

УДК 62-83+004.8

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МОСТОВОГО КРАНА
С КОНТРОЛЛЕРОМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ
НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ**

**Канд. техн. наук, доц. ПЕТРЕНКО Ю. Н.,
асп. АЛАВИ С. Э., инж. АЛЕКСАНДРОВСКИЙ С. В.**

Белорусский национальный технический университет

Автоматизированный электропривод (АЭП) является неотъемлемой составляющей автоматизации, часто определяя производительность, безопасность обслуживания и эффективность технологического оборудования. В настоящее время в мировой практике наряду с совершенствованием традиционных классических систем управления АЭП существует устойчивая тенденция разработки систем, основанных на приемах искусственного (компьютерного) интеллекта [1]. Исследования в области экспертных си-

стем (ЭС) привлекает все большее внимание в научной и инженерной среде. В особенности это относится к нечеткой логике (fuzzy logic), нейронным сетям (neural networks) и вероятностным методам, таким как генетические алгоритмы (genetic algorithms). Со времени возникновения понятия «искусственный интеллект», который можно назвать с таким же правом «компьютерный интеллект» (КИ), продолжается бесконечная дискуссия относительно его принадлежности к интеллекту вообще. АЭП как технологическая отрасль претерпел существенные изменения и достиг в определенном смысле совершенства. Важным этапом интеграции систем управления электроприводом явилось создание ведущими электротехническими фирмами программируемых микроконтроллеров и промышленных компьютеров. Свидетельством широкого распространения подобных систем является появившийся недавно термин «компьютеризированный электропривод».

При работе крана актуальной задачей является устранение колебаний при перемещении груза [2], что может быть обеспечено на основе контроллера нечеткой логики (КНЛ) [3, 4] для управления электроприводами моста и тележки. В условиях реальной эксплуатации перемещение груза часто осуществляется при одновременном управлении электроприводами моста и тележки. В связи с этим исследование управления перемещением груза по одной координате [5] необходимо обобщить на трехмерное (3D) пространство.

Для получения математической 3D-модели крана воспользуемся рис. 1, где X и Y направления движения тележки и моста соответственно; φ – угол между осью Y' и проекцией каната с грузом на плоскость $X'-Y'$; θ – угол между вертикалью и канатом; $x(t)$, $y(t) \in R$ – положение тележки моста в координатах $X-Y$ соответственно; F_x , F_y – управляющие усилия, приложенные к тележке и мосту соответственно.

Для дальнейшего анализа примем ряд допущений, общепринятых в практике [2]: 1) массой каната пренебрегаем; 2) доступна информация об угле отклонения груза и его производной и скорости моста и тележки; 3) заданы величины (являются известными) массы груза и длина каната; 4) пренебрегаем трениями грузозахватывающего устройства и вращения груза относительно оси каната; 5) угол массы груза ограничен соотношением $-\pi < \theta < \pi$.

При принятых допущениях динамика 3D мостового крана описывается соотношением

$$M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = u, \quad (1)$$

где $q(t) \in R^4$ определяется как $q = [x \ y \ \theta \ \varphi]^T$, $M(q) \in R^{4 \times 4}$, $v(q, \dot{q}) \in R^{4 \times 4}$, и $G(q) \in R^4$ есть инерция, $u = [F_x \ F_y \ 0 \ 0]^T$, и составляющие массы, определяемые как

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & 0 & m_{13} & m_{14} \\ 0 & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & 0 \\ m_{41} & m_{42} & 0 & m_{44} \end{pmatrix};$$

$$V = \begin{pmatrix} 0 & 0 & V_{13} & V_{14} \\ 0 & 0 & V_{23} & V_{24} \\ 0 & 0 & V_{33} & V_{34} \\ 0 & 0 & V_{14} & V_{44} \end{pmatrix};$$

$$G = [0 \quad 0 \quad m_g L \sin \theta \quad 0]^T;$$

$$m_{11} = m_p + m_g + m_t; \quad m_{13} = m_p L \cos \theta \sin \varphi; \quad m_{14} = m_p L \sin \theta \cos \varphi;$$

