокая	Близок к Мамдани по сложности

2. Выбор сенсорной системы технического зрения

Выбор сенсора для автономной тележки определяется не только его метрологическими характеристиками, но и удобством сопряжения выходных данных с нечётким контроллером, которому требуется числовое значение дистанции до препятствия по каждому из трёх контролируемых направлений — спереди, слева и справа [6, с. 24]. Рассмотрены три типа датчиков.

Лидар определяет расстояние по времени возврата отражённого лазерного импульса и формирует набор дистанций, привязанных к дискретным угловым секторам; эти значения без промежуточной обработки подаются на входы контроллера. Точность лидара не зависит от освещённости и сохраняется при характерной для цеха запылённости воздуха. Ультразвуковой датчик работает по аналогичному принципу эхолокации, но с акустической волной; он дешевле, однако его показания чувствительны к температуре, влажности и отражающим свойствам поверхности, а узкая

диаграмма направленности формирует мёртвые зоны. Стереокамера восстанавливает карту глубины по паре кадров; получаемые данные детализированы, но качество карты резко падает при слабом или неоднородном освещении, вычислительная нагрузка на обработку стереопары значительно выше, а извлечение конкретной дистанции из карты глубин требует дополнительного программного конвейера, усложняющего сопряжение с контроллером.

Сравнение трёх типов датчиков сведено в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение датчиков технического зрения

Критерий	Лидар	Ультразвук	Стереокамера
Точность	Высокая, стабильная	Низкая–средняя	Средняя–высокая
Устойчивость к условиям цеха	Высокая	Низкая	Средняя
Вычислительная сложность обработки	Средняя	Низкая	Высокая
Совместимость с нечётким контроллером	Прямая	Прямая	Требуется конвейер обработки

По совокупности критериев основным сенсором выбран лидар: его данные напрямую совместимы с лингвистическими переменными контроллера, а метрологические характеристики не зависят от освещения и пыли — типичных факторов цеховой среды [7]. Повышенная стоимость лидара относительно ультразвуковых аналогов компенсируется требованиями к надёжности контура безопасности. Для защиты от столкновений дополнительно предусмотрены механические бамперы с концевым выключателем, сигнал которых разрывает силовую цепь приводов напрямую,

минуя логику нечёткого контроллера — это гарантирует остановку тележки даже при отказе или временной неработоспособности лидарного канала.

3. Кинематическая модель тележки и выбор приводов

Выходными величинами нечёткого контроллера являются линейная скорость и безразмерный угол поворота $\theta \in [-1; 1]$. Поскольку тележка построена по дифференциальной приводной схеме — тяговое усилие и курс задаются раздельным регулированием оборотов двух ведущих колёс на общей оси, а остальные колёса свободно вращаются без привода [8, с. 76], — эти величины нельзя подать на двигатели напрямую: угол θ не является физическим углом поворота колеса, а определяет лишь относительную разность скоростей левого и правого колёс.

Блок обратной кинематики выполняет пересчёт по формулам

$$\Delta v = d \cdot \theta \cdot v_{\max}, \quad v_{\text{left}} = v - \Delta v / 2, \quad v_{\text{right}} = v + \Delta v / 2,$$

где d — расстояние между колёсами, v — линейная скорость центра тележки, полученная в результате дефаззификации, $v_{\max}$ — максимальная скорость. Знак Δv определяет направление поворота: положительное значение соответствует повороту влево, отрицательное — вправо. При движении прямо ($\theta = 0$) оба колеса вращаются с одинаковой скоростью v ; при повороте колесо с внешней стороны дуги вращается быстрее внутреннего [9].

В качестве тягового привода выбран щёточный электромотор постоянного тока, управляемый методом широтно-импульсной модуляции. Рассматривался также бесколлекторный привод, превосходящий щёточный по КПД, ресурсу и плавности регулирования, однако для решаемой задачи характеристики щёточного мотора в сочетании с ШИМ-регулированием признаны достаточными, а конструктивная простота и более низкая стоимость перевесили преимущества бесколлекторной схемы. Полученные скорости v_{left} и v_{right} преобразуются в скважность ШИМ-сигнала для каждого из двух независимых силовых драйверов.



Общий принцип функционирования тележки образует двухуровневую систему (рис. 1): глобальный планировщик строит маршрут по предварительно загруженной карте цеха, а нечёткий контроллер, получая данные от лидара и бамперов, обеспечивает безопасное прохождение каждого участка — снижает скорость при сближении с помехой, выполняет объезд или останавливает тележку. Совместная работа двух уровней в сочетании с рассмотренной кинематической моделью и приводом позволяет тележке автономно доставлять груз из одной точки цеха в другую, преодолевая неопределённость внешней среды [10, с. 33].

