

## СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КРАНА С ДЕМПФИРОВАНИЕМ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА

**Вячеслав Алексеевич Хвостов**, декан, доцент, к.т.н., vjachkhv@yandex.ru

**Жуашиим Киендо Кумбу**, магистрант, joachimkhiendokumbu@gmail.com

Брянский государственный технический университет, Россия, Брянск

*Аннотация.* В статье исследуется возможность построения системы управления электроприводом механизма передвижения крана с демпфированием колебаний груза. Предлагаемая система включает в себя адаптивный модуль, который с помощью образцовой модели обеспечивает по сигналам рассогласования коррекцию управления при изменениях массы груза и длины подвеса.

*Ключевые слова:* адаптивный регулятор, механизм передвижения крана, демпфирование колебаний груза.

### SYNTHESIS OF AN ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR AN ELECTRIC DRIVE WITH A PRONOUNCED NONLINEARITY OF THE WORKING ELEMENT CHARACTERISTIC

Viacheslav A. Khvostov, dean, docent, candidate of technical sciences, vjachkhv@yandex.ru

Joachim Khiendo Kumbu, Master's student, joachimkhiendokumbu@gmail.com)

Bryansk State Technical University, Russia, Bryansk

*Abstract.* The article explores the possibility of constructing an electric drive control system for the crane movement mechanism with damping of load vibrations. The proposed system includes an adaptive module, which, with the help of an exemplary model, provides control correction based on misalignment signals with changes in the weight of the load and the length of the suspension.

*Keywords:* adaptive regulator, crane movement mechanism, load vibration damping.

Среди механизмов, участвующих в процессе производства промышленной продукции, огромная роль отводится подъемно-транспортным машинам. При переходных процессах пуска и торможения, возникает раскачивание груза относительно своего положения равновесия. Амплитуда и период колебаний груза зависят от изменения длины подвеса и веса транспортируемого груза. Эти колебания необходимо исключить.

Механическая часть передвижения груза описывается системой уравнений

$$\begin{cases} M - M_{CT} - M_{12} = J_1 \frac{dw_1}{dt} \\ M_{12} = J_2 \frac{dw_2}{dt} \\ \frac{dM_{12}}{dt} = \frac{J_2 g}{l} (w_1 - w_2) \end{cases}$$

где  $J_1 = m_1 \rho^2, J_2 = m_2 \rho^2, \rho = V/w$ .

Примем для определенности  $M_{CT} = 0, \rho = 0.025$ , вес крана  $m_1 = 48$  т, вес грузам  $m_2 = 16$  т. Тогда моменты инерции  $J_1 = 30 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, J_2 = 10 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

Длину подвеса примем равной 10 метрам. Тогда жесткость  $p = \frac{J_2 g}{l} = 3$ .

Дополним систему дифференциальных уравнений, описывающих механическую часть, алгебраическими уравнением для момента двигателя.

Сигнал управления сформируем в виде суммы, состоящей из сигналов задания  $u^0$ , отрицательной обратной связи  $u_l$  и коррекции  $u_a$ .

В итоге получим систему уравнений, описывающих динамику систему электропривода механизма передвижения крана.

$$\begin{cases} \omega_1 \dot{=} -J_2^{-1} m_y + J_1^{-1} M_m; & m_y = p(\omega_1 - \omega_2); & \omega_2 \dot{=} J_2^{-1} m_y; \\ M_m = R_\alpha^{-1} k_m (k_y u_c - k_e \omega_1); & u_c = (u_\Sigma - k_c \omega_1) \beta_c; \\ u_\Sigma = u^0 + u_l + u_a. \end{cases}$$

В результате подстановки принятых для крана исходных данных, был рассчитан набор коэффициентов обратной связи по трем переменным состояния для обеспечения модального управления с распределением корней по Баттерворту. После расчета коэффициентов обратной связи выполнено моделирование синтезированной системы с помощью программного комплекса Matlab.

На рис.1 показаны результаты моделирования перемещения груза по заданию в виде трапеции.

Система обрабатывает это задание с помощью упругого момента  $M_y$  с постоянным значением на участках пуска и торможения и нулевым значением на участке с равномерным движением. Отклонение груза от вертикали в некотором масштабе соответствует изменению упругого момента.

Полученное модальное управление, может быть реализовано только с помощью непосредственного измерения переменных  $\omega_2, m_y$  и  $\omega_1$ , а так как переменные  $\omega_2$  и  $m_y$  недоступны измерению с помощью датчиков, то для его осуществления необходимо использовать асимптотические оценки этих переменных, вырабатываемые наблюдателем.

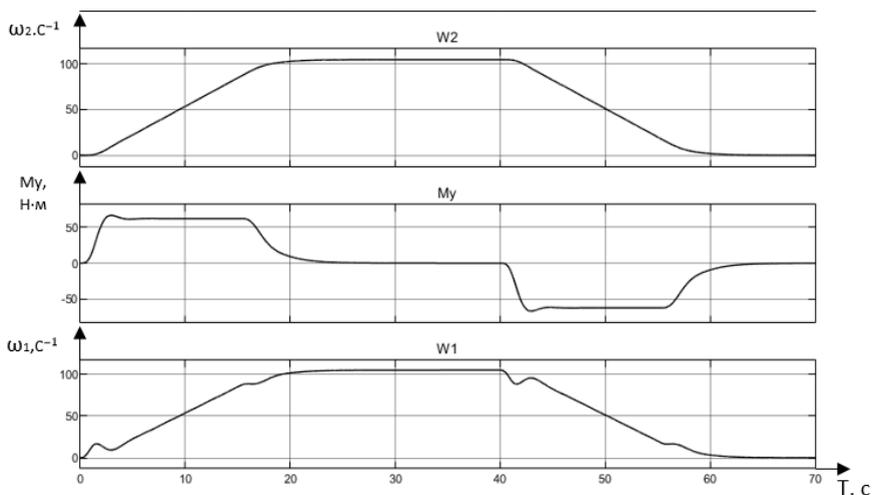


Рисунок 1 – Результат моделирования движения крана при модальном управлении

Идентификатор (наблюдатель) по измерению скорости  $\omega_1$  расчетного объекта имеет вид