$$m_{22} = m_p + m_t; \quad m_{23} = m_p L \cos \theta \cos \varphi; \quad m_{24} = -m_p L \sin \theta \sin \varphi;$$

$$m_{31} = m_p L \cos \theta \sin \varphi; \quad m_{32} = m_p L \cos \theta \cos \varphi; \quad m_{33} = m_p L^2 + I;$$

$$m_{41} = m_p L \sin \theta \cos \varphi; \quad m_{42} = -m_p L \sin \theta \sin \varphi; \quad m_{44} = m_p L^2 \sin^2 \theta + I;$$

$$V_{m13} = -m_p L \sin \theta \cos \varphi \dot{\theta} + m_p L \cos \theta \cos \varphi \dot{\varphi};$$

$$V_{m14} = m_p L \cos \theta \cos \varphi \dot{\theta} - m_p L \sin \theta \sin \varphi \dot{\varphi};$$

$$V_{m23} = -m_p L \sin \theta \cos \varphi \dot{\theta} - m_p L \cos \theta \sin \varphi \dot{\varphi};$$

$$V_{m24} = -m_p L \cos \theta \sin \varphi \dot{\theta} - m_p L \sin \theta \cos \varphi \dot{\varphi};$$

$$V_{m34} = -m_p L^2 \sin \theta \cos \varphi \dot{\theta}; \quad V_{m43} = m_p L^2 \sin \theta \cos \varphi \dot{\theta}; \quad V_{m44} = m_p L^2 \sin \theta \sin \varphi \dot{\theta};$$

$$\ddot{q} = M^{-1}(q) \{u - V_m(q, \dot{q})\dot{q} - G(q)\}. \quad (2)$$

Для построения имитационной модели (ИМ) следует признать целесообразным максимальное использование стандартных блоков MatLAB-SIMULINK, хорошо зарекомендовавших себя при моделировании различных систем электропривода.

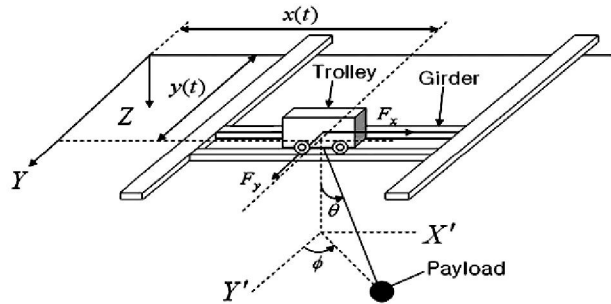


Рис. 1. Трехмерная 3D-модель крана

Такое представление позволяет выделить отдельные функциональные блоки, которые могут быть исследованы самостоятельно или/и в комбинации с другими без использования всей имитационной модели. Это особенно необходимо на начальной стадии отладки ИМ. Для исследований разработаны: имитационная модель крана, имитационная 3D-модель крана, имитационная модель тележки мостового крана с КНЛ (рис. 2). В такой ИМ можно проследить прохождение сигнала по отдельным субблокам системы.

В схеме рис. 2 использован стандартный блок «асинхронный двигатель (АД) с векторным управлением», имеющийся в пакете SIMULINK, предусматривающем каскадное управление. Применение отлаженных блоков управления позволяет избежать эффекта наложения ошибок, при котором трудно выяснить причину неадекватного поведения системы. Систематизирована процедура проектирования КНЛ, которая приведена в виде последовательности отдельных этапов с определением параметров контроллера.

