

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕЧЕТКОГО ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА

Крюков А.Г., Бондаренко Б.А.

Юго-Западный государственный университет, Курск

Ключевые слова: робот, манипулятор, нечеткая логика, шумы скольжения, дребезг контактов, фильтр Калмана, фильтрация сигнала, математическая модель.

Аннотация. Существующие проблемы позиционирования и плавности хода роботов-манипуляторов имеют ряд решений, которые в свою очередь обладают рядом недостатков. При помощи нечеткой логики была разработана математическая модель, которая должна устранить недостатки аналогов, а также улучшить работу роботов-манипуляторов в целом. Читателям представлено подробное описание математической модели и результаты ее моделирования, которые подтверждают превосходство разработанного решения.

MATHEMATICAL MODEL OF A FUZZY DIGITAL FILTER FOR A ROBOT MANIPULATOR

Kryukov A.G., Bondarenko B.A.

Southwest State University, Kursk

Keywords: robot, manipulator, fuzzy logic, sliding noise, contact bounce, Kalman filter, signal filtering, mathematical model.

Abstract. The existing problems of positioning and smooth running of robotic arms have a number of solutions, which in turn have a number of disadvantages. With the help of fuzzy logic, a mathematical model was developed, which should eliminate the shortcomings of analogues, as well as improve the performance of robotic manipulators in general. Readers are presented with a detailed description of the mathematical model and the results of its simulation, which confirm the superiority of the developed solution.

Изначально, основными целями роботов-манипуляторов были уменьшение стоимости производственных процессов за счет их автоматизации, а также сохранение жизни и здоровья человека при работе в опасных условиях. С развитием технологий развивались и роботы-манипуляторы, которые становились все более и более приемлемыми не только для «грубой» работы, но и для совершения действий, требующих не только точности, а также плавности с аккуратностью, например, медицинских операций.

Возникает несколько сложностей при управлении роботами-манипуляторами – точность позиционирования и плавности работы. Дребезг контактов и шумы скольжения являются одними из причин. Суть обеих проблем разная, однако негативный эффект схожий: управляющий сигнал, поступающий в систему управления, а затем передаваемый на сервоприводы, приходит не в чистом виде, а замешанный с шумом. В результате возникает неточность в формировании управляющего сигнала в системе управления. Это ухудшает точность позиционирования звеньев робот-манипулятора, а также придает движениям дёрганность.

Одним из решений данной проблемы является цифровой фильтр. Цифровой фильтр представляет собой математический алгоритм, который преобразует

входной сигнал в выходной таким образом, чтобы снизить его амплитуду для компенсации дребезга контактов. Может быть использован как на аппаратном, так и на программном уровне.

Одним из самых популярных примеров цифрового фильтра является фильтр Калмана [1] и его “нечеткая” версия – нечеткий фильтр Калмана (основанный на нечеткой логике). Нечеткий фильтр Калмана обладает рядом недостатков – высокая сложность вычислений и медленный процесс расчета.

Для решения описанной ранее проблемы была разработана математическая модель нечеткого цифрового фильтра для робота-манипулятора, которая должна устранить недостатки нечеткого фильтра Калмана.

Математическая модель нечеткой фильтрации представлена в виде кортежа двух переменных:

– $M_{СНВП}$ – математическая модель нахождения суппорта нечеткой выходной переменной;

– $M_{РВН}$ – математическая модель расчета выходного напряжения;

и выглядит следующим образом:

$$M_{НФ} = \langle M_{СНВП}, M_{РВН} \rangle. \quad (1)$$

Теперь мы подробно взглянем на каждую из переменных и начнем с $M_{СНВП}$. $M_{СНВП}$ – это тоже кортеж в формуле:

$$M_{СНВП} = \langle \alpha_{мин}; \alpha_{макс}; \alpha_{ср}; \alpha_i \rangle, \quad (2)$$

где $\alpha_{мин}$ – минимальное значение коэффициента α , $\alpha_{макс}$ – максимальное значение коэффициента α , $\alpha_{ср}$ – среднее значение между термами на суппорте выходной переменной, α_i – метки выходной функции принадлежности.

В модель МСНВП входят следующие операции:

1. Расчет коэффициента выборки N по формуле

$$N = \frac{T_{ПП}}{T}, \quad (3)$$

где $T_{ПП}$ – длительность переходного процесса, T – длительность следования импульса.

2. Расчет коэффициентов точности цифрового фильтра, минимального и максимального значений по формулам:

$$N_{\tau_{мин}} = \ln \left(\frac{1}{5\% F_{вх}} \right), \quad (4)$$

$$N_{\tau_{макс}} = \ln \left(\frac{1}{0,01\% F_{вх}} \right), \quad (5)$$

где $F_{вх}$ – максимальное значение входного сигнала.