4. Полнота, непротиворечивость и вычислительная сложность базы правил

Работоспособность нечёткого контроллера в реальном времени зависит от того, найдётся ли в базе правил подходящая реакция для любой допустимой комбинации входных термов, и от того, не предписывают ли два правила противоречивых действий одной и той же ситуации [3, с. 205]. Входные переменные образуют $4 \times 3 \times 3 = 36$ возможных сочетаний термов: расстояние спереди принимает одно из четырёх значений («очень близко», «близко», «среднее», «далеко»), расстояния слева и справа — по одному из трёх («очень близко», «близко», «свободно»). Разработанная продукционная база содержит ровно 36 правил — по одному на каждую комбинацию, что обеспечивает её полноту. Поскольку каждая комбинация встречается в базе только один раз, конфликт правил структурно исключён, а переход между соседними по значению ситуациями сопровождается плавным, а не скачкообразным

изменением выходных команд — контроллер не оставляет ни одной входной комбинации без предписанной реакции и не содержит взаимоисключающих правил.

Дополнительно оценена вычислительная нагрузка контроллера. На каждом такте управления выполняются: фаззификация трёх входных значений — вычисление степеней принадлежности к 10 термам; определение степени активации каждого из 36 правил операцией минимума; формирование выходных функций принадлежности для двух выходных переменных; дефаззификация методом центра тяжести. Суммарно это составляет порядка нескольких сотен арифметических операций на такт, что укладывается в единицы миллисекунд даже на микроконтроллере среднего класса, тогда как типичный период опроса лидара составляет 50–100 мс [2, с. 44]. Таким образом, вычислительный запас является многократным, и база из 36 правил не создаёт препятствий для реализации контроллера на доступных аппаратных платформах без специализированных ускорителей.

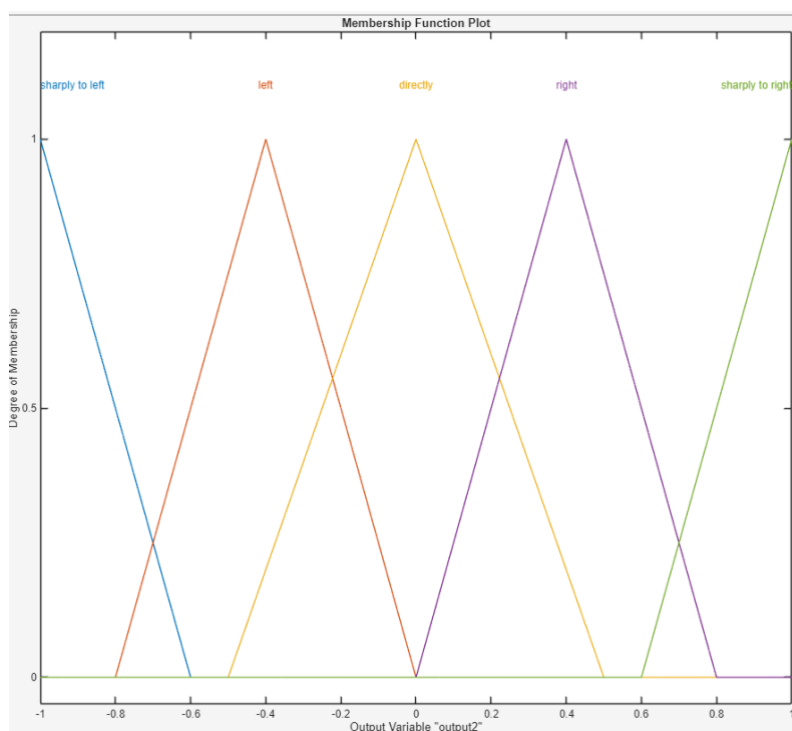


Рисунок 2. Функции принадлежности выходной переменной «угол поворота»

Плавность реакции контроллера обеспечивается непрерывностью треугольных функций принадлежности выходных переменных (рис. 2 — на примере угла поворота): соседние термы перекрываются, поэтому при постепенном изменении обстановки выходная команда меняется без резких скачков, что важно для механической плавности хода тележки и сохранности перевозимого груза.