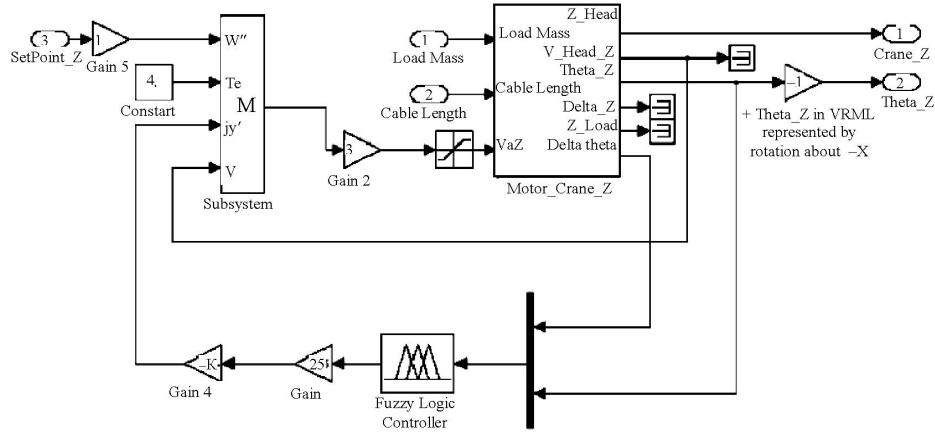


Рис. 2. Имитационная модель тележки мостового крана с КНЛ

Для определения диапазона изменения названных переменных моделируем разомкнутую систему, в результате чего определено $\theta: [-0,03; 0,03]$, $\frac{d\theta}{dt}: [-0,06; 0,06]$. Диапазон изменения выходного сигнала в относительных единицах принимаем $[-1; 1]$. Далее при моделировании и сравнении работы контроллеров используется треугольная форма функций принадлежности [2]. Это связано с тем, что серийно выпускаемые микропроцессоры 68HC912D60 и 68HC12/912 семейства Motorola и TMS320C14 (Texas Instruments) поддерживают лишь треугольную форму функций принадлежности [6]. Получены и обобщены результаты моделирования системы с различным числом функций принадлежности M ($M = 3; 5; 7$). В качестве примера приведены результаты ИМ на рис. 3–5. Для фазификации применен MIN-метод, для дефазификации – MAX-метод.

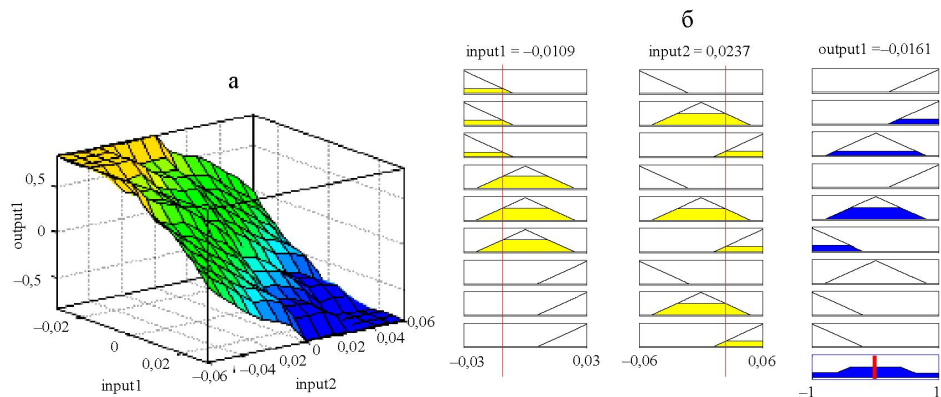


Рис. 3. Поверхности нечеткого вывода для разработанной нечеткой модели при $M = 3$ (а), вид программы просмотра правил нечеткого вывода для $M = 3$ (б)

Обсуждение результатов моделирования. Основной целью имитационного моделирования является проверка и подтверждение работоспособности предлагаемых решений по КНЛ.

Основной задачей моделирования является исследование динамики движения крана (моста и тележки одновременно) и соответственно груза (далее – динамика) при перемещении. Отклонение груза (м) от вертикали по оси движения тележки (X по горизонтали) и по оси движения моста (Y по вертикали) при различных способах управления приведено на рис. 4 и 5. Включение привода тележки происходит через 4 с после старта моста. Характер движения, приведенный на рис. 4, хорошо согласуется с исследуемым в известных источниках. Анализ рис. 4 показывает существенное снижение амплитуды раскачивания груза при управлении с применением КНЛ (рис. 4а, б, в, г) по сравнению с ручным управлением (рис. 4а). Кроме того, можно проследить влияние количества функций принадлежности M на раскачивание груза; при $M = 3$ раскачивание все еще существенно (рис. 4б) и снижается при $M = 3$ (рис. 4в).

