

Д.Н. Аксаментов¹, С.П. Круглов¹, С.В. Ковыришин¹

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ МОСТОВЫМ КРАНОМ

Аннотация. Настоящая работа посвящена сравнительному анализу известных способов управления маятниковыми колебаниями груза мостового крана. Проведен анализ по трём способам управления: алгоритм с ПИД-регулированием, алгоритм с нечёткой логикой управления, алгоритм адаптивного идентификационного управления, построенный по «упрощенным» условиям адаптируемости. В качестве объекта управления используется модель существующего макета мостового крана. В исследованиях рассматривается задача по перемещению крана на заданное расстояние и демпфирование колебаний, вызванных передвижением крана и воздействием внешних неконтролируемых возмущений. Устранение маятниковых колебаний происходит за счёт изменения направления и скорости передвижения тележки. Сравнительный анализ проводился при разных переносимых грузах и внешних воздействиях.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, управление с нечёткой логикой, адаптивная система управления, алгоритм параметрической идентификации, эталонная модель.

D.N. Aksamentov¹, S.P. Kruglov¹, S.V. Kovyreshin¹

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

Abstract. The present work is devoted to comparative analysis of known methods of control of pendulum oscillations of bridge crane cargo. Analysis was carried out on three control methods: algorithm with PID control, algorithm with odd control logic, algorithm of adaptive identification control, built according to "simplified" adaptability conditions. The management object is the model of an existing bridge crane layout. The studies consider the task of moving the crane by a given distance and damping vibrations caused by movement of the crane and the impact of external uncontrolled disturbances. Pendulum oscillations are eliminated due to change of direction and speed of trolley movement. Comparative analysis was carried out under different carried loads and external influences.

Keywords: PID regulator, control with odd logic, adaptive control system, parametric identification algorithm, reference model.

Введение. В работах [1-8] описаны существующие способы устранения маятниковых колебаний груза мостового крана, а также парирования внешних неконтролируемых возмущений на кран и переносимый груз. Однако исследование предложенных методов проводилось на кранах с различными параметрами и условиями. Поэтому для анализа эффективности способов управления были проведены исследования разных методов управления при одинаковых условиях. В качестве сравниваемых методов управления были выбраны наиболее используемые для подобных задач: ПИД-регулятор, нечеткое управление, а также метод адаптивного управления, построенного по схеме «идентификатор + эталон» с использованием «упрощенных» условий адаптируемости [8, 9]. Исследования проводились в программной среде Matlab Simulink на основе модели объекта управления с параметрами ранее разработанного макета мостового крана [10].

Математическое описание рассматриваемого объекта с перемещением груза по одной оси достаточно хорошо изучено в [1]. Схема движения тележки крана и перемещение груза представлена на рис.1.

На рисунке выведены следующие обозначения: тележка массой m_1 с линейным перемещением по оси x ; на тележку действует управляющая сила $f_{упр}$ и сила трения $f_{тр}$; груз массой m_2 и центральным моментом инерции J ; на груз действует горизонтальная сила воздействия ветра $f_{вет}$; груз связан с тележкой с помощью гибкой подвески длиной l ; φ – угол отклонения троса от вертикальной оси.

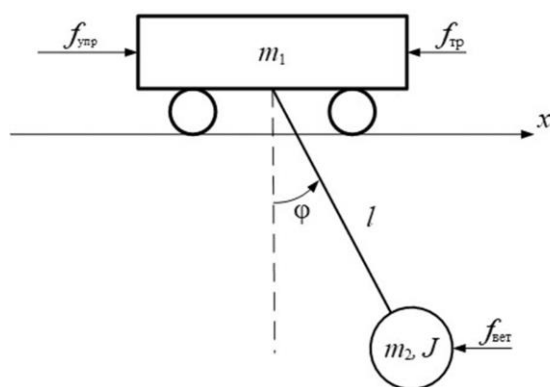


Рис. 1. Схема перемещения груза по одной оси

Уравнения поступательного и вращательного движения системы «тележка-маятник» описываются без учета массы троса и трения углового движения, в силу их малости; также не учитываются начальные значения переменных по положению и скорости [1]:

$$\begin{cases} (m_1 + m_2)\ddot{x} + (m_2 l \cos \varphi)\ddot{\varphi} = f_{\text{упр}} + m_2 l \dot{\varphi}^2 \sin \varphi - k_x \dot{x} - f_{\text{тр}}; \\ (m_2 l \cos \varphi)\ddot{x} + (m_2 l^2 + J)\ddot{\varphi} = -m_2 g l \sin \varphi - l f_{\text{вет}} \cos \varphi, \end{cases} \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения; указанные производные переменных взяты по времени; k_x – коэффициент вязкого трения поступательного перемещения тележки; указанные выше параметры, в общем случае являются переменными и в общем случае заранее неизвестными (за исключением массы тележки).

Управление с ПИД-регулятором. Одним из распространённых способов управления мостовым краном является использование ПИД-регулятора [2]. Обычно используются два регулятора: первый для точного позиционирования тележки, второй для гашения колебаний. Построенная модель управления мостовым краном с указанными ПИД-регуляторами в программной среде Matlab Simulink изображена на рис.2.

