

Математическое, алгоритмическое и программное обеспечение задачи расчета управляющих воздействий на основе нечеткой логики при моделировании перемещения груза в тренажере портального крана

Р.А. Файзрахманов¹, А.А. Тютюных¹, И.С. Полевщиков^{1,2}

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет

²Московский государственный университет пищевых производств

Аннотация: Статья посвящена развитию моделей и алгоритмов расчета управляющих (советующих) воздействий при обучении операторов технологических процессов (на примере перегрузочных процессов и, в частности, портальных кранов) на компьютерных тренажерных комплексах (КТК). Предложен комплекс моделей и алгоритмов, на основе которых производится расчет управляющих воздействий относительно дискретных элементов управления крана и обеспечивается возможность перемещения груза в заданную позицию с минимизацией колебаний в конечной точке. Данные модели и алгоритмы используют изменяемые параметры технологического процесса, описываемые лингвистическими переменными, и настраиваемые характеристики моделей крана и двигателей, что позволяет производить расчет управляющих воздействий в зависимости от вида крана, специфики технологического процесса, используемой методики обучения операторов и других значимых факторов. Применение советующей системы на основе разработанных моделей и алгоритмов способствует улучшению процесса обучения операторов перегрузочных кранов на КТК и, как следствие, снижению вероятности возникновения аварийных ситуаций, уменьшению временных затрат и энергозатрат.

Ключевые слова: компьютерный тренажер, перегрузочные процессы, портальный кран, советующая система, управляющие воздействия, математическое моделирование, регулятор нечеткой логики.

1. Введение

Перегрузочные краны широко используются практически во всех областях промышленности. Высокая точность позиционирования грузов важна при работе с кранами, так как она уменьшает время процессов разгрузки/погрузки, энергозатраты и риск возникновения аварий.

Обучение на компьютерных тренажерных комплексах (КТК) способствует повышению степени профессиональной подготовки операторов различных технологических установок и, как следствие, уменьшению временных затрат, энергозатрат, а также уменьшению вероятности возникновения аварий [1, 2].

Процесс настройки и выполнения упражнений на разрабатываемом КТК

операторов перегрузочной машины визуально представлен на рис. 1 диаграммой Use Case UML. Согласно данной диаграмме, в процессе выполнения упражнений формируются для обучаемого целенаправленные советующие (управляющие) воздействия. Управляющие воздействия выводятся на экран оператора, представлены в формате «управляющий элемент – положение» и пересчитываются через определенные промежутки времени.



Рис. 1. – Процесс настройки и выполнения упражнений на КТК

Применение советующей системы в процессе обучения на КТК операторов перегрузочных кранов способствует повышению эффективности формирования профессиональных компетенций, главным образом, сенсомоторных навыков, требуемых для эффективного и безопасного осуществления производственного процесса.

Поэтому разработка моделей, алгоритмов и программных модулей советующей системы, как компонента КТК, улучшающей процесс обучения операторов посредством формирования управляющих воздействий, направленных на предотвращение раскачивания груза при его перемещении, является актуальной задачей. Данные модели и алгоритмы в недостаточной степени описаны для советующей системы оператора в существующих научных трудах и являются предметом исследования в данной статье.

2. Разработка математических моделей советующей системы компьютерного тренажерного комплекса

Решению задач управления перегрузочным процессом и задач гашения колебаний груза посвящены работы, в которых применяются следующие подходы: применение шейпинг-фильтра для подавления колебаний груза для мостового и башенного кранов [3]; применение пропорционально-дифференциального регулятора и пропорционально-дифференциального нечеткого регулятора для контроля угла отклонения груза при его перемещении для козлового крана [4]; применение аппарата нечеткой логики в системах управления перемещением груза для различных подъемно-транспортных механизмов [5-7]. Также необходимо отметить релевантные работы по применению нечеткой логики в технических системах [1, 8].

При всех своих преимуществах данные подходы имеют общий недостаток: в рассматриваемых работах не было представлено алгоритма, который рассчитывает управляющие сигналы для дискретных элементов управления. Поэтому целесообразна разработка алгоритма советующей системы КТК, производящего расчет управляющих воздействий относительно дискретных элементов управления крана.

Расчет управляющих (советующих) воздействий будет продемонстрирован для случая перемещения груза посредством изменения вылета стрелы для порталного крана. Для остальных случаев расчет производится аналогичным способом. Моделирование динамики перегрузочного процесса для порталного крана в компьютерном тренажере представлено в работах [2, 9]. Управляющие воздействия должны пересчитываться через определенные промежутки времени и обеспечивать перемещение груза в заданную позицию. Колебания груза в конечной точке должны быть минимизированы.

