

ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ «ШАГ В БУДУЩЕЕ»
ПО ПРОФИЛЮ «ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО»

19233

регистрационный номер

Секция: Информационные технологии
название секции

Анализ эффективности нечетких контроллеров
на примере нестационарных маятниковых механизмов
название работы

Автор: Коробовцева Ольга Антоновна
фамилия, имя, отчество
ГБОУ Школа №1532
наименование учебного заведения, класс

Научный руководитель: Таразевич Анастасия Ильинична
фамилия, имя, отчество
РТУ МИРЭА
место работы
Лаборант
звание, должность

подпись научного руководителя

Москва - 2024

Аннотация

Данная исследовательская работа направлена на анализ эффективности нечетких контроллеров в управлении двумя типами маятников: маятником Максвелла и перевернутым маятником на тележке.

В качестве алгоритма управления был выбран контроллер на базе нечеткой логики с несколькими наблюдаемыми параметрами и одним управляемым, в качестве алгоритма глобальной оптимизации был выбран модифицированный генетический алгоритм. Программный код написан на языке программирования Python.

В результате исследования было показано, что применение нечетких контроллеров в сфере управления является релевантным и эффективным решением.

Реализованные нечеткие контроллеры можно использовать для управления нелинейным многопараметрическим процессом, который трудно описать математически.

Содержание

Введение.....	4
Цель и задачи работы.....	4
Основная часть.....	5
Теория нечетких множеств. Алгоритм Мамдани.....	5
База правил.....	5
Фаззификация. Функция принадлежности	5
Активизация	7
Аккумуляция	8
Дефаззификация.....	8
Математические модели	9
Маятник Максвелла.....	9
Функция нахождения новых положений и скоростей	9
Перевернутый (обратный) маятник.....	14
Функция нахождения новых углов и скоростей	14
Выбор метода глобальной оптимизации	16
Десктоп-приложение «Fuzzy Controllers»	17
Результаты и обсуждения	17
Выводы	18
Список используемой литературы	19
Приложения	20
Приложение А	20
Приложение Б	20
Приложение В	20
Приложение Г	21
Приложение Д	22
Приложение Е	23

Введение

Нечеткость является неотъемлемой частью реального мира, поэтому нечеткая логика активно используется для разработки интеллектуальных систем, способных обрабатывать и анализировать нечеткую информацию. Впервые теория множеств была предложена американским ученым Лофти Заде в 1965 году. Она базируется на наборе нестрогих правил и интуитивных догадках. В отличие от обычных множеств, когда элемент либо принадлежит множеству, либо нет, нечеткие множества не имеют явной границы. Это свойство помогает составлять законы управления, которые реализуются с помощью нечеткого контроллера в системах автоматики.

Цель и задачи работы

Целью работы является разработка и проверка на эффективность программного аппаратного комплекса с нечеткими контроллерами, которые будут подавать такие управляющие воздействия на маятниковые системы, чтобы они находились в заданных границах.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Реализовать принципы нечеткой логики на языке программирования Python;
2. Изучить и смоделировать поведение рассматриваемых маятниковых систем;
3. Осуществить подачу управляющих воздействий для необходимой работы маятника Максвелла и перевернутого маятника;
4. Написать десктоп-приложение для визуального представления математических моделей;
5. Реализовать алгоритмы глобальной оптимизации и выявить наиболее эффективный для составления баз правил;
6. Отобразить графически работу нечеткого управления;

7. Начать разработку физических моделей рассматриваемых маятниковых систем;
8. Проверить разработанную систему на эффективность.

Основная часть

Теория нечетких множеств. Алгоритм Мамдани

В ходе работы был реализован алгоритм британского математика Э.Мамдани. В наше время данный метод получил активное применение в задачах нечеткого моделирования, так как позволяет избежать большое количество вычислений.

Рассмотрим этапы алгоритма Мамдани.

База правил

База правил представляет из себя несколько нечетких правил, в которых каждому фаззифицированному значению положения маятника и скорости соответствует нечеткое число.

В коде автора правило выглядит следующим образом:

```
x1 = Trapezoid([0.09, 0.14, 0.156, 0.175, 1]).trapezoid();  
v1 = Trapezoid([0.280, 0.351, 0.466, 0.616, 1]).trapezoid();  
w1 = Trapezoid([6.00, 9.550, 13.550, 16.350, 1]).trapezoid();
```

В примере выше присутствует класс Trapezoid, имеющий метод trapezoid(), который фаззифицирует число.

Фаззификация. Функция принадлежности

Фаззификация — процесс перевода входных данных в нечеткие, путем нахождения степени принадлежности измерения к нечеткому множеству. В качестве входных данных мы получаем положение модели (x) и скорость (v).

Существует несколько видов функций принадлежности. Самыми часто используемыми стали Треугольная, Трапецеидальная и Гауссова. В рамках данной исследовательской работы автором была выбрана

Трапецидальная функция принадлежности. Главная причина заключается в том, что при использовании Гауссовой функции принадлежности будет проблема в нахождении определенного интеграла, так как такая функция стремится к нулю, но никогда его не достигает. Треугольная функция принадлежности была не выбрана в связи с тем, что при большом желании из трапецидального числа можно сделать треугольное, задав $b = c$.

Трапецидальная функция принадлежности задается четырьмя числами и вычисляется согласно выражению (1):

$$\mu(x, a, b, c, d) = \begin{cases} 1 - \frac{b-x}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ 1 - \frac{x-c}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (1)$$

Агрегирование

Агрегирование подразумевает под собой процедуру определения степени истинности условий по каждому из правил системы нечеткого вывода путем наложения фаззифицированных наблюдаемых данных на соответствующие правила (Рисунок 1.1, Рисунок 1.2).