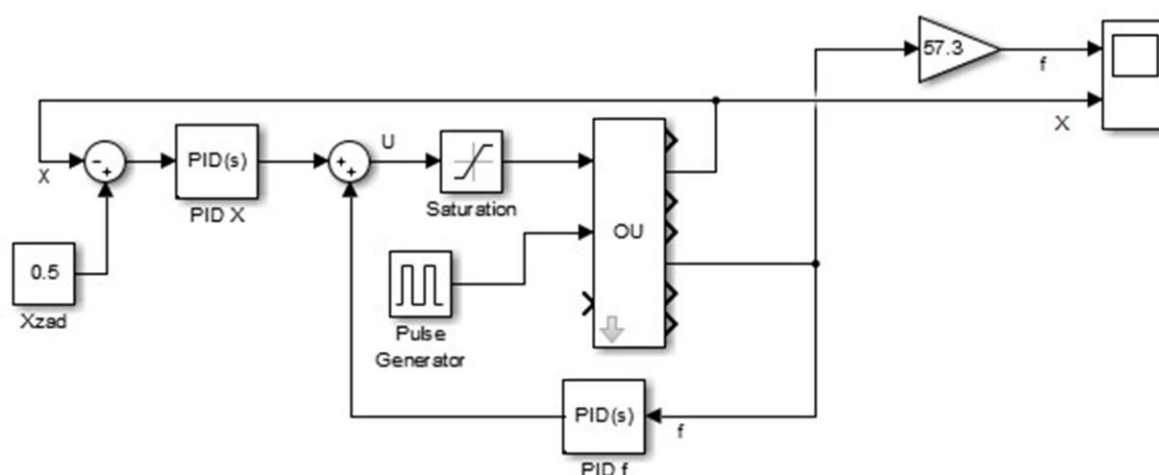


Рис. 2. Модель управления с ПИД-регуляторами: PID X – ПИД-регулятор по перемещению тележки; PID f – ПИД-регулятор для гашения колебаний груза; Pulse Generator – блок, задающий внешнее возмущение; Saturation – блок ограничения управляющего воздействия (от -10 Н до 10 Н); OU – подсистема, моделирующая динамику объекта управления; Xzad – заданное перемещение тележки; U – управляющая сила; X и f – перемещение тележки и угол отклонения груза от вертикали соответственно

Моделирование здесь и далее проводилось с временным шагом 0.01с; также использовался блок «Saturation» с указанными ограничениями (соответствует ограничениям моделируемого объекта управления); блок «Pulse Generator» для моделирования ветрового возмущения.

Коэффициенты ПИД-регуляторов были найдены путём автоматической настройки, для обеспечения наилучшего качества переходного процесса при параметрах объекта управления: $m_1 = 2$ кг; $m_2 = 2$ кг; $l = 0,5$ м; $J = 0,008$ кг*м², $k_x = 0.3$ Нс/м. Найденные коэффициенты ПИД-регулятора линейного перемещения тележки: $k_p = 3,76$ (пропорциональный коэффициент), $k_i = 0,04$ (интегральный коэффициент), $k_d = 4,06$ (дифференциальный коэффициент), $N = 30$ (частота среза, рад/с фильтра в дифференцирующей ветви ПИД-регулятора, соответствует максимальной собственной частоты объекта). Найденные коэффициенты ПИД-регулятора гашения колебаний маятника: $k_p = 17,86$, $k_i = 12,69$, $k_d = 3,67$, $N = 30$. Графики переходных процессов для указанных условий представлены на рис.3

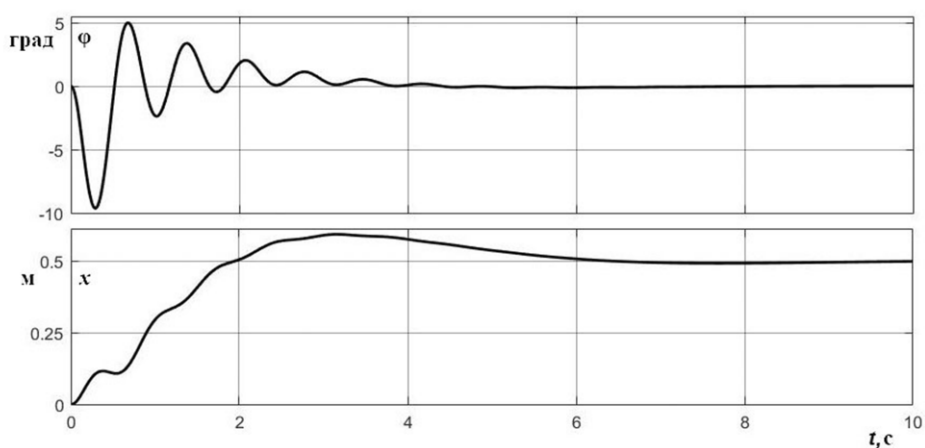


Рис. 3. Графики переходных процессов при управлении с ПИД-регуляторами

Управление с нечёткой логикой. Второй способ управления краном, с нечёткой логикой управления, также широко применяется в данной области [3-5]. Алгоритм нечёткой логики является продуктом искусственного интеллекта, интенсивно развивающейся в последнее время областью исследований. Главным свойством нечёткой логики является использование лингвистических переменных. Эти переменные представляются в виде набора, который называется нечётким множеством [6].

Для решения поставленной задачи, аналогично, как и в первом примере, используется два блока управления: блок, отвечающий за позиционирование тележки (Fuzzy Logic Controller for X), и блок, отвечающий за демпфирование колебаний подвешенного груза (Fuzzy Logic Controller for f). Построенная модель с нечёткой логикой управления изображена на рис.4. Обозначения на рисунке, кроме указанных, соответствуют рис.2.

При построении нечёткой системы управления по необходимым физическим переменным были определены соответствующие лингвистические переменные. Для блока позиционирования – это переменные пройденного пути и скорости тележки, для блока демпфирования – угол отклонения маятника и скорость передвижения тележки. Для каждой переменной были взяты пять термов: очень отрицательно (--), отрицательно (-), ноль (0), положительно (+), очень положительно (++). Использовались функции принадлежности стандартного типа – треугольной формы и кусочно-линейной (рис. 5).