5. Экспериментальная проверка

Проверка принятых технических решений выполнена в модуле Rule Inference пакета MATLAB Fuzzy Logic Designer на трёх сценариях, охватывающих принципиально разные производственные ситуации [5]. Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты тестирования системы управления в трёх сценариях

Сценарий	Спереди, м	Слева, м	Справа, м	Скорость, м/с	Угол
Свободное движение	2,8	1,9	1,9	1,77	≈ 0
Объезд препятствия	1,1	0,5	1,5	0,9	0,4
Экстренная остановка	0,1	1,8	1,9	0,067	0

В сценарии свободного движения все три входных параметра попадают в термы «далеко» и «свободно», активируется правило № 1, контроллер выдаёт максимальную рабочую скорость и нулевой угол поворота — тележка движется прямо. В сценарии объезда препятствия асимметрия боковых каналов (слева теснее, чем справа) приводит к снижению скорости и формированию угла поворота в сторону более свободной зоны — направление объезда система выбирает автоматически, туда, где больше места. В сценарии

экстренной остановки фронтальное расстояние попадает в терм «очень близко», в силу принципа абсолютного приоритета безопасности контроллер немедленно снижает скорость до величины, близкой к нулю, и обнуляет угол поворота — важно, что система не пытается выполнить объезд даже при свободных боковых каналах, поскольку в аварийной ситуации любое неконтролируемое движение исключается заложенными правилами.

Во всех трёх сценариях активировались правила, предписанные экспертной логикой продукционной базы, конфликтов между правилами не зафиксировано, выходные переменные менялись плавно без рывков. Это подтверждает, что совокупность принятых технических решений — алгоритм Мамдани, лидарное сенсорное оснащение, дифференциальный привод с блоком обратной кинематики и полная непротиворечивая база из 36 правил — образует работоспособную и внутренне согласованную систему управления.

Заключение

В работе обоснован комплекс технических решений для системы нечёткого управления движением автономной внутрицеховой тележки. Показано, что алгоритм Мамдани предпочтителен для данной задачи благодаря лингвистической интерпретируемости заключений правил; лидар выбран основным сенсором как наиболее совместимый по формату данных с нечётким контроллером и устойчивый к цеховым условиям; предложена кинематическая модель пересчёта выходных команд контроллера в скорости вращения колёс дифференциального привода на базе щёточных двигателей постоянного тока с ШИМ-регулированием. Продукционная база из 36 правил проверена на полноту и непротиворечивость, а оценка вычислительной сложности показала многократный запас производительности относительно частоты опроса сенсоров. Результаты тестирования в трёх характерных сценариях подтвердили корректность и согласованность принятых решений.

Ограничением проведённой проверки остаётся её статический характер: контроллеру предъявлялись фиксированные наборы входных значений, а не непрерывный поток данных, имитирующий реальное движение. Направления

дальнейшей работы — динамическое моделирование замкнутого контура в пакете Simulink с учётом инерции тележки, натурные испытания на прототипе с оценкой задержек приводов и шума реальных сенсоров, а также расширение базы правил для нештатных сценариев: одновременных препятствий по всем трём каналам, временного отказа одного из лидаров и ситуаций ограниченного пространства для разворота.

Список используемых источников:

1. Пегат А. Нечёткое моделирование и управление / А. Пегат ; пер. с англ. А. Г. Подвесовского, Ю. В. Тюменцева. — 2-е изд. — Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. — 798 с.
2. Круглов В. В. Нечёткая логика и искусственные нейронные сети : учебное пособие / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. — Москва : Физматлит, 2001. — 224 с.
3. Никишечкин А. П. Моделирование нечётких систем : учебное пособие / А. П. Никишечкин. — Москва : ИЦ ГОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2010. — 196 с.
4. Система нечёткого вывода. Алгоритм Мамдани [Электронный ресурс] // MathWorks : [сайт]. — URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/mamdani-type-fuzzy-inference-systems.html> (дата обращения: 15.11.2025).
5. ГОСТ ISO 3691-4-2020. Тележки промышленные. Требования безопасности и верификация. Часть 4. Тележки без водителя и их системы. — Москва : Стандартиформ, 2021. — 56 с.
6. Ковальчук А. К. Создание и исследование интеллектуальных систем управления автономными мобильными роботами : учебное пособие / А. К. Ковальчук, В. М. Лохин, М. П. Романов. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. — 236 с.

7. Бурдаков С. Ф. Системы управления движением колесных роботов / С. Ф. Бурдаков, И. В. Мирошник, Р. Э. Стельмаков. — Санкт-Петербург : Наука, 2001. — 227 с.
8. Юревич Е. И. Основы робототехники / Е. И. Юревич. — 2-е изд., перераб. и доп. — Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. — 416 с.
9. Борисов В. В. Нечёткие модели и сети / В. В. Борисов, В. В. Круглов, А. С. Федулов. — Москва : Горячая линия — Телеком, 2007. — 284 с.