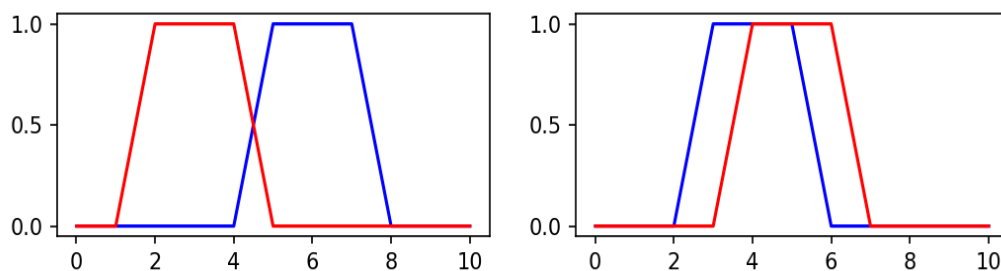


Рисунок 1.1 — Агрегирование 1

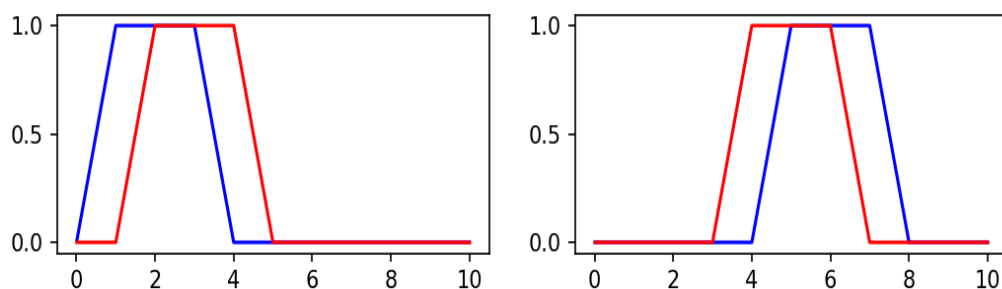


Рисунок 1.2 — Агрегирование 2

На рисунках выше синим цветом обозначены условия x и v (слева – x , справа – v) из базы правил, красным цветом – наблюдаемые значения. В последующих рисунках используются такие же обозначения.

Активизация

На данном этапе происходит «обрезание» нечеткого числа w из правила. Из процесса агрегирования находим точку пересечения с максимальным значением по оси Y .

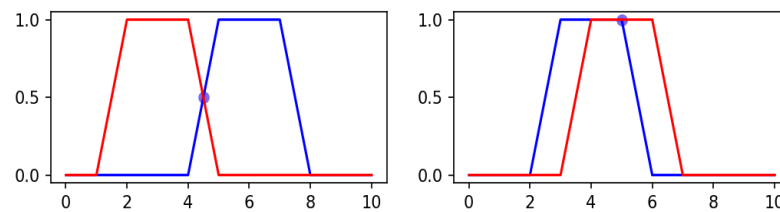


Рисунок 2.1 — Активизация 1

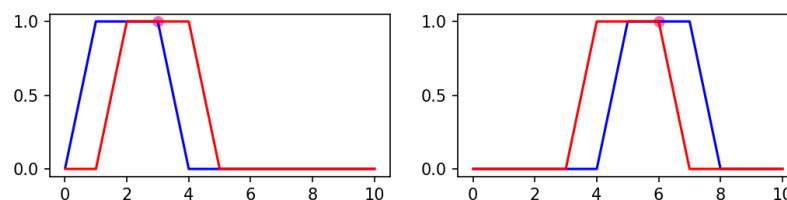


Рисунок 2.2 — Активизация 2

На рисунке 2.1 видно, что максимальное значение пересечения нечетких чисел по оси Y равно 0.5, на рисунке 2.2 – 1. По нему и обрезаем каждое заключение каждого правила из базы (Рисунок 2.3).

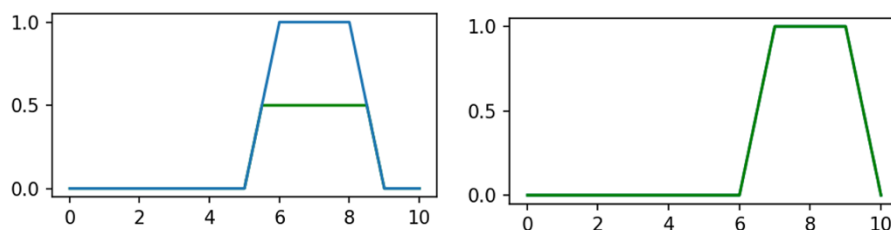


Рисунок 2.3 — Активизация

На рисунке выше синим цветом обозначены заключения из базы правил, зеленым – уровень обрезания числа. Мы помним, что в первом правиле

максимальная точка пересечения по оси Y была равна 0.5, а во втором – 1. В результате процесса активизации оставляем обрезанные по зеленому уровню лингвистические числа (Рисунок 2.4).