На вход разрабатываемой модели должна подаваться

последовательность начальных и конечных позиций груза (заранее подготовленных, учитывающих возможные препятствия на пути). Результатом работы системы будет являться последовательность управляющих воздействий, которые необходимо совершить оператору в рамках перегрузочного процесса для того, чтобы переместить груз из начальной точки в конечную. При построении моделей и расчете управляющих воздействий трос будет считаться невесомым, нерастяжимым, а его длина – неизменной во время перемещения груза.

На рис. 2 в двухмерном виде представлена подвижная часть крана. Данная часть представляет собой двухмассовую систему маятникового типа, состоящую из стрелы, которая представлена в виде точки подвеса, и груза, подвешенного на тросе.

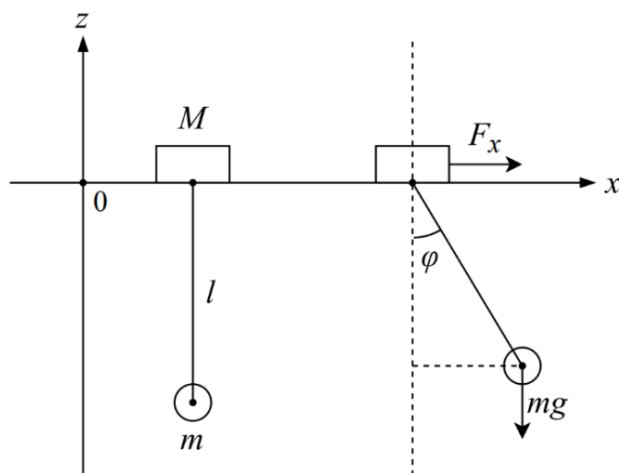


Рис. 2. – Структурная схема изменения вылета стрелы

На рис. 2 обозначены: M – массы стрелы, кг; m – масса груза, кг; l – длина троса, м; φ – угол отклонения груза от вертикали, рад; x – расстояние от центра системы координат до точки подвеса груза, м; F_x – сила, отвечающая за изменение вылета стрелы, Н; g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Для построения математической модели объекта управления использовались уравнения Эйлера–Лагранжа второго рода. Полученная

система двух нелинейных уравнений второго порядка имеет следующий вид:

$$\begin{cases} (M + m)\ddot{x} + ml\ddot{\varphi} \cos \varphi - ml\dot{\varphi}^2 \sin \varphi = F_x - D_x \dot{x} \\ ml^2\ddot{\varphi} + ml\ddot{x} \cos \varphi + mgl \sin \varphi = -D_\varphi \dot{\varphi} \end{cases}, \quad (1)$$

где D_x и D_φ – коэффициенты трения.

Данная система уравнений полностью описывает движение рассматриваемого объекта. Для дальнейшей работы линеаризуем получившиеся уравнения для диапазона малых значений угла отклонения φ (максимальные отклонения груза от вертикали не превышают $10...12^\circ$ [10]). Учитываются следующие упрощения: $\cos \varphi \approx 1$; $\sin \varphi \approx \varphi$; $\dot{\varphi}^2 \approx 0$.

После линеаризации и преобразовании системы относительно угла φ и смещения x получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \left(-\frac{D_x}{M}\right) \dot{x} + \frac{mg}{M} \varphi + \frac{D_\varphi}{Ml} \dot{\varphi} + \frac{1}{M} F_x; \\ \ddot{\varphi} = \frac{D_x}{Ml} \dot{x} + \left(-\frac{(M+m)g}{Ml}\right) \varphi + \left(-\frac{(M+m)D_\varphi}{Mml^2}\right) \dot{\varphi} + \left(-\frac{1}{Ml}\right) F_x. \end{cases} \quad (2)$$

В дальнейшей работе использовалось представление этой системы уравнений в виде модели пространства состояний.

Особенностью двигателей перегрузочных кранов является постепенный разгон после подачи управляющего сигнала на него. Это проявляется из-за большой массы крановых механизмов и переносимого груза.

В работе математическая модель двигателя крана представлена в виде инерционного звена второго порядка. Коэффициенты звена установлены на основе изучения основных характеристик портального крана «Аист» и должны обеспечить плавный разгон и торможение, а также время разгона двигателя до рабочей скорости не должно превышать 5-6 с. [11].