Далее сформулировали базу нечётких правил, по 25 штук для каждого блока (таблица 1 и таблица 2).

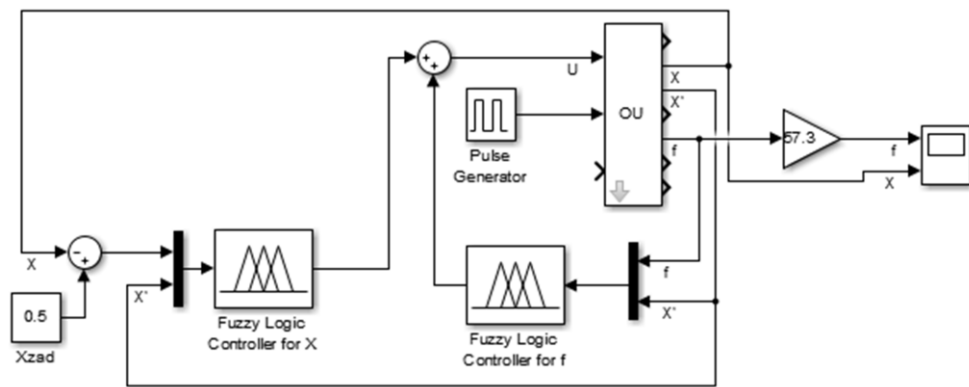


Рис. 4. Модель с нечёткой логикой управления

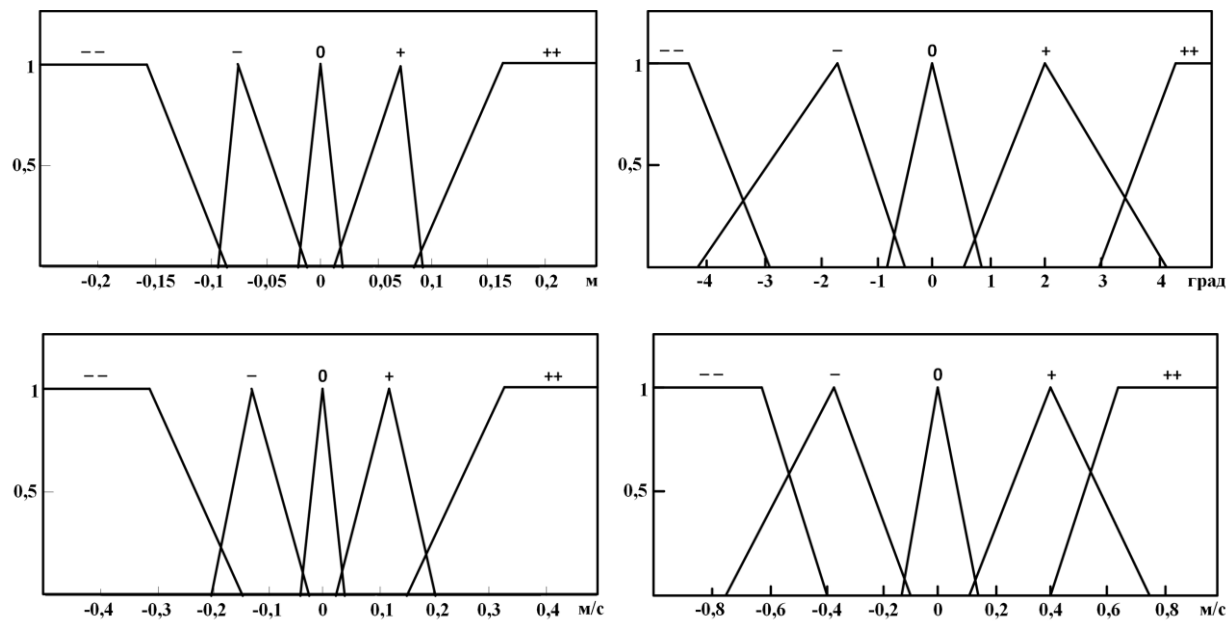


Рис. 5. Функция принадлежности блока управления положением тележки и блока управления углом отклонения соответственно

Таблица 1. База нечётких правил для управление положением тележки

$X' \backslash X$	--	-	0	+	++
--	-	--	--	--	--
-	+	0	-	--	--
0	+	+	0	-	--
+	++	++	+	0	-
++	++	++	++	++	+

Таблица 2. База нечётких правил для управление углом отклонения

$\varphi' \backslash \varphi$	--	-	0	+	++
--	++	++	++	+	0
-	++	++	+	0	-
0	+	+	0	-	-
+	+	0	-	--	--
++	0	-	--	--	--

Параметры объекта управления при настройке закона управления использовались те же, что и с ПИД-регулированием. Результаты моделирования представлены на рис.6.