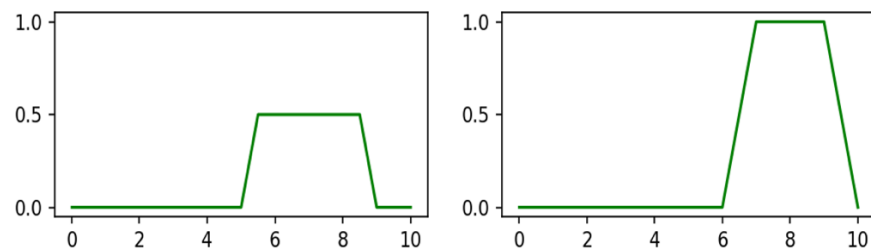


Рисунок 2.4 — Результат активизации

Аккумуляция

Процесс аккумуляции представляет процедуру объединения всех степеней истинности заключений для получения функции принадлежности каждой из выходных переменных (Рисунок 3.1).

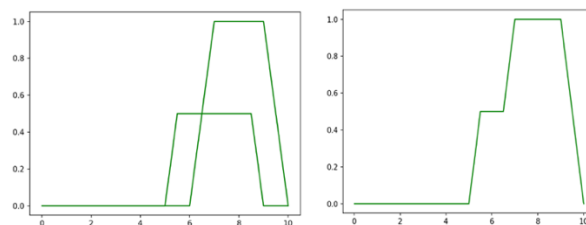


Рисунок 3.1 — Объединение степеней истинности заключений и получение общей фигуры

Результат объединения имеет функцию принадлежности:

$$\mu_3(x) = \max \{\mu_1(x), \mu_2(x)\}$$

Дефазификация

На данном этапе с определенным способом вычисления находится числовое значение выходного параметра (единственного управляющего воздействия) на основе входных значений (x, v).

В проекте для дефазификации автор использовал метод центра тяжести (центроид) (Рисунок 4). Благодаря такому подходу значение выходной переменной равно абсциссе центра тяжести площади, ограниченной графиком кривой функции принадлежности соответствующей выходной переменной и находится по формуле (2):

$$y_i = \frac{\int_{\min}^{\max} x \cdot \mu_i(x) dx}{\int_{\min}^{\max} \mu_i(x) dx} \quad (2)$$

где $\mu_i(x)$ — функция принадлежности соответствующего нечеткого множества;

\min и \max — границы универсума нечетких переменных;
 y_i — результат дефаззификации.

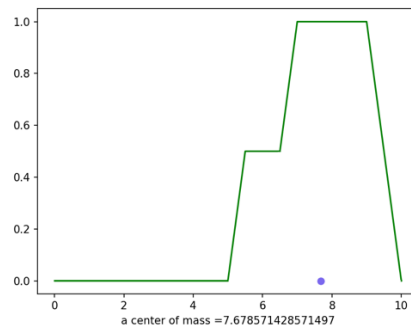


Рисунок 4 — Центроид

Математические модели

Твердое тело в механике — такое тело, в котором взаимные расстояния между материальными точками неизменяемы вне зависимости от действующих сил. Материальные точки должны быть большого размера, чтобы на их поведении не сказывалось перемещение отдельных молекул (в данной задаче под материальными точками подразумеваются отдельные части рассматриваемого тела).

Примерами такого перемещения можно считать плоскопараллельное движение маятника Максвелла и перевернутого маятника.

Маятник Максвелла

Маятник Максвелла представляет из себя однородный массивный диск (часто металлический), с тонким стержнем кругового сечения. Его ось держится на двух накрученных нитях к горизонтальной опоре.

Функция нахождения новых положений и скоростей

Для адекватной модели нужно ввести следующие условия:

1. нить невесома и нерастяжима;
2. нет трения о воздух;

3. пренебрежение потерями кинетической энергии ввиду трения нити об ось и местах крепления;

4. ось и диск сделаны из одинаковых материалов.

Также введем следующие обозначения: m — масса диска; m_{ax} — масса оси; $g = 9.80665$ — ускорение свободного падения; a — ускорение движение центра оси относительно оси Ox (не путайте ось (механическая деталь маятника) и ось Ox (координатная ось)); a_{new} — ускорение движение центра оси относительно оси Ox после упругого удара; a_{ax} — ускорение движения точки на оси; T — натяжение нити; d — диаметр оси; D — диаметр диска $r = \frac{d}{2}$ — радиус оси; $R = \frac{D}{2}$ — радиус диска; I — момент инерции диска с осью; I_{di} — момент инерции диска; I_{ax} — момент инерции оси; $F_n = F_n(t)$ — сила внешних сил; w — ускорение диска с осью, вызванного внешней силой F_n . В нашем случае $w = w(x, v)$, то есть ускорение зависит от параметров маятника. В нашем случае ускорение определяется через нечеткий контроллер, управляемая координата; ε — угловое ускорение диска; M — момент сил, действующих на ось; l — длины каждой из двух нитей v_v — вращательная скорость движения точки на оси; ω — угловая скорость движения точки на оси; t — время; Δt — шаг наблюдений за данными маятника; T — время до которого мы производим управление; dv_v — дифференциал по вращательной скорости v ; $d\omega$ — дифференциал по угловой скорости ω ; dt — дифференциал по времени; x_0 — начальное положение центра диска относительно оси Ox . Очевидно, что $l \geq x_0 \geq R$; x_i — значения положения центра диска относительно оси Ox в моменты времени $i \cdot \Delta t$, где $i = \overline{0, \frac{T}{\Delta t}}$; v_0 — начальная скорость центра диска относительно оси Ox $v_0 \geq 0$, то есть вначале диск раскручивается; v_i — значения скорости центра диска относительно оси Ox в моменты времени $i \cdot \Delta t$, где $i = \overline{0, \frac{T}{\Delta t}}$; v_{new} — скорость движение центра оси относительно оси Ox после упругого удара; $v = v(t)$ — текущая скорость движения центра диска относительно оси Ox ; $x = x(t)$ — текущее положение

центра диска относительно оси Ox ; x_1^* — нижняя граница интервала желаемой траектории; x_2^* — верхняя граница интервала желаемой траектории; w_1 — нижняя граница возможного управляемого параметра; w_2 — верхняя граница возможного управляемого параметра; k — коэффициент затухания ускорения при упругом ударе; i_{ch} — номера таких наблюдений, когда на следующем наблюдении ускорение a сменит свой знак; t_{ch} — точное время, когда на промежутке времени $[i_{ch} \cdot \Delta t; (i_{ch} + 1) \cdot \Delta t]$ ускорение сменит знак; e — минимальная амплитуда колебания маятника в нижней точке. Если колебание меньше этой величины, то скорость становится равной нулю и маятник останавливается в нижней точке.