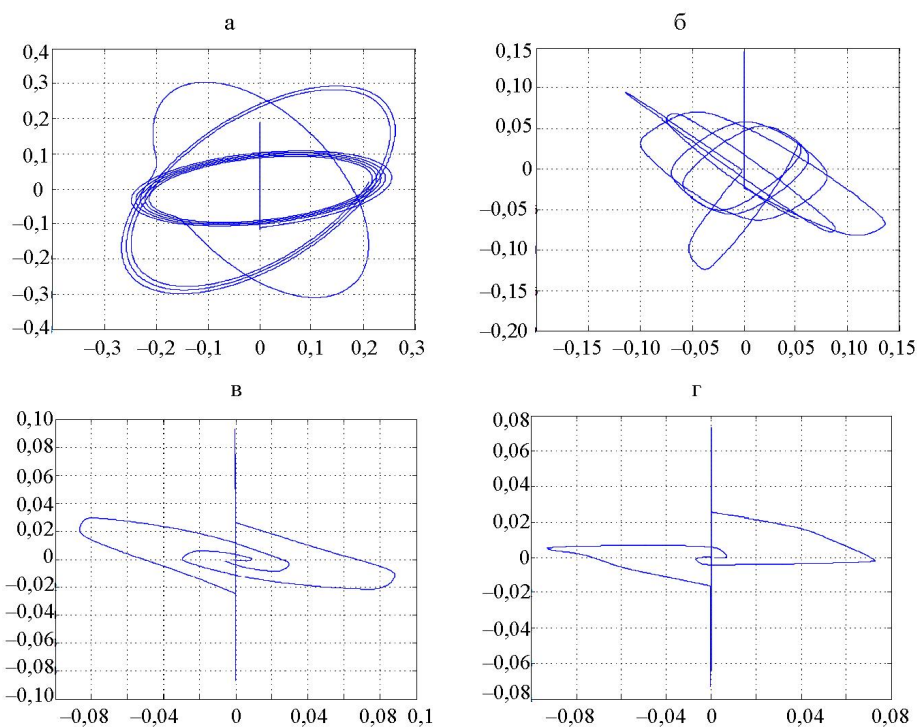


Рис. 4. Колебания груза в плоскости XY , м, канат = 10 м, груз = 10 т; а – ручное управление; б – КНЛ, $M = 3$; в – $M = 5$; г – $M = 7$

В то же время амплитуда раскачивания при $M = 5$ и 7 отличается в пользу КНЛ с $M = 7$. Дальнейшее увеличение количества функций принадлежности M показывает незначительное влияние на колебания груза, но значительно усложняет КНЛ (при $M = 7$ количество элементов базы правил $H = 7 \cdot 7 = 49$; при $M = 9$ получим $H = 9 \cdot 9 = 81$). Это позволяет сделать вывод о целесообразности применения КНЛ с $M = 7$.

Поведение груза при перемещении в трехмерном пространстве приведено на рис. 5, на котором хорошо просматривается раскачивание груза во время его перемещения (рис. 5а). Гашение колебаний благодаря использованию КНЛ хорошо просматривается на последующих рис. 5б, в, г. При этом остается справедливым сказанное относительно количества функций принадлежности.