Разработанная модель регулятора нечеткой логики обеспечивает формирование на выходе управляющего сигнала u' (сигнал пульта управления крана). Использовались следующие характеристики элементов управления крана: рычаг изменения вылета стрелы крана имеет 2 скорости

(всего 5 состояний, включая состояние покоя).

Структура советующей системы схематично изображена на рис. 3.

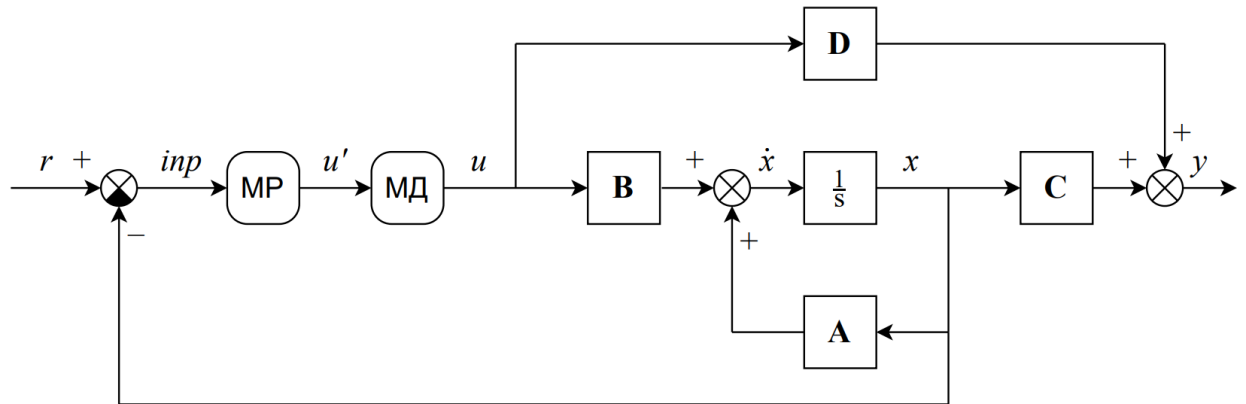


Рис. 3. – Структурная схема рассматриваемой советующей системы

На данной схеме **A**, **B**, **C**, **D** – матрицы модели пространства состояний; r – вектор целевого состояния; inp – вход модели регулятора нечеткой логики, который представляет собой отклонение текущего состояния системы от целевого; **MP** – модель регулятора нечеткой логики; u' – управляющий сигнал (сигнал пульта управления крана); **MD** – модель двигателя; u – вектор управления (сила, отвечающая за изменение вылета стрелы); x – вектор состояния; y – вектор выхода.

3. Разработка алгоритма формирования управляющих воздействий с применением нечеткой логики

Предложенная модель регулятора работает на основе алгоритма Мамдани. Модель нечеткого регулятора имеет 3 входных сигнала: Δx , φ , $\dot{\varphi}$. Данные входные сигналы соответствуют следующим лингвистическим переменным: «отклонение точки подвеса груза», «угол отклонения груза» и «угловая скорость отклонения». Нечеткий вывод – управляющий сигнал u' , лингвистическая переменная – «положение рычага управления».

Рассмотрим лингвистическую переменную «угол отклонения груза», соответствующую входу нечеткого контроллера φ . «Угол отклонения груза»

задается следующими термами: NB – «отрицательный большой», NM – «отрицательный средний», NS – «отрицательный малый», Z – «нулевой», PS – «положительный малый», PM – «положительный средний», PB – «положительный большой».

Изменяемые параметры лингвистической переменной: значения малого угла отклонения груза ($s\varphi$), среднего угла отклонения груза ($m\varphi$), большого угла отклонения груза ($b\varphi$). Полагая, что угол отклонения груза при нормальной работе редко превышает $10...12^\circ$ [10], значение малого угла отклонения груза по модулю принимается равным 2° , среднего – 4° , большого – 6° . Перед выполнением упражнений на КТК производится настройка параметров лингвистической переменной, что позволяет добиться необходимого эффекта от генерируемых управляющих воздействий (в зависимости от методики обучения операторов, имитируемого в КТК технологического процесса и других факторов). Например, уменьшение значений параметров данной переменной уменьшит допустимый диапазон угла отклонения груза и наоборот.

Функция принадлежности для «угла отклонения» представлена на рис. 4.