Выведем формулу для нахождения новых положения и скорости маятника Максвелла.

Запишем второй закон Ньютона в векторной форме:

$$(m + m_{ax}) \cdot \bar{a} = (m + m_{ax}) \cdot \bar{g} + 2\bar{T} + \bar{F}_n. \quad (3.1)$$

Спроецируем на ось Ox :

$$\begin{aligned} (m + m_{ax}) \cdot a &= (m + m_{ax}) \cdot g - 2T - F_n; \\ (m + m_{ax}) \cdot a &= (m + m_{ax}) \cdot g - 2T - (m + m_{ax}) \cdot w. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Теперь рассмотрим вращательное движение диска, которое подчиняется уравнению:

$$M = I \cdot \varepsilon. \quad (3.3)$$

Найдем момент сил, действующих на ось

$$M = (2T + m_{ax}w - m_{ax}g) \cdot r. \quad (3.4)$$

Приравняем (1.3) и (1.4). Получим:

$$I \cdot \varepsilon = (2T + F_n - m_{ax}g) \cdot r. \quad (3.5)$$

Из уравнения (1.2) получим:

$$2T + m_{ax}w - m_{ax}g = mg - mw - (m + m_{ax})a. \quad (3.6)$$

Мы знаем равенство, связывающее скорость равномерного движения точки по окружности с угловой скоростью:

$$v_v = \omega \cdot r. \quad (3.7)$$

В нашем случае точка на оси движется неравномерно, а равноускорено (ответ на вопрос «почему» ниже). Поэтому (1.7) запишем как:

$$dv_v = d\omega \cdot r. \quad (3.8)$$

Теперь поделим на dt . Получим:

$$\frac{dv_v}{dt} = \frac{d\omega}{dt} \cdot r. \quad (3.9)$$

$$a_{ax} = \varepsilon \cdot r. \quad (3.10)$$

Теперь сравним a и a_{ax} .

$$a_{ax} = a. \quad (3.11)$$

Совмещая (1.11) и (1.10), получим:

$$a = \varepsilon \cdot r; \quad (3.12)$$

Подставим (1.12) и (1.6) в (1.5):

$$a = \frac{mgr - mwr}{\frac{I}{r} + (m + m_{ax})r}; \quad (3.13)$$

Ввиду того, что мы сделали предположение об однородности оси и диска, то мы имеем два сплошных цилиндра: диск и ось. Тогда:

$$I = I_{di} + I_{ax}. \quad (3.14)$$

По известной формуле получим, что:

$$I_{ax} = \frac{1}{2} m_{ax} r^2. \quad (3.15)$$

Подставим (1.14) и (1.15) в (1.13):

$$a = \frac{mr^2 \cdot (g - w)}{\frac{1}{2} mR^2 + \frac{1}{2} m_{ax} r^2 + (m + m_{ax}) r^2}. \quad (3.16)$$

Мы получили ускорение диска при разматывании нити с оси. При начальных условиях мы можем получить уравнение движения центра диска относительно оси Ox :

$$x(t) = x_0 + v_0 \cdot t + 0.5 \cdot a \cdot t^2. \quad (3.17)$$

Но a — не является постоянной величиной, ведь F_n — управляющее воздействие (зависит от управляющего ускорения), значение которого зависит от предыдущих значений наблюдаемых параметров, в общем, от времени. То есть:

$$x(t) = x_0 + v_0 \cdot t + 0.5 \cdot t^2 \cdot a(w(t)). \quad (3.18)$$

Данная формула не совсем верна, так как корректна при постоянном ускорении. В связи с тем, что мы производим наблюдения и по ним определяем управляющее воздействие через равные промежутки времени Δt , в одном таком промежутке времени между наблюдениями ускорение постоянно. Значит, можно записать:

$$\begin{aligned} x(t) &= x_i + v_i \cdot (t - i \cdot \Delta t) + 0.5 \cdot (t - i \cdot \Delta t)^2 \cdot a(x_i, v_i); \\ x_{i+1} &= x_i + v_i \cdot \Delta t + 0.5 \cdot \Delta t^2 \cdot a(x_i, v_i); \\ v_{i+1} &= v_i + \Delta t \cdot a(x_i, v_i); \\ a(x_i, v_i) &= \frac{mr^2 \cdot (g - w(x_i, v_i))}{\frac{1}{2}(mR^2 + m_{ax}r^2) + (m + m_{ax})r^2}; \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$t \in [i \cdot \Delta t; (i + 1) \cdot \Delta t];$$