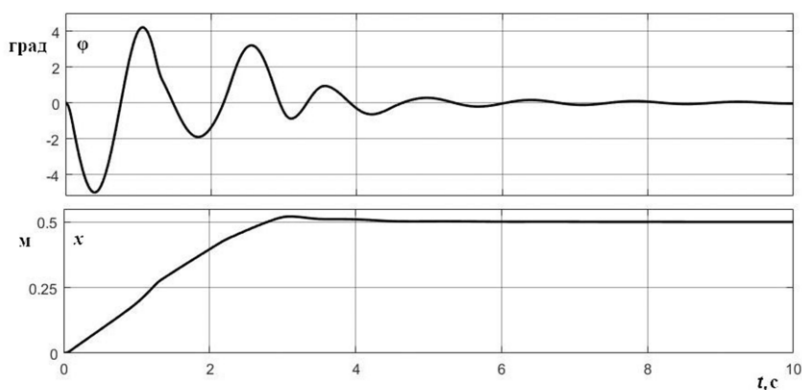


Рис. 6. Графики переходных процессов при управлении с нечёткой логикой

Адаптивная система управления. Адаптивный способ управления имеет более сложную структуру в сравнении с предыдущими и также применим в данной области [7-9]. Реализована модель адаптивной системы управления с идентификационным алгоритмом и неявной эталонной моделью с использованием «упрощенных» условий адаптируемости, предъявляющих к идентификатору несложные требования по оцениванию неизвестных параметров. При этом описание объекта производится на основе аппроксимационной параметрической модели. Закон управления строится на основе последовательного приближения с аппроксимирующими свойствами. В качестве идентификатора текущих параметров объекта управления используется широко известный рекуррентный алгоритм наименьших квадратов с фактором забывания. В качестве эталонной модели, задающей требуемые характеристики линейного перемещения тележки и углового движения груза, принимаем неявную модель в виде двух линейных стационарных звеньев второго порядка [8]:

$$\begin{cases} \ddot{x}_m = a_{x1}^m \dot{x}_m + a_{x2}^m (x_m - x_{зад}); \\ \ddot{\phi}_m = a_{\phi1}^m \dot{\phi}_m + a_{\phi2}^m (\phi_m - \phi_{зад}), \end{cases} \quad (2)$$

где x_m и ϕ_m – переменные, описывающие эталонную динамику линейного движения тележки и углового перемещения груза в зависимости от заданных значений $x_{зад}$ и $\phi_{зад}$ соответственно;

выбираемые параметры эталонной модели: $a_{x1}^m \triangleq -2\xi_x^m \omega_x^m$, $a_{x2}^m \triangleq -(\omega_x^m)^2$, $a_{\phi1}^m \triangleq -2\xi_\phi^m \omega_\phi^m$,

$a_{\phi2}^m \triangleq -(\omega_\phi^m)^2$, $\xi_x^m, \omega_x^m, \xi_\phi^m, \omega_\phi^m$ – эталонные относительные коэффициенты затухания и собственные частоты указанных звеньев по линейному перемещению тележки и угловому перемещению груза соответственно.

Дискретный закон управления описывается зависимостью [8]:

$$\begin{bmatrix} \phi_{зад} \\ f_{упр} \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-\hat{a}_{\phi1}}{a_{\phi2}^m} \\ \frac{-\hat{a}_{x2}}{\hat{a}_{x1}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{зад} \\ f_{упр} \end{bmatrix}_{i-1} + \begin{bmatrix} \frac{\hat{v}_2}{a_{\phi2}^m} \\ \frac{\hat{v}_1}{\hat{a}_{x1}} \end{bmatrix}_i; \quad \begin{bmatrix} \phi_{зад} \\ f_{упр} \end{bmatrix}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $i=1, 2, 3, \dots$ – дискретные моменты времени; $\hat{v}_1 \triangleq (a_{x1}^m - \hat{a}_{x3})\dot{x} + a_{x2}^m(x - x_{зад}) - \hat{a}_{x4}$;

$\hat{v}_2 \triangleq a_{\phi1}^m \dot{\phi} + (a_{\phi2}^m - \hat{a}_{\phi2})\phi - \hat{a}_{\phi3}\dot{x} - \hat{a}_{\phi4}$; $\omega_\phi^m > \sqrt{-\hat{a}_{x2}\hat{a}_{\phi1}/\hat{a}_{x1}}$; $\hat{a}_{x1}, \hat{a}_{x2}, \hat{a}_{x3}, \hat{a}_{x4}, \hat{a}_{\phi1}, \hat{a}_{\phi2}, \hat{a}_{\phi3}, \hat{a}_{\phi4}$ – доставляемые в текущем времени алгоритмом идентификации оценки параметров крана, в соответствии с упрощенной моделью объекта управления [8]:

$$\begin{cases} \ddot{x} \approx a_{x1} f_{\text{ypp}} + a_{x2} \varphi + a_{x3} \dot{x} + a_{x4}; \\ \ddot{\varphi} \approx a_{\varphi1} f_{\text{ypp}} + a_{\varphi2} \varphi + a_{\varphi3} \dot{x} + a_{\varphi4}, \end{cases}$$

где $a_{x1} \triangleq \gamma^{-1}(m_2 l^2 + J)$; $a_{x2} \triangleq \gamma^{-1} g(m_2 l)^2$; $a_{x3} \triangleq -\gamma^{-1}(m_2 l^2 + J) k_x$;

$a_{x4} \triangleq \gamma^{-1}[-(m_2 l^2 + J) f_{\text{с.тр}} + m_2 l^2 f_{\text{вет}}]$; $a_{\varphi1} \triangleq -\gamma^{-1} m_2 l$; $a_{\varphi2} \triangleq -\gamma^{-1}(m_1 + m_2) m_2 g l$; $a_{\varphi3} \triangleq \gamma^{-1} m_2 l k_x$;

$a_{\varphi4} \triangleq \gamma^{-1} l [m_2 f_{\text{с.тр}} - (m_1 + m_2) f_{\text{вет}}]$; $\gamma \triangleq [m_1 m_2 l^2 + (m_1 + m_2) J]$.

Составленная модель адаптивного управления мостовым краном изображена на рис. 7.