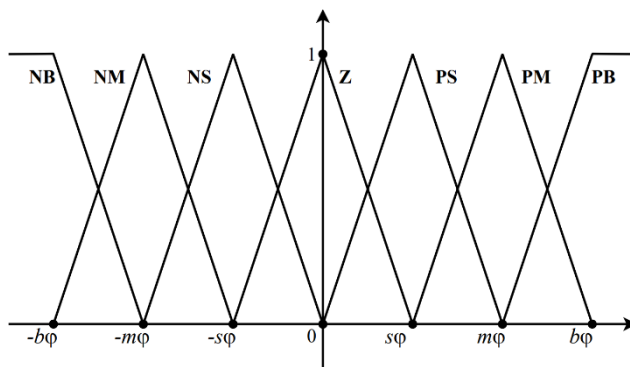


Рис. 4. – Функция принадлежности для «угла отклонения»

Аналогично задаются термы для лингвистической переменной «отклонение точки подвеса груза». Значение малого отклонения точки подвеса груза по модулю принимается равным $0,5$ м, среднего – 1 м, большого – $1,5$ м. Лингвистическая переменная «угловая скорость»

отклонения» задается тремя термами NB – «отрицательная большая», Z – «нулевая», PB – «положительная большая». Значение большой угловой скорости отклонения по модулю принимается равным 0,06 рад/с. Параметры данных лингвистических переменных также участвуют в настройке упражнения. Изменение этих параметров влияет на вид их функций принадлежности и, как следствие, на результат генерации управляющих воздействий. Например, изменение параметров данных переменных позволит сделать больший упор на точность позиционирования груза и на плавность его перемещения.

Лингвистическая переменная «положение рычага управления» соответствует выходу нечеткого контроллера u' . «Положение рычага управления» задается следующими термами: N2 – «вторая скорость назад», N1 – «первая скорость назад», Z – «нулевая скорость», P1 – «первая скорость вперед», P2 – «вторая скорость вперед».

Функция принадлежности для «положения рычага управления» представлена на рис. 5.

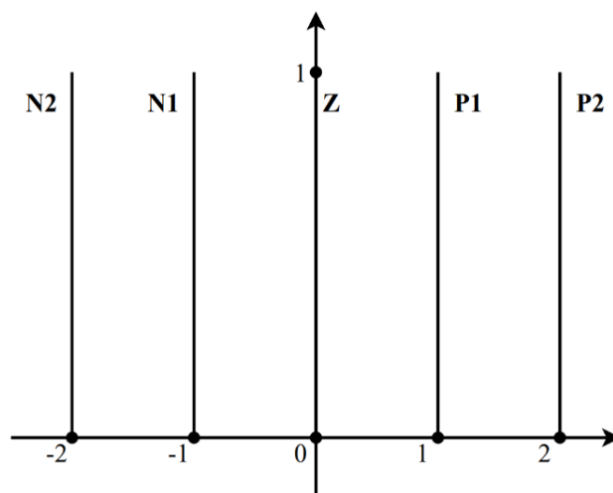


Рис. 5. – Функция принадлежности для «положения рычага управления»

Дефаззификация выходной переменной в предложенном регуляторе производится методом высоты [12].

Для нечеткого контроллера используется набор из 147 правил вывода,

сформированных при участии крановщиков, следующего вида: ЕСЛИ «отклонение точки подвеса груза» *есть* «положительно большое» И «угол отклонения груза» *есть* «отрицательный средний» И «угловая скорость отклонения» *есть* «нулевая» ТО «положение рычага управления» *есть* «вторая скорость вперед».

Разработанный алгоритм формирования управляющих воздействий представлен на рис. 6 в виде диаграммы деятельности UML.