Эта систему можно использовать, но не стоит забывать про неравенство:

$$l \geq x(t) \geq R. \quad (3.20)$$

При достижении нижней точки диск испытает упругий удар, и скорость системы на данном промежутке времени сменится на противоположное. Но оно чуть уменьшится по абсолютной величине в связи с потерей энергии:

$$a_{new}(x_i, v_i) = a(x_i, v_i). \quad (3.21)$$

$$v_{new} = -(1 - k) \cdot v_i. \quad (3.22)$$

Пусть для данного промежутка времени $i = i_{ch}$. В момент времени t_{ch} нить полностью раскрутится. Решим уравнение относительно t_{ch} . При этом будем учитывать, что нить раскручивается, а значит $a(x_i, v_i) > 0$, $l > x_i > 0$:

$$t_{ch} = i \cdot \Delta t + \frac{1}{a(x_i, v_i)} \left(-v_i + \sqrt{v_i^2 - 2 \cdot a(x_i, v_i) \cdot (l - x_i)} \right). \quad (3.23)$$

Тогда:

$$\begin{aligned} x_{i+1} &= l + v_{new} \cdot (\Delta t - t_{ch} + i \cdot \Delta t) + 0.5 \cdot (\Delta t - t_{ch} + i \cdot \Delta t)^2 \cdot a_{new}(x_i, v_i); \\ v_{i+1} &= v_{new} + (\Delta t - t_{ch} + i \cdot \Delta t) \cdot a_{new}(x_i, v_i). \end{aligned}$$

Смена знака произойдет, если:

$$x_{i+1} > l. \quad (3.24)$$

При достижении верхней точки диск испытывает упругий удар, ускорение системы на данном промежутке времени сменится на противоположное. Здесь также справедливы все формулы, кроме (1.25). Она примет вид:

$$t_{ch} = i \cdot \Delta t + \frac{1}{a(x_i, v_i)} \left(-v_i - \sqrt{v_i^2 - 2 \cdot a(x_i, v_i) \cdot (l - x_i)} \right). \quad (3.25)$$

Нам нужна модель, которая будет рассчитывать параметры маятника в моменты времени $i \cdot \Delta t$, где $i = 0, \frac{T}{\Delta t}$.

Создадим функцию, реализующую данную процедуру (Приложение А):

Перевернутый (обратный) маятник

Перевернутый маятник — устройство, представляющее собой маятник, который имеет центр масс выше своей точки опоры, закреплённый на конце жёсткого стержня.

Часто точка опоры закрепляется на тележке, которая может перемещаться по горизонтали. В то время как нормальный маятник устойчиво висит вниз, обратный маятник по своей природе неустойчивый и должен постоянно балансироваться чтобы оставаться в вертикальном положении, с помощью перемещения точки опоры по горизонтали. Простейшим демонстрационным примером может являться балансировка карандаша на конце пальца.

Функция нахождения новых углов и скоростей

Для решения задачи введем следующие условия:

1. отсутствует сила трения;
2. массы маятника и тележки сосредоточены;
3. отсутствует сопротивление среды.

Также введем следующие обозначения, которые впоследствии будем использовать: m — масса груза; M — масса тележки; l — длина жесткого стержня; θ — угол отклонения маятника; x — положение тележки; F — сила, действующая на систему; T — кинетическая энергия системы; V —

потенциальная энергия системы; L — лагранжиан стандартной механики; v_1 — скорость тележки; v_2 — скорость точечного груза массы m ; $g = 9.80665$ — ускорение свободного падения.

Выведем формулу для нахождения новых положения и скорости маятника Максвелла.

Будем использовать такой Лагранжиан системы (2.1):

$$L = T - V \quad (4.1)$$

Запишем уравнение системы (2.2):

$$L = \frac{Mv_1^2}{2} + \frac{Mv_2^2}{2} - mgl \cos \theta \quad (4.2)$$

Выразим v_1 и v_2 через $x(t)$, зная, что скорость есть первая производная положения тележки (2.3):

$$\begin{cases} v_1^2 = \dot{x}_1^2 \\ v_2^2 = \left(\left(\frac{d}{dt}(x - l \sin \theta) \right) + \left(\frac{d}{dt}(l \cos \theta) \right) \right)^2 \end{cases} \quad (4.3)$$

Упростим выражение для v_2 (2.4):

$$v_2^2 = \dot{x}^2 - 2l\dot{x}\dot{\theta} \cos \theta + l^2\dot{\theta}^2 \quad (4.4)$$

Подставим (2.4) в (2.2), тогда получим лагранжиан следующий лагранжиан (2.5):

$$L = \frac{(M + m)\dot{x}^2}{2} - ml\dot{x}\dot{\theta} \cos \theta + \frac{ml^2\dot{\theta}^2}{2} - mgl \cos \theta \quad (4.5)$$

Уравнения движения согласно уравнению Эйлера-Лагранжа выглядят таким образом (2.6, 2.7):

$$\frac{d}{dt} \frac{dL}{d\dot{x}} - \frac{dL}{dx} = F \quad (4.6)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{dL}{d\dot{\theta}} - \frac{dL}{d\theta} = 0 \quad (4.7)$$

Если в уравнения (2.6) и (2.7) подставить (2.5), а затем провести преобразования, можно получить уравнения, описывающие движение перевернутого маятника (2.8, 2.9):

$$(M + m)\ddot{x} - ml\ddot{\theta} \cos \theta + ml\dot{\theta}^2 \sin \theta = F \quad (4.8)$$

$$l\ddot{\theta} - g \sin \theta = x \ddot{\cos \theta} \quad (4.9)$$

Создадим функцию, реализующую данную процедуру (Приложение Б).