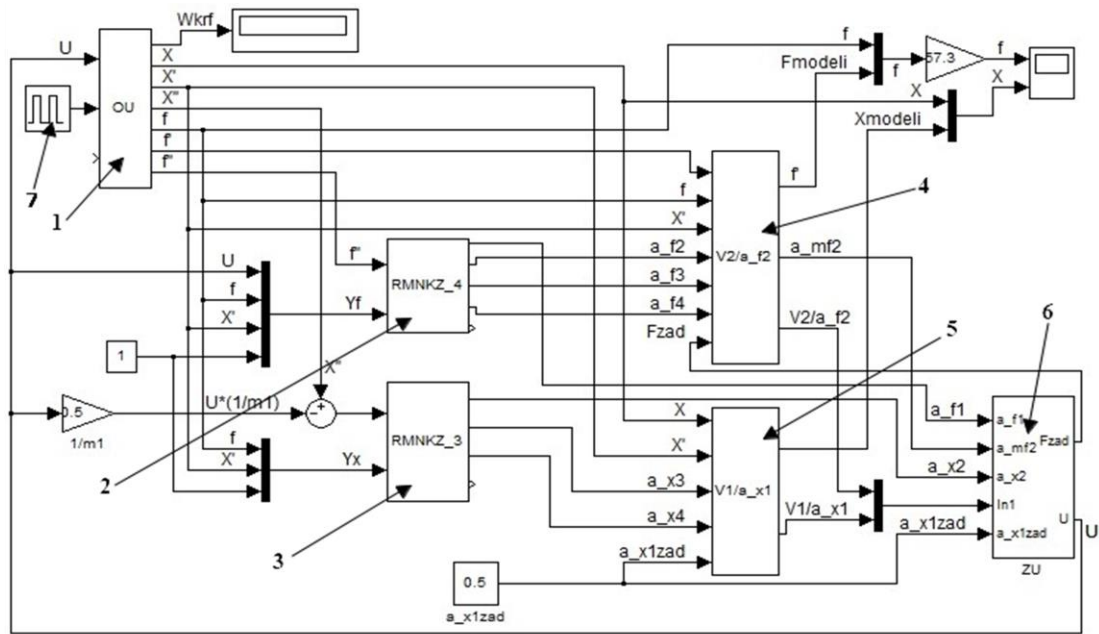


Рис. 7. Модель адаптивной системы управления. 1 – модель объекта управления; 2 – блок идентификации параметров объекта управления по углу отклонения; 3 – блок идентификации параметров объекта управления по линейному перемещению; 4 – блок вычисления переменной v_2 согласно выражению (3); 5 – блок вычисления переменной v_1 согласно выражению (3); 6 – блок расчёта управляющего сигнала, вычисляется согласно выражению (3); 7 – блок внешних возмущений.

Параметры объекта управления принимаем следующие: $m_1 = 2$ кг; $m_2 = 2$ кг; $l = 0,5$ м; $J = 0,008$ кг*м², $k_x = 0.3$; эталонные относительные коэффициенты $\xi_x^M = 0,8$, $\xi_\varphi^M = 0,9$, $\omega_x^M = 1,3$, $\omega_\varphi^M = 50$; коэффициенты забывания алгоритма идентификации принимаем 0,99. Результаты моделирования представлены на рис.8.

Анализ методов управления при изменении параметров системы управления. Будем исследовать синтезированные системы управления при разных условиях, но законы управления не менять. Все варианты используемых параметров представлены в таблице 3 – это типовые виды грузов и разная длина подвески. Момент инерции переносимого груза рассчитывался согласно [11]. Оценивать качество системы управления будем по времени регулирования переходного процесса и максимальному углу отклонения маятника во время переходного процесса. В нашем случае под временем регулирования будем понимать интервал времени, за который тележка достигает заданного положения $\pm 5\%$ (0,475м – 0,525м) и колебания груза демпфируются до 2 и менее градусов.