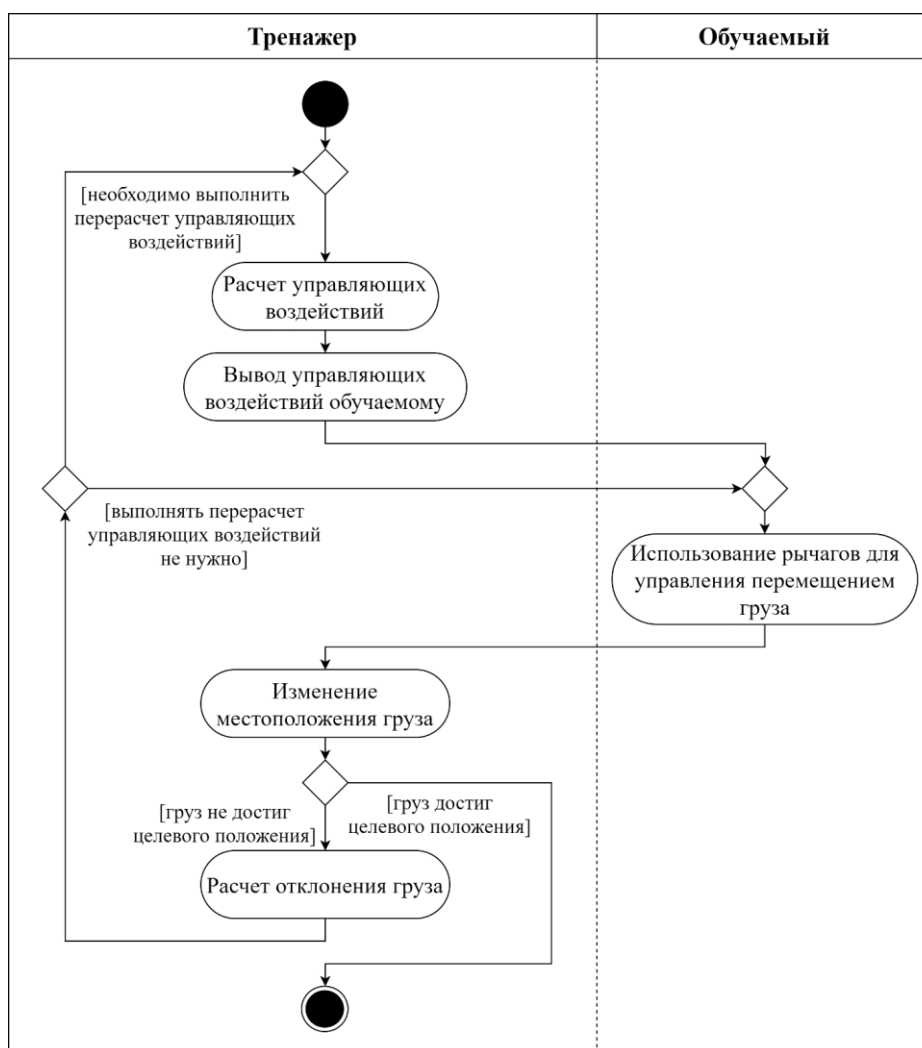


Рис. 6. – Алгоритм формирования управляющих воздействий

Макет интерфейса для обучаемого при выполнении упражнения представлен на рис. 7. Рассчитанные советующей системой управляющие воздействия выводятся обучаемому в формате «управляющий элемент – положение», оставляя при этом достаточный угол обзора. На макете

рассчитанные управляющие воздействия показаны зеленым цветом.

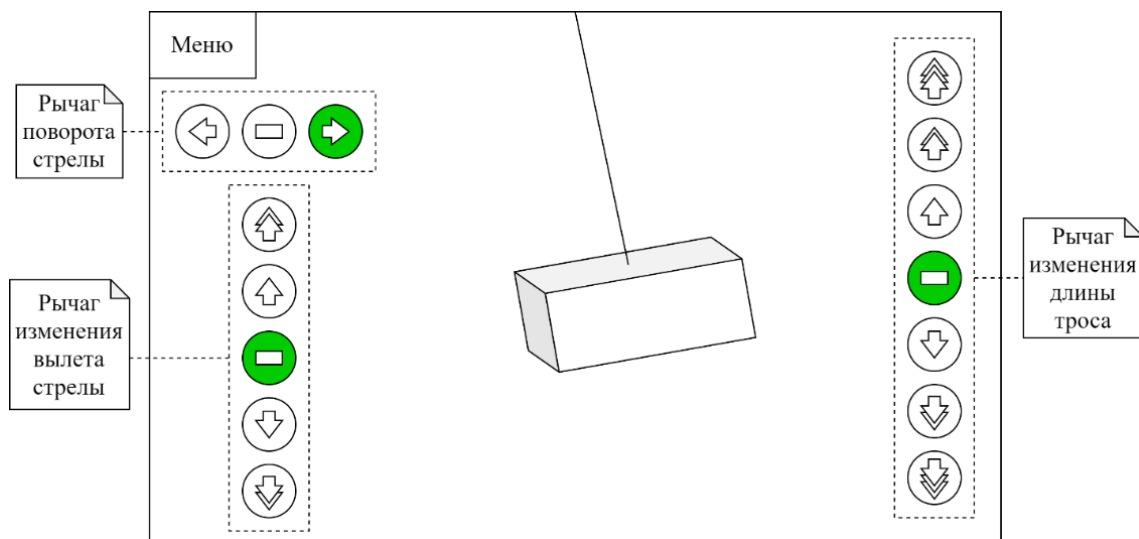


Рис. 7. – Макет интерфейса для выполнения упражнения

При реализации разработанных моделей на языке программирования Python использовались характеристики портального перегрузочного электрического крана «Аист».