3. Расчет минимального и максимального значений коэффициента регулирования α по формулам:

$$\alpha_{мин} = e^{(-N_{\tau_{макс}} / N)}, \quad (6)$$

$$\alpha_{макс} = e^{(-N_{\tau_{мин}} / N)}. \quad (6)$$

4. Расчет среднего значения коэффициента регулирования α по формуле

$$\Delta \alpha_{ср} = \frac{\alpha_{макс} - \alpha_{мин}}{4}. \quad (8)$$

5. Далее будет идти расчет 5-ти меток выходной функции принадлежности по формуле

$$\alpha_i = n \cdot \Delta\alpha_{cp} + \alpha_{мин}, \tag{9}$$

где $n = i - 1$.

МРВН выглядит следующим образом в формуле 10:

$$M_{РВН} = \langle t_i; \alpha; \beta; U_\phi \rangle, \tag{10}$$

где t_i – разница между предыдущим значением напряжения и нынешним, α и β – коэффициенты регулирования, U_ϕ – выходное напряжение для сервоприводов.

В модель $M_{РВН}$ входят следующие операции:

1. Построение функций принадлежности входной переменной t и расчет ее степеней истинности по формулам (рис. 1):

$$t_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } t < a, \\ \frac{c-t}{c-b}, & \text{если } b \leq t \leq c, \\ 0, & \text{если } t > c; \end{cases} \tag{11}$$

$$t_2, t_3, t_4 = \begin{cases} 0, & \text{если } t < a, \\ \frac{t-a}{b-a}, & \text{если } a \leq t < b, \\ \frac{c-t}{c-b}, & \text{если } b \leq t \leq c; \end{cases} \tag{12}$$

$$t_5 = \begin{cases} 0, & \text{если } t < a, \\ \frac{t-a}{b-a}, & \text{если } a \leq t < b, \\ 1, & \text{если } t > c; \end{cases} \tag{13}$$

где a, b, c – метки треугольной функции принадлежности.

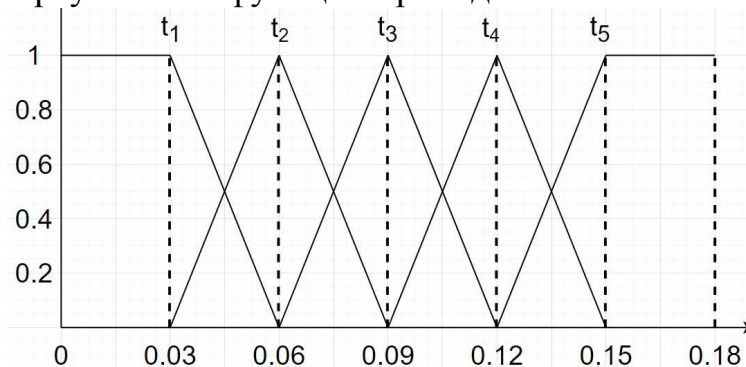


Рис. 1. График функции принадлежности для нечеткого фильтра

2. Определение базы правил нечеткого фильтра [2], число правил в которой определяется по формуле n^m ($5^1 = 5$), где n – количество термов, m – число входных переменных:

R1: Если « $t = t_1$ » То « $\alpha = \alpha_5$ »;

R2: Если « $t = t_2$ » То « $\alpha = \alpha_4$ »;

R3: Если « $t = t_3$ » То « $\alpha = \alpha_3$ »;

R4: Если « $t = t_4$ » То « $\alpha = \alpha_2$ »;

R5: Если « $t = t_5$ » То « $\alpha = \alpha_1$ »;

3. Дефазификация быстродействующим методом отношения площадей для нахождения значения коэффициента α по формуле [3]

$$\alpha = \left[\frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n\omega_i} \cdot (\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) \right] + \alpha_{\min}, \quad (14)$$

где n – количество термов; i – номер терма ($i=1 \dots n$), ω_i – весовой коэффициент.

4. Расчет коэффициента β по формуле

$$\beta = 1 - \alpha. \quad (15)$$

5. Вычисление выходного напряжения, которое будет передано на сервоприводы по формуле

$$U_{ВН} = \alpha \cdot U_{ТЕК} + \beta * U_{ПРЕД}, \quad (16)$$

где $U_{ТЕК}$ и $U_{ПРЕД}$ – текущее и предыдущее значения напряжения.