Выбор метода глобальной оптимизации

На основании работ [2, 3] было проведено исследование и составлена общая таблица, отображающую эффективность различных методов при их применении к конкретным задачам. Вычислим средний ранг каждого метода. В данном случае были проанализировали результаты использования методов оптимизации в различных задачах, присваивая каждому методу условное место (где первое место означает, что метод лучше всех справился с задачей, а последнее место — хуже всех, прочерк — не справился по тем или иным причинам). Также в таблице приведен средний ранг применения каждого метода к различным задачам (Приложение В). Все рассмотренные методы обладают общими характеристиками: они являются методами глобальной оптимизации (за исключением детерминированных методов) и имеют возможность сойтись к глобальному оптимуму.

Производительность всех алгоритмов, которые ищут экстремум функции качества, одинакова, если усреднить результаты по всем возможным функциям качества. То есть, на всех задачах нельзя выделить самый эффективный метод оптимизации. Практическое значение этой теоремы заключается в том, что не существует универсального решения для всех ситуаций, и успех оптимизационного метода в одной области не гарантирует его успех в другой области. Это означает, что для каждой конкретной области необходимо проводить исследования и выбирать подходящий метод оптимизации. Однако, таблица В.1 показывает, что генетические алгоритмы применяются с большим успехом в широком диапазоне задач. Ввиду этого было принято решение реализовать и применить модифицированный генетический алгоритм для настройки баз правил.

Десктоп-приложение «Fuzzy Controllers»

Для демонстрации проделанной работы было разработано десктоп-приложение с нижеперечисленной функциональностью: выбор маятника; анимация движения; просмотр используемой базы правил; сохранение базы правил в текстовый файл; открытие базы правил из текстового файла; отображение параметров системы (масса, начальные координаты, границы) и возможность их менять; просмотр графиков.

Скриншоты приложения продемонстрированы в приложении Г.

Результаты и обсуждения

Без управляющих воздействий графики зависимости положений изучаемых маятниковых систем от времени будут выглядеть так (Рисунок 5):

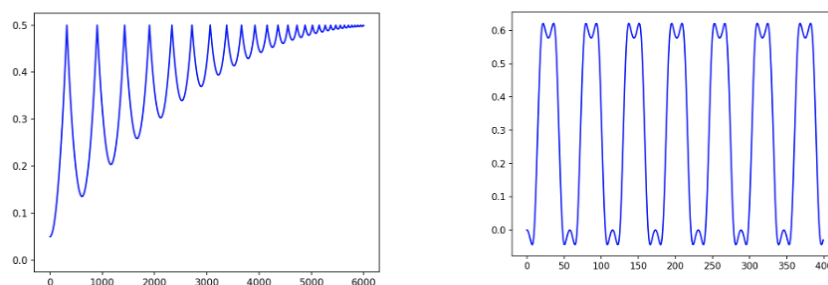


Рисунок 5 — График затухающих колебаний маятника Максвелла и обратного маятника

Нечеткие контроллеры смогли привести системы в необходимые состояния, тем самым маятник Максвелла удерживается в заданных границах, а перевернутый маятник находится в балансе (Рисунок 6).

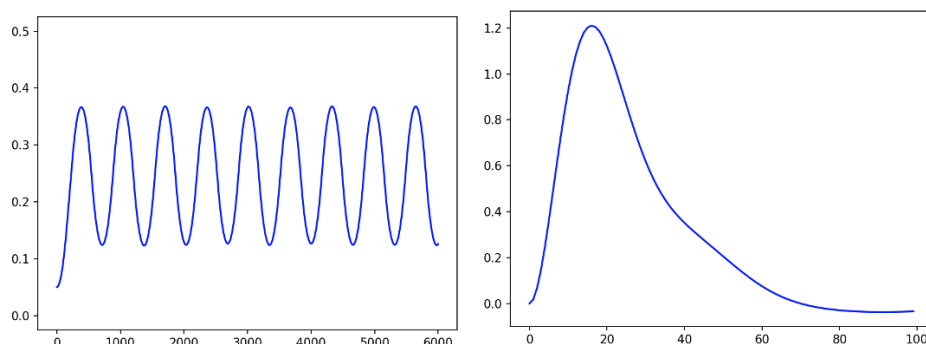


Рисунок 6 — График зависимости положения маятника Максвелла и обратного маятника от времени с работой нечеткого контроллера

Из рисунка 6 можно сказать, что маятник Максвелла держится в отрезке $[1.15; 3.85]$. В свою очередь обратный маятник в результате балансировки остановился в точке «около 0»

Разработанная система была проверена на эффективность. На левом графике рисунка 15 $x_0 = 0.3$, а на правом — $x_0 = 0.4$.

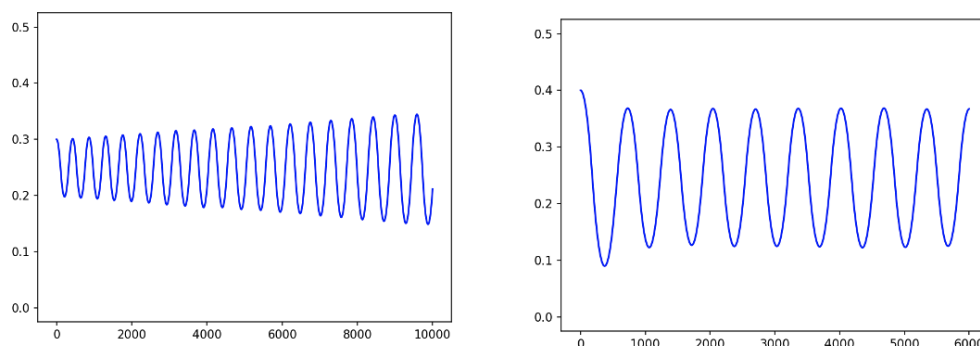


Рисунок 7 — График при работе нечеткого контроллера

Можно заметить, что вне зависимости от начальной координаты нечеткий контроллер смог подавать такие управляющие воздействия на маятник Максвелла, чтобы он находился в заданных границах, что говорит о корректной работе.