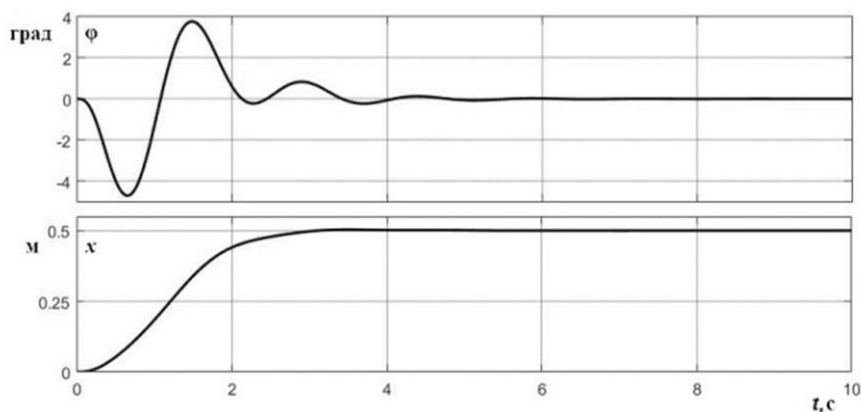


Рис. 8. Графики переходных процессов адаптивной системы управления

Таблица 3. Варианты исследований

№	Параметры объекта управления	Тип и размеры груза	№	Параметры объекта управления	Тип и размеры груза
1	$m_2=2 \text{ кг}; l=0,5 \text{ м}; J=0,008 \text{ кг*м}^2$	Полнотелый шар $r = 0,1 \text{ м}$	12	$m_2=7 \text{ кг}; l=1 \text{ м}; J=0,063263 \text{ кг*м}^2$	Контейнер 0,303м x 0,122м x 0,129м
2	$m_2=2 \text{ кг}; l=0,3 \text{ м}; J=0,008 \text{ кг*м}^2$		13	$m_2=7 \text{ кг}; l=0,2 \text{ м}; J=0,063263 \text{ кг*м}^2$	
3	$m_2=2 \text{ кг}; l=0,1 \text{ м}; J=0,008 \text{ кг*м}^2$		14	$m_2=5 \text{ кг}; l=0,5 \text{ м}; J=0,045188 \text{ кг*м}^2$	
4	$m_2=4 \text{ кг}; l=0,5 \text{ м}; J=0,016 \text{ кг*м}^2$		15	$m_2=5 \text{ кг}; l=1 \text{ м}; J=0,045188 \text{ кг*м}^2$	
5	$m_2=4 \text{ кг}; l=1 \text{ м}; J=0,016 \text{ кг*м}^2$		16	$m_2=5 \text{ кг}; l=0,2 \text{ м}; J=0,045188 \text{ кг*м}^2$	
6	$m_2=4 \text{ кг}; l=0,3 \text{ м}; J=0,016 \text{ кг*м}^2$		17	$m_2=5 \text{ кг}; l=0,5 \text{ м}; J=0,037891 \text{ кг*м}^2$	Труба размером $l=0,3 \text{ м}$ $r_1=0,0125 \text{ м}, r_2=0,01225 \text{ м}$
7	$m_2=1 \text{ кг}; l=0,3 \text{ м}; J=0,004 \text{ кг*м}^2$		18	$m_2=5 \text{ кг}; l=1 \text{ м}; J=0,037891 \text{ кг*м}^2$	
8	$m_2=1 \text{ кг}; l=0,1 \text{ м}; J=0,004 \text{ кг*м}^2$		19	$m_2=5 \text{ кг}; l=0,2 \text{ м}; J=0,037891 \text{ кг*м}^2$	
9	$m_2=5 \text{ кг}; l=0,2 \text{ м}; J=0,02 \text{ кг*м}^2$		20	$m_2=3 \text{ кг}; l=0,5 \text{ м}; J=0,022734 \text{ кг*м}^2$	
10	$m_2=5 \text{ кг}; l=0,1 \text{ м}; J=0,02 \text{ кг*м}^2$		21	$m_2=3 \text{ кг}; l=1 \text{ м}; J=0,022734 \text{ кг*м}^2$	
11	$m_2=7 \text{ кг}; l=0,5 \text{ м}; J=0,063263 \text{ кг*м}^2$	Контейнер 0,303м x 0,122м x 0,129м	22	$m_2=3 \text{ кг}; l=0,2 \text{ м}; J=0,022734 \text{ кг*м}^2$	

Характеристики системы управления, построенной по разным методам управления, в зависимости от изменений параметров груза по табл.3 представлены на рис.9.

Согласно проведённому исследованию лучшие результаты переходных процессов получены при адаптивном способе управления: среднее время регулирования составляет 4,2 секунды, среднее значение максимального угла отклонения груза 4 градуса. В то время, как при управлении с нечёткой логикой – 4,7 секунды и 5,1 градуса, при ПИД-регулировании – 9,2 секунды и 7,4 градуса соответственно.

Анализ свойств парирования внешних воздействий. Для анализа свойств парирования внешних неконтролируемых факторов систем управления, добавим возмущение – воздействие силы ветра на подвешенный груз. Скорость ветра примем 15 м/с, а направление противоположно движению тележки. Воздействие ветра на груз будет импульсным длительностью в 1 секунду, начинается воздействие после завершения

35 переходного процесса на 9 секунде. Сила воздействия ветра на подвешенный груз рассчитывалась согласно [12]. Результаты моделирования представлены на рис.10. Параметры объекта управления: $m_2=4$ кг, $l=0,5$ м; $J=0,016$ кг*м².

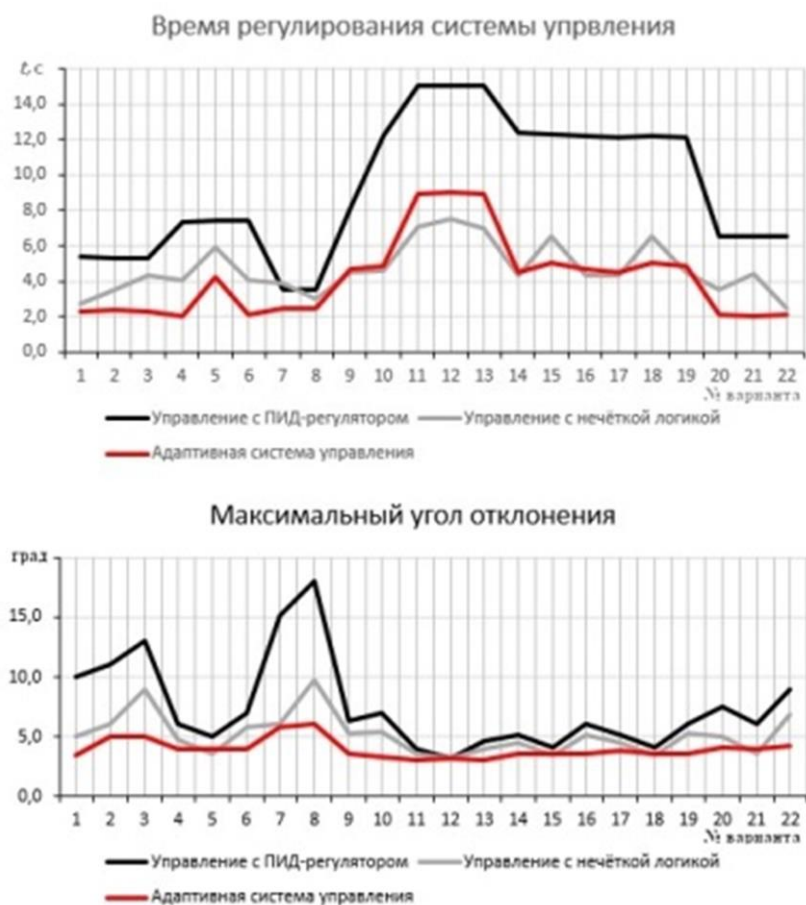


Рис. 9. Характеристики системы управления в зависимости от изменений параметров груза