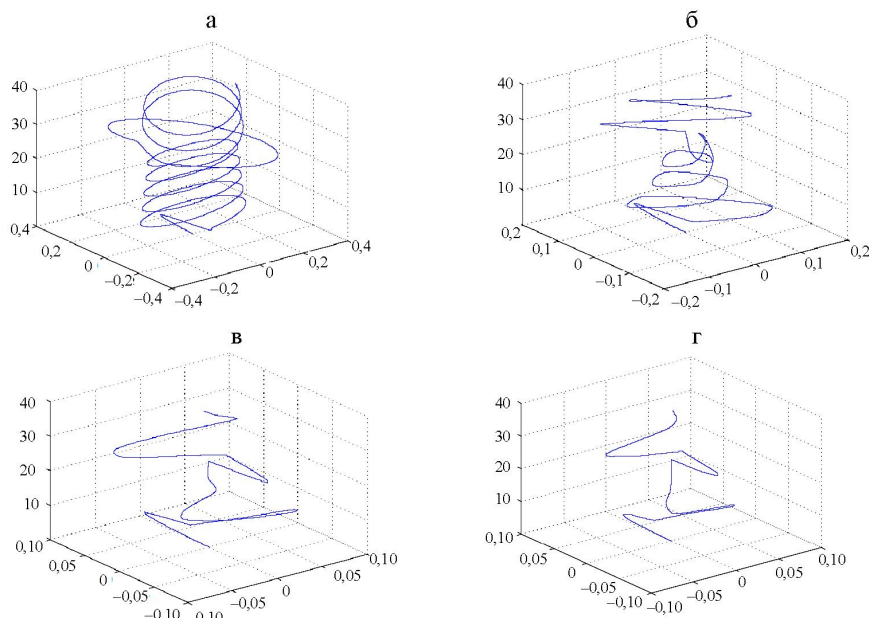


Рис. 5. Колебания груза в трехмерном пространстве: X – отклонение груза «позиция моста – позиция груза», м; Y – отклонение груза «позиция тележки – позиция груза», м; Z – время, с. Старт моста при нулевом времени и тележки при $Z = 4$; а – ручное управление; б – КНЛ; $M = 3$; в – $M = 5$; г – $M = 7$

ВЫВОДЫ

1. Разработанная имитационная модель позволяет исследовать динамические свойства системы «контроллер – электропривод – тележка – груз».
2. Результаты моделирования подтвердили эффективность синтеза (оптимизации) параметров контроллера нечеткой логики путем применения теории грубого набора и генетических алгоритмов [3–5, 7].
3. Перемещение груза сопровождается минимальным числом колебаний при использовании КНЛ в качестве управляющего устройства, что значительно облегчает работу оператора, а также повышает эффективность управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Интеллектуальные вопросы управления приводами / Ю. А. Борцов [и др.] // АЭП-2007: труды V междунар. (XVI Всероссийской) конф. по автоматизированному электроприводу 18–21 сент. 2007 г. – СПб., 2007. – С. 44–48.
2. Ключев, В. И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: учеб. для вузов / В. И. Ключев, В. М. Терехов. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.
3. Petrenko, Y. N. Fuzzy logic and genetic algorithm technique for non-linear system of overhead crane / Y. N. Petrenko, S. E. Alavi // Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering (SIBIRCON), 11–15 July 2010 // IEEE Region 8 International Conference. – P. 848–851.
4. Алави, С. Э. Контроллер нечеткой логики на основе генетических алгоритмов для электропривода тележки подъемного крана / С. Э. Алави, Ю. Н. Петренко // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2009. – № 2. – С. 17–22.
5. Алави, С. Э. Имитационная модель электропривода с контроллером нечеткой логики / С. Э. Алави, С. В. Александровский // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: сб. материалов междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 28–29 окт. 2009 г. – Минск, 2009. – С. 230–232.
6. Опейко, О. Ф. Микропроцессорные средства в автоматизированном электроприводе: учеб. пособие / О. Ф. Опейко, Ю. Н. Петренко. – Минск: Амалфея, 2008. – 340 с.
7. Алави, С. Э. Проектирование контроллера нечеткой логики для автоматизированного электропривода / С. Э. Алави, Ю. Н. Петренко // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: сб. материалов междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 28–29 окт. 2009 г. – Минск, 2009. – С. 227–229.

Поступила 28.03.2011