С помощью модифицированного генетического алгоритма удалось составить несколько баз правил для управления нестационарными системами. Пример одной из них представлен в Приложении Д.

На данный момент автор занимается созданием физических моделей маятников, чтобы проверить релевантность разработанных нечетких контроллеров на реальных моделях, представлено в Приложении Е.

Выводы

В ходе проделанной работы автору удалось реализовать контроллеры, работающие на нечеткой логике, способные управлять динамическими системами; написать модифицированную версию генетического алгоритма для настройки баз правил; создать веб-приложение, в котором продемонстрированы результаты исследования; проверить разработанные системы на эффективность.

В результате исследования и моделирования поведения маятников было показано, что применение нечетких контроллеров значительно повышает устойчивость систем управления в условиях переменной динамики.

Были получены экспериментальные данные, подтверждающие более быстрое и точное стабилизирование системы при использовании нечетких контроллеров.

Таким образом, исследование демонстрирует перспективность применения нечетких контроллеров для управления сложными динамическими системами в нестационарных условиях.

Список используемой литературы

1. Деменков Н.П. Нечеткое управление в технических системах. – М.: Издательство МГТУ им Н.Э. Баумана, 2005.
2. Keane A.J. A Brief Comparison of Some Evolutionary Optimization Methods /A.J Keane; Eds.: V. Rayward-Smith, I. Osman, C. Reeves, G. D. Smith, J. Wiley // Modern Heuristic Search Methods. – Chichester: John Wiley, 1996 – P. 255–272.
3. Минаков И.А. Сравнительный анализ некоторых методов случайного поиска и оптимизации / И.А. Минаков // Известия. – Самарский научный центр РАН. –1999 – № 2 – С. 286–293.
4. . Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006.
5. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. — СПб.: БХВ Петербург, 2005. — 736 с.: ил.

Приложения

Приложение А

```
def f(x, v, w):
    a = (m * r * r * (g - w)) / (0.5 * (m * R * R + maxis * r * r) + (m + maxis) * r * r)
    if (x == R and v < 0) or (x == l and v > 0):
        v = -v * (1 - k)
    x_new = x + v * dt + 0.5 * dt ** 2 * a
    v_new = v + a * dt
    if x_new > l:
        x_new = l
    if x_new < R:
        x_new = R
    return x_new, v_new
```

Рисунок А — Функция нахождения новых положения и скорости маятника

Приложение Б

```
def inverted_pendulum(th, v):
    a = diff(v)
    rot_a = diff(th)
    f = ((M + m) * a) - (m * l * diff(rot_a)) + (m * l * rot_a ** 2 * sin(th))
    return f
```

Рисунок Б — Функция нахождения управляющей силы

Приложение В

→	Задача	Задача	Фун	Оптим	Фун	Сре
Метод	рюкзак	bump	изация графа	кция royal road	днее	
Имитация отжига	4	4	3	4	3,75	
Генетический алгоритм	1	1	2	1	1,25	
Эволюционное программирование	—	2	—	3	2,25	