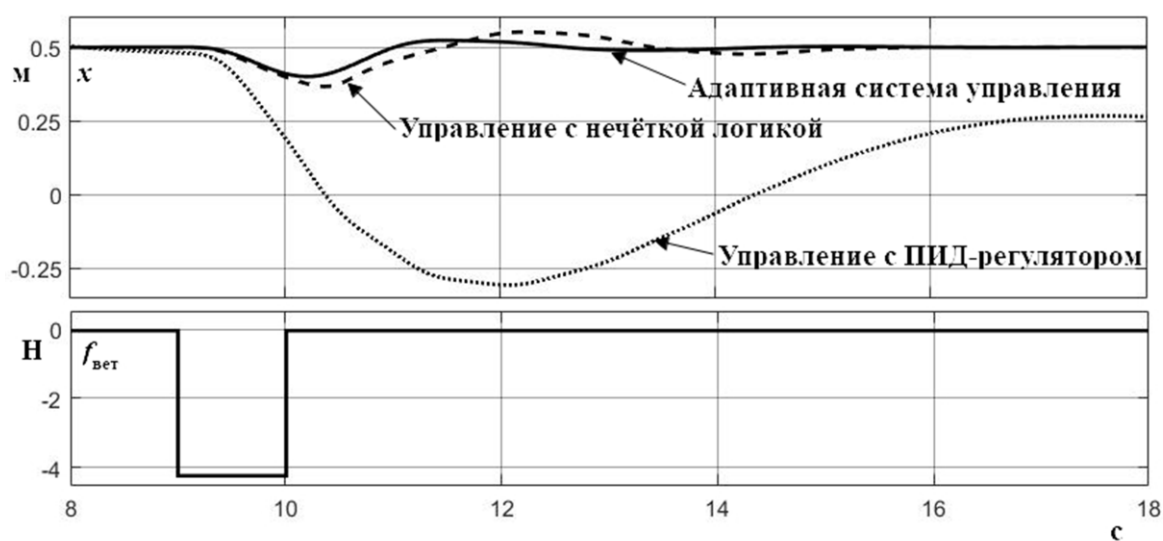


Рис. 10. Зависимость перемещения тележки от времени при управлении адаптивным способом, с нечёткой логикой и с ПИД-регулированием

Из полученных результатов видно, что свойства парирования внешних возмущений различается. Система управления с ПИД-регулированием не способна обеспечить точную работу при внешних воздействиях. Время восстановления заданного положения при управлении с нечёткой логикой 2,1 секунды, при адаптивном управлении – 1,3 секунды.

Заключение. Результаты моделирования указывают на высокую эффективность адаптивной системы управления с идентификационным алгоритмом и неявной эталонной моделью относительно других методов управления. Это объясняется тем, что адаптивная система управления с идентификационным алгоритмом и неявной эталонной моделью по оценкам неизвестных параметров, доставляемых алгоритмом идентификации в текущем времени, формирует закон управления краном. Система в априорно неопределённых условиях очень быстро подстраивается к неизвестным и изменяющимся параметрам объекта управления и внешним неконтролируемым возмущениям. При этом обеспечивается сравнительно быстрое гашение колебаний груза после начала движения и при действии внешних возмущений, обеспечивая высокую точность позиционирования. Данный подход имеет лучшие робастные свойство системы при изменяющихся параметрах объекта управления и внешних возмущающих факторах, таких как воздействие ветра, неровности подкранового пути и так далее.

Указанное подтверждает актуальность внедрения адаптивного метода в задачах управления мостовым и иными кранами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черноусько Ф.Л., Ананьевский И.М., Решмин С.А. Методы управления нелинейными механическими системами. – М.: Физматлит, 2006. – 328 с.
2. Кoryтов М.С., Щербakov В.С., Шершнева Е.О. Обоснование значений коэффициентов регуляторов гашения колебаний груза мостового крана. Транспортное, горное и строительное машиностроение. С. 12-19.
3. Петренко Ю.Н., Алави С.Э., Александровский С.В. Исследование работы крана с контроллером нечёткой логики на основе трехмерной имитационной модели. Белорусский национальный технический университет. 2011. С 20-25.
4. Ухоботов В.И., Величко В.С. Стабилизация математического маятника с основанием на колесе с помощью нечёткого алгоритма управления. Вестник ЮУрГУ, том 14 №2. 2014. С 18-23.
5. Алави С.Э., Петренко Ю.Н. Контроллер позиционного электропривода на основе нечёткой логики. Белорусский национальный технический университет. Труды БГТУ. 2008.
6. Bimal K. Base. Power Electronic and Variable Frequency Drives: Technology and applications. — New York, 1997. — 640 p.
7. F. Boustany, B. d'Andrea-Novell. Adaptive Control of an Overhead Crane using Dynamic Feedback Linearization and Estimation Desig. Centre Automatique et Systemes, Ecole des Mines de Paris. 1992, p. 1963-1968.
8. Круглов С.П., Ковыршин С.В., Ведерников И.Е. Адаптивное управление перемещением груза мостовым краном с идентификационным алгоритмом. Современные технологии. Системный анализ. Моделирование № 4, 2017. С. 114-122.
9. Круглов С.П. Адаптивная автоматизация пилотирования самолетом на больших углах атаки на основе упрощенных условий адаптируемости: монография. – Иркутск: ИФ МГТУ ГА, 2012. 248 с.
10. Аксаментов Д.Н., Круглов С.П., Ковыршин С.В. Установка по исследованию алгоритмов успокоения колебаний груза мостового крана // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2019. Т. 2. С. 288-292.
11. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.1. Механика. 3-е изд. М. :Наука, 1989.
12. Савицкий Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения. 1972.