На рис. 8 и рис. 9 представлены результаты решения задачи расчета управляющих воздействий для перемещения груза, подвешенного на тросе длиной 20 м, на расстояние 30 м. Параметры моделирования задачи: $m = 5000$ кг (масса груза); $l = 20$ м (длина троса); $x_{нач} = 10$ м (начальное положение точки подвеса груза); $x_{кон} = 40$ м (конечное положение точки подвеса груза).

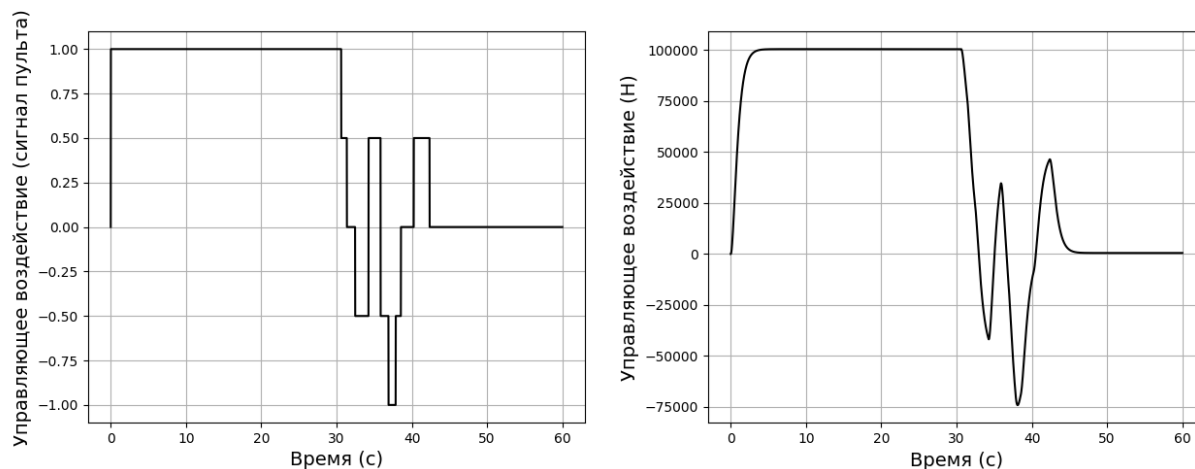


Рис. 8. – Управляющие сигналы

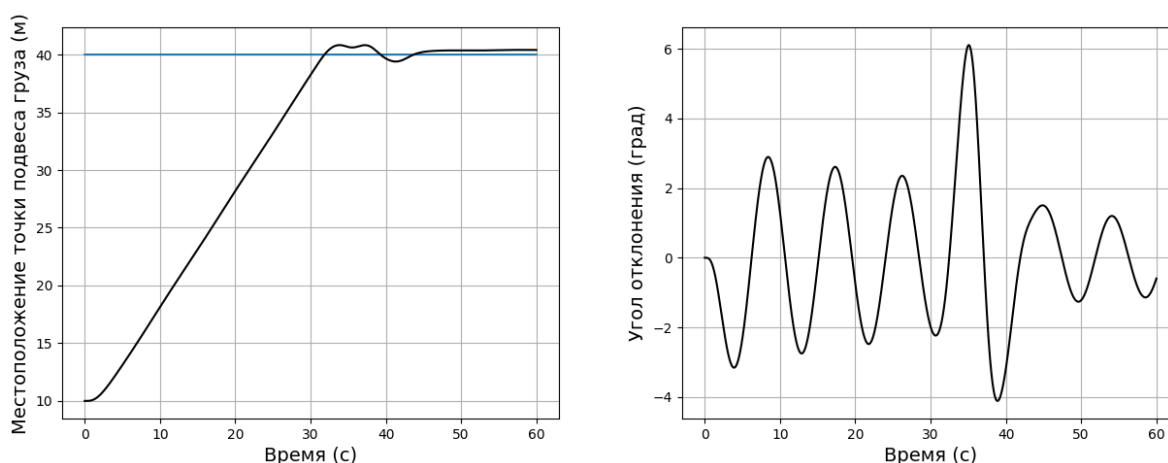


Рис. 9. – Местоположение точки подвеса груза и угол отклонения груза

На рис. 8 слева показана рассчитанная последовательность управляющих воздействий u' , справа представлена реакция инерционного звена второго порядка (модель двигателя). На рис. 9 представлены графики местоположения точки подвеса груза и угла отклонения груза.