Эволюционные стратегии	—	3	—	2	2,25
Метод ветвей и границ	5	—	1	—	3,00

Таблица В.1 — Сравнение алгоритмов глобальной оптимизации

Приложение Г

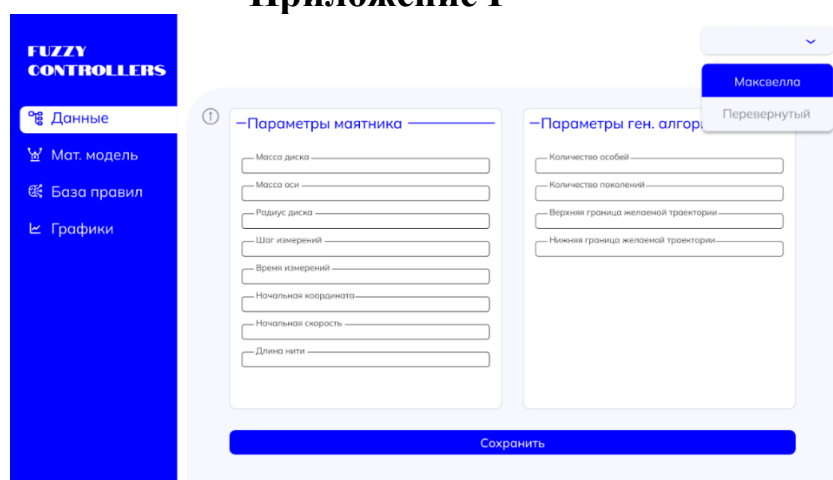


Рисунок Г.1 — Десктоп-приложение. Вкладка «Данные» маятника Максвелла

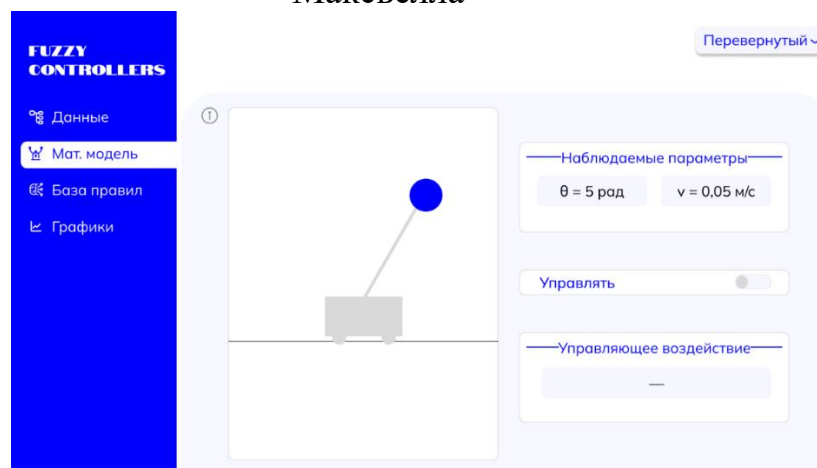


Рисунок Г.2 — Десктоп-приложение. Вкладка «Мат. модель» перевернутого маятника

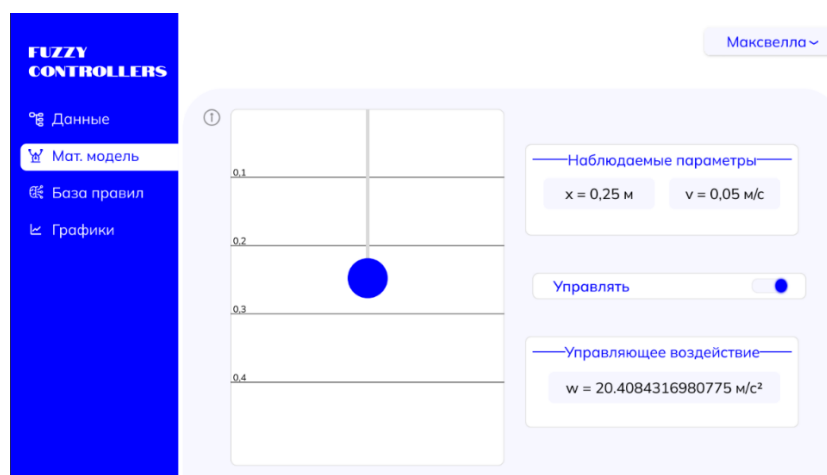


Рисунок Г.3 — Десктоп-приложение. Вкладка «Мат. модель» маятника Максвелла

Приложение Д

Правила/ Числа	a1	b1	c1	d1	a2	b2	c2	d2	a3	b3	c3	d3
Правило 1	0,09	0,14	0,156	0,175	0,28	0,35	0,46	0,62	6	9,55	13,55	16,35
Правило 2	0,27	0,32	0,336	0,355	-0,09	-0,2	0,09	0,25	1 4	17,5	21,55	24,35
Правило 3	0,01	0,06	0,076	0,095	0,28	0,35	0,46	0,62	6	9,55	13,55	16,35
Правило 4	0,48	0,53	0,546	0,565	0,73	0,8	0,91	1,07	2 0	23,5	27,55	30,35
Правило 5	0,27	0,32	0,336	0,355	-0,09	-0,02	0,09	0,25	2 0	23,5	27,55	30,35

Таблица Д — База правил

Приложение Е

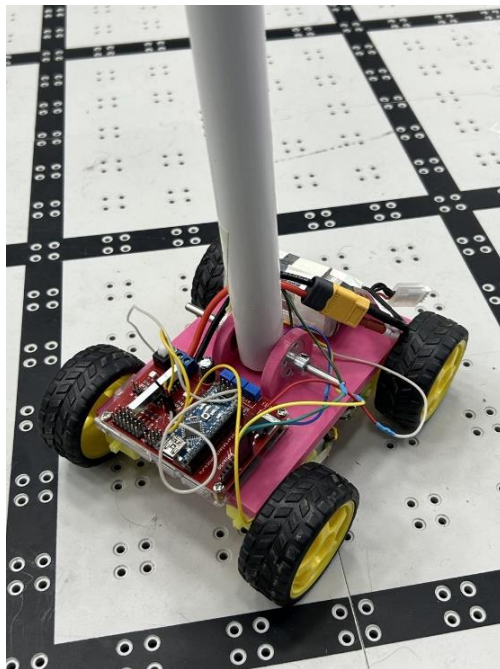


Рисунок Е.1 — Физическая модель перевернутого маятника

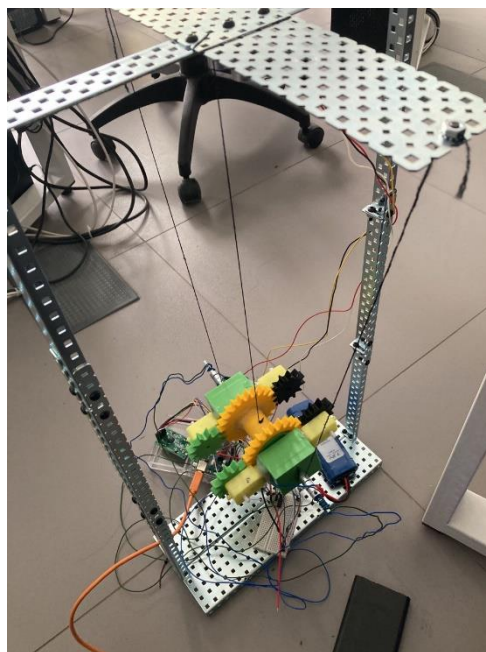


Рисунок Е.2 — Физическая модель маятника Максвелла