REFERENCES

1. Chernous'ko F.L., Anan'evskij I.M., Reshmin S.A. Metody` upravleniya nelinejny`mi mexanicheskimi sistemami [Control methods of nonlinear mechanical systems]. – M.: Fizmatlit, 2006. 328 p.
2. Kory`tov M.S., Shherbakov V.S., Shershneva E.O. Obosnovanie znachenij koe`fficientov reguljatorov gasheniya kolebanij gruza mostovogo kрана [Substantiation of values of factors of bridge crane cargo vibration damping regulators]. Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie. P. 12-19.
3. Petrenko Yu.N., Alavi S.E`, Aleksandrovskij S.V. Issledovanie raboty` kрана s kontrollerom nechjotkoj logiki na osnove trexmernoj imitacionnoj modeli [Investigation of crane operation with odd logic controller based on 3D simulation model]. Belorusskij nacional'ny`j texnicheskij universitet. 2011. P 20-25.
4. Uxobotov V.I., Velichko V.S. Stabilizaciya matematicheskogo mayatnika s osnovaniem na kolese s pomoshh`yu nechjotkogo algoritma upravleniya [Stabilisation of the mathematical pendulum with the base on the wheel using an odd control algorithm]. Vestnik YuUrGU, Vol.14 №2. 2014. P 18-23.
5. Alavi S.E`, Petrenko Yu.N. Kontroller pozicionnogo e`lektroprivoda na osnove nechjotkoj logiki [Position motor controller based on odd logic]. Belorusskij nacional'ny`j texnicheskij universitet. Trudy` BGTU. 2008.
6. Bimal K. Base. Power Electronic and Variable Frequency Drives: Technology and applications. — New York, 1997. — 640 p.
7. F. Boustany, B. d'Andrea-Novel. Adaptive Control of an Overhead Crane using Dynamic Feedback Linearization and Estimation Desig. Centre Automatique et Systemes, Ecole des Mines de Paris. 1992, p. 1963-1968.
8. Kruglov S.P., Kovy`rshin S.V., Vedernikov I.E. Adaptivnoe upravlenie peremeshheniem gruzа mostovy`m kранom s identifikacionny`m algoritmom [The adaptive control of movement of cargo by the overhead crane with an identification algorithm]. Sovremenny`e tekhnologii. Sistemny`j analiz. Modelirovanie № 4, 2017. P. 114-122.
9. Kruglov S.P. Adaptivnaja avtomatizacija pilotirovanija samoletom na bol'shih uglah ataki na osnove uproszhennyh uslovij adaptiruemosti [Adaptive automation of piloting by plane on larger angles of attack on the basis of the simplified adaptability conditions]: monograph. – Irkutsk: IF MGTU GA, 2012. 248 p.
10. Aksamentov D.N., Kruglov S.P., Kovy`rshin S.V. Ustanovka po issledovaniyu algoritmov uspokoeniya kolebanij gruzа mostovogo kрана [Installation for investigation of bridge crane load vibration calming algorithms] // Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona. 2019. T. 2. P. 288-292.
11. Sivuxin D.V. Obshhij kurs fiziki [General course of physics]. T.1. Mexanika. 3-e izd. M.: Nauka, 1989.
12. Saviczkiy G.A. Vetrovaya nagruzka na sooruzheniya [Wind load on structures]. 1972.

Информация об авторах

Аксаментов Дмитрий Николаевич – аспирант «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: Gaastra104@mail.ru

Круглов Сергей Петрович – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru

Ковыришин Сергей Владимирович – к.т.н., доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: sergkow@mail.ru

Authors

Aksamentov Dmitriy Nikolaevich – postgraduate of department «Automation of production operations», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: Gaastra104@mail.ru.

Kruglov Sergey Petrovich – doctor of technical sciences, professor of department «Automation of production operations», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru.

Kovyrshin Sergey Vladimirovich – candidate of technical sciences, associate professor of department «Automation of production operations», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: sergkow@mail.ru.

Для цитирования

Аксаментов Д.Н., Круглов С.П., Ковыршин С.В. Сравнительный анализ методов управления мостовым краном // «Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами»: электрон. науч. журн. – 2019. – №4(5). – С. 28-38. DOI: 10.26731/2658-3704.2019.4(5).28-38 – Режим доступа: <http://ismm-irgups.ru/toma/45-2019>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: 20.12.2019)

For citations

Sinitsyn A.V., Rojas E. Investigation of the limit model of the plane vacuum diode as a parametric singular cauchy problem with boundary conditions // Informacionnye tehnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal [Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems: electronic scientific journal], 2019. No. 4(5). P. 28-38. DOI: 10.26731/2658-3704.2019.4(5).28-38 [Accessed 20/12/19]