6. Перевод полученного значения напряжения в угол поворота сервопривода робота-манипулятора по формуле:

$$\varphi = \varphi_{\min} + \frac{(U_{ВН} - S_{t_{\min}}) \cdot (\varphi_{\max} - \varphi_{\min})}{S_{t_{\max}} - S_{t_{\min}}}, \quad (17)$$

где $S_{t_{\min}}$, $S_{t_{\max}}$ – минимальное и максимальное значения сигнала, φ_{\max} и φ_{\min} – минимальный и максимальный углы поворота звеньев робота-манипулятора.

В результате моделирования данной математической модели, были собраны данные и посчитан RMSE, который составил 0.0172 в сравнении 0.0273 с фильтром Калмана. Также было проведено моделирование в Simulink, сравнивались те же сигналы что и в RMSE (рис. 2), где синий – исходный сигнал, оранжевый – фильтр Калмана, жёлтый – разработанная математическая модель.

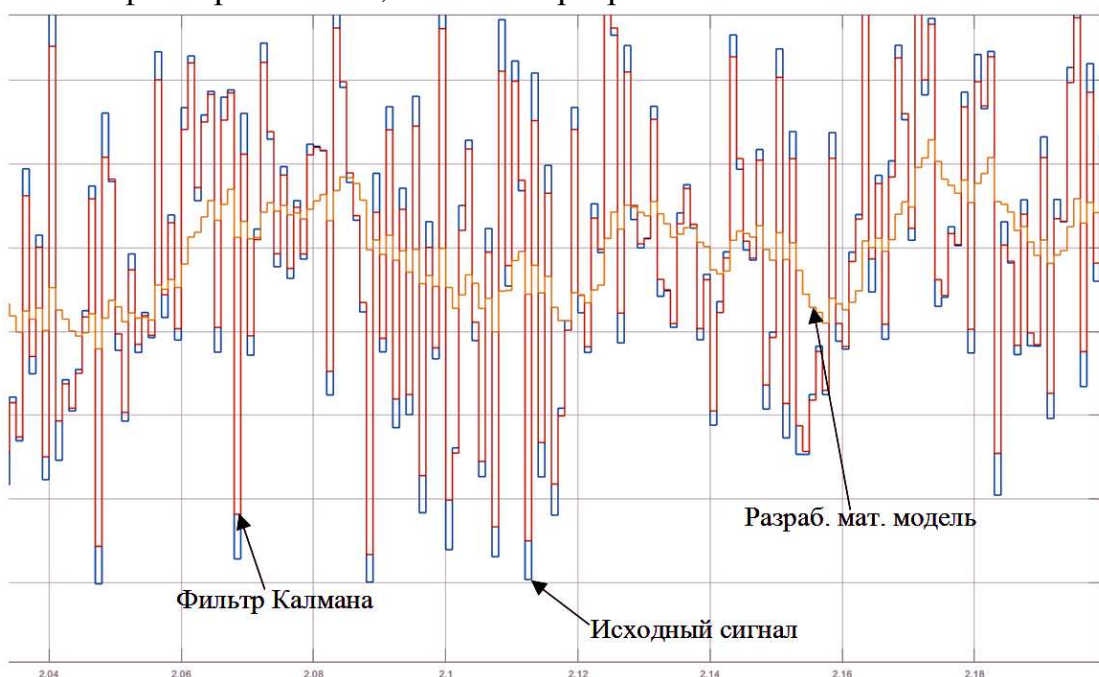


Рис. 2. Результат моделирования фильтра Калмана и устройства нечеткой фильтрации с синусоидальным входным сигналом (увеличение)

На графике явно видно, что сигнал, обработанный устройством нечеткой фильтрации, стабильнее и его кривая более гладкая. Также это подтверждают результаты RMSE. Это говорит нам о том, что качество сигнала улучшилось, следовательно, влияние негативного эффекта шумов скольжения или дребезга контактов уменьшено.

Список литературы

1. Степанов О.А. Фильтр Калмана: история и современность (к 80-летию Рудольфа Калмана) // Гироскопия и навигация. 2011. Т. 2. № 2. С. 99-110.
2. Лунева М.Ю. Программный код для управления роботом-манипулятором // Новые информационные технологии и системы: сборнике научных статей XIII Международной научно-технической конференции. – Пенза, 2016 – С. 118-120.
3. Бобырь М.В. Обучение нейро-нечетких систем: монография. – М.: ИНФРА-М, 2017 – 240с.

Сведения об авторах:

Крюков Александр Георгиевич – аспирант;

Бондаренко Богдан Андреевич – аспирант.