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\omega}}_2 &= a_1 m_y + l_1 c \hat{\varepsilon}_\omega; \\ \dot{\hat{m}}_y &= a_2 (\hat{\omega}_1 - \hat{\omega}_2) + l_2 c \hat{\varepsilon}_\omega; \\ \dot{\hat{\omega}}_1 &= a_3 \hat{m}_y + a_4 \hat{\omega}_1 + l_3 c \hat{\varepsilon}_\omega + b u_\Sigma;\end{aligned}$$

где  $\hat{\omega}_1$ ;  $\hat{m}_y$ ;  $\hat{\omega}_2$  – оценки переменных состояния объекта ;  $\hat{\varepsilon}_\omega = \omega_1 - \hat{\omega}_1$  ошибка наблюдения;  $(l_1 ; l_2 ; l_3)^T$  – вектор коэффициентов обратных связей наблюдателя по ошибке наблюдения  $\hat{\varepsilon}_\omega$ , ( $c = kc$ ).

Расчет коэффициентов обратных связей  $l_1 ; l_2 ; l_3$  производится также как расчет коэффициентов модального управления с учетом необходимости иметь быстродействие наблюдателя, как минимум, на порядок выше.

Моделирование системы с наблюдателем показало результаты, идентичные показанным ранее на рис.1, что говорит о возможности управления движением только по датчику скорости на первой массе.

Если при управлении движением изменить длину подвеса и массу груза, то данная система будет давать отклонения от оптимального движения. Для того, чтобы система автоматически корректировала управление при изменениях длины подвеса и массы груза, в нее вводится блок адаптации.

Адаптивная система, рассчитываемая и исследуемая в данной работе, основана на алгоритме адаптации с эталонной моделью. В качестве эталонной модели используется модель системы с распределением корней, которое использовалось при расчете коэффициентов модельного управления.

В качестве объекта управления используется модель с изменяющимися длиной подвеса и массой перемещаемого груза.

Цель управления – совпадение динамики объекта управления  $x(t)$  с динамикой эталонной модели  $x_M(t)$ , то есть  $e(t) = x(t) - x_M(t) \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ , где  $e(t)$  – вектор ошибки.

Структуры электромеханического объекта и эталонной модели должны быть согласованы, то есть  $A - A_M = BK_A$ ,  $B - B_M = BK_B$ .

Алгоритм адаптации сигнального типа, который применяется для стационарных систем, имеет вид

$$u_a(t) = -\gamma \cdot \text{sign}[B^T P \cdot e(t)],$$

где  $\gamma$  – коэффициент усиления.

Симметричная положительно определенная матрица  $P$  находится как решение матричного уравнения А. М. Ляпунова для матрицы  $A_M$  эталонной модели  $A_M^T P + A_M P^T = -Q$ , где  $Q = Q^T > 0$  – заданная симметричная положительно определенная матрица.

В результате расчета матрицы  $P$  и подбора коэффициента усиления получили систему, которая автоматически корректирует управляющее воздействие, компенсируя возникшие рассогласования в динамике объекта и эталонной модели. На рис.2 приведены результаты моделирования движения груза с массой  $2,4 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}$  и подвесе  $30 \text{ м}$  при наличии и отсутствии блока адаптации. Приведенный результат показывает, что адаптация по эталонной модели движения груза по заданной траектории может совершаться без колебаний груза в достаточно большом диапазоне отклонений как по длине подвеса, так и по массе груза.

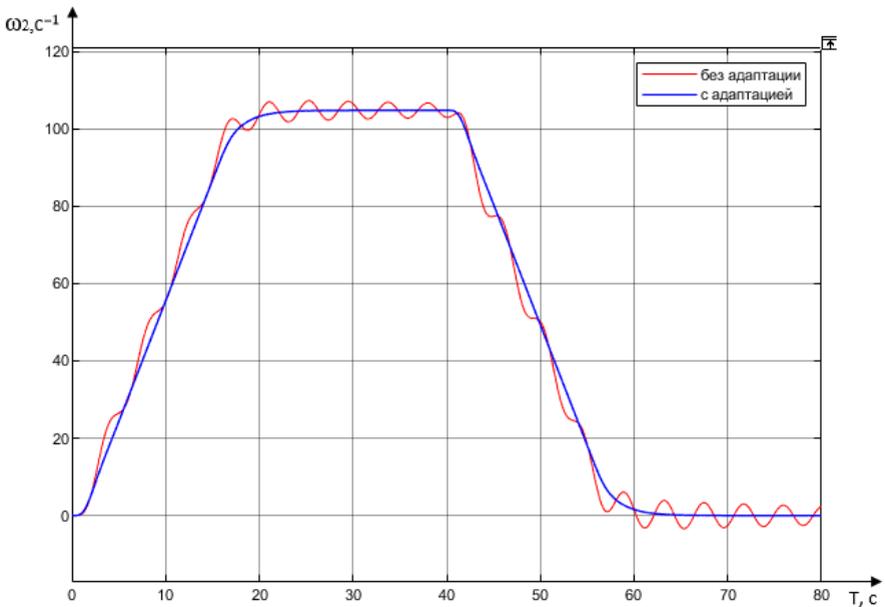