Всего проведено около 10000 экспериментов, в которых исследовалось влияние массы перемещаемого груза, длины троса и расстояния, на которое перемещается груз, на степень подавления колебаний груза и адекватность получаемых управляющих воздействий. В ходе каждого эксперимента вычислялись максимальное абсолютное значение угла отклонения груза за все время перегрузочного процесса, максимальное абсолютное значение угла отклонения груза вблизи конечной точки и максимальное абсолютное значение отклонения местоположения точки подвеса груза вблизи конечной точки.

После проведения всех экспериментов были рассчитаны средние значения этих показателей. Среднее максимальное абсолютное значение угла отклонения груза = $4,78^\circ$. Среднее максимальное абсолютное значение угла отклонения груза вблизи конечной точки = $2,67^\circ$. Среднее максимальное абсолютное значение отклонения местоположения точки подвеса груза вблизи конечной точки = 0,25 м.

Результаты экспериментов показывают, что разработанные математические модели перемещения груза и регулятора нечеткой логики генерируют последовательность управляющих воздействий, которая обеспечивает перемещение груза в заданную позицию с минимизацией колебаний в конечной точке.

Заключение

1) Разработаны модели и алгоритмы советующей системы КТК для обучения операторов перегрузочных процессов наиболее эффективному и безопасному выполнению технологических операций. На основе данных моделей и алгоритмов производится расчет управляющих воздействий относительно дискретных элементов управления крана и обеспечивается возможность перемещения груза в заданную позицию с минимизацией колебаний в конечной точке.

Данные модели и алгоритмы используют изменяемые параметры технологического процесса, описываемые лингвистическими переменными, и настраиваемые характеристики моделей крана и двигателей. Изменение параметров лингвистических переменных позволяет менять вид их функций принадлежности и, как следствие, влиять на результат генерации управляющих воздействий. Изменение характеристик моделей крана и двигателей позволит рассчитывать управляющие воздействия для различных видов кранов.

2) Применение советующей системы на основе разработанных моделей и алгоритмов способствует улучшению процесса обучения операторов перегрузочных кранов на КТК и, как следствие, снижению вероятности возникновения аварийных ситуаций, уменьшению временных затрат и энергозатрат.

3) Эксперименты показали, что советующая система на основе

предложенных моделей и алгоритмов с использованием регулятора на основе нечеткой логики обеспечивает эффективное «гашение» колебаний груза при перемещении его из одной точки в другую. Эксперименты проводились для характеристик идеального оператора. Дальнейшие эксперименты планируются проводить с учетом характеристик реального оператора.

Литература

1. Файзрахманов Р.А., Полевщиков И.С. Автоматизированное управление формированием профессиональных навыков оператора роботизированной системы с использованием нечеткой логики // Инженерный вестник Дона. 2015. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3283.

2. Fayzrakhmanov R.A., Polevshchikov I.S., Khabibulin A.F., Shklieriev F.I., Fayzrakhmanov R.R. ANYCRANE: Towards a better Port Crane Simulator for Training Operators // Proc. of the 15th International Industrial Simulation Conference (ISC'2017), Warsaw (Poland), 31 May – 1 June 2017. pp. 85-87.

3. Blackburn D., Singhose W., Kitchen J., Patrangenaru V., Lawrence J., Tatsuaki K., Ayako T. Command shaping for nonlinear crane dynamics // Journal of Vibration and Control. 2010. V. 16. № 4. pp. 477-501.

4. Ahmad M. A., Nasir A. N. K., Najib M. S., Ishak H. Anti-sway techniques in feedback control loop of a gantry crane system A comparative assessment of PD and PD-type fuzzy logic controller // 2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Xi'an. 2009. pp. 2483-2487.

5. Sharkawy A. B., Moustafa K. A. F., El-Awady H., Vitko A., Babinec A., Dekan M. Control of overhead crane based on Lyapunov approach to fuzzy controller synthesis // 2014 23rd International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD). Smolenice. 2014. pp. 1-6.

6. Шведова О.А., Шмарловский А.С., Марков А.В., Тарасевич Т.В.

Алгоритмы подавления колебаний грузов подъемно-транспортных механизмов с использованием нечеткой логики функционирования // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2014. № 1 (79). С. 65-71.

7. Diantong Liu, Jianqiang Yi, Dongbin Zhao, Wei Wang. Adaptive sliding mode fuzzy control for a two-dimensional overhead crane // Mechatronics. 2005. V. 15. № 5. pp. 505-522.

8. Павлов С.В., Абдуллин А.Х., Давлетбакова З.Л. Обработка пространственной информации о границах санитарных зон полигонов отходов на основе методов нечеткой логики // Инженерный вестник Дона. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1887.

9. Долгова Е.В., Файзрахманов Р.А., Курушин Д.С., Кротов Л.Н., Федоров А.Б., Хабибулин А.Ф., Шилов В.С., Ромин Е.А., Бакунов Р.Р., Бикметов Р.Р., Полевщиков И.С. Моделирование динамики перемещения груза в компьютерном тренажере погрузочно-разгрузочного устройства // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2012. № 2. С. 57-64.

10. Лобов Н.А. Динамика грузоподъемных кранов // Москва: Машиностроение. 1987. 160 с.

11. Брауде В.Д., Гохберг М.М., Звягин И.Ф. Справочник по кранам: В 2 т. Т. 1. Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчетов кранов, их приводов и металлических конструкций / Под общ. ред. М. М. Гохберга // Москва: Машиностроение. 1988. 536 с.

12. Леденева Т.М., Черменев Д.А. Влияние методов дефазсификации на нечеткую классификацию // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 8. С. 24-27.

References

1. Fayzrakhmanov R.A., Polevshchikov I.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2015, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3283.
 2. Fayzrakhmanov R.A., Polevshchikov I.S., Khabibulin A.F., Shklyiev F.I., Fayzrakhmanov R.R. ANYCRANE: Towards a better Port Crane Simulator for Training Operators. Proc. of the 15th International Industrial Simulation Conference (ISC'2017), Warsaw (Poland), 31 May – 1 June 2017. pp. 85-87.
 3. Blackburn D., Singhose W., Kitchen J., Patrangenaru V., Lawrence J., Tatsuaki K., Ayako T. Journal of Vibration and Control. 2010. V. 16. № 4. pp. 477-501.
 4. Ahmad M. A., Nasir A. N. K., Najib M. S., Ishak H. 2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Xi'an. 2009. pp. 2483-2487.
 5. Sharkawy A. B., Moustafa K. A. F., El-Awady H., Vitko A., Babinec A., Dekan M. Control of overhead crane based on Lyapunov approach to fuzzy controller synthesis. 2014. 23rd International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD). Smolenice. 2014. pp. 1-6.
 6. Shvedova O.A., Shmarlovskiy A.S., Markov A.V., Tarasevich T.V. Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki. 2014. № 1 (79). pp. 65-71.
 7. Diantong Liu, Jianqiang Yi, Dongbin Zhao, Wei Wang. Mechatronics. 2005. V. 15. № 5. pp. 505-522.
 8. Pavlov S.V., Abdullin A.Kh., Davletbakova Z.L. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1887.
 9. Dolgova E.V., Fayzrakhmanov R.A., Kurushin D.S., Krotov L.N., Fedorov A.B., Khabibulin A.F., Shilov V.S., Romin E.A., Bakunov R.R., Bikmetov R.R., Polevshchikov I.S. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-matematika. 2012. № 2. pp. 57-64.
-



10. Lobov N.A. Dinamika gruzopod"emnykh kranov [Crane dynamics]. Moskva: Mashinostroenie. 1987. 160 p.

11. Braude V.D., Gohberg M.M., Zvyagin I.F. Pod obshch. red. M. M. Gohberga. Spravochnik po kranam: V 2 t. T. 1. Kharakteristiki materialov i nagruzok. Osnovy raschetov kranov, ikh privodov i metallicheskih konstruktsiy [Handbook on cranes: In 2 volumes. Vol. 1. Characteristics of materials and loads. Fundamentals of calculations for cranes, their drives and metal structures]. Moskva: Mashinostroenie. 1988. 536 p.

12. Ledeneva T.M., Chermenev D.A. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2012. V. 8. № 8. pp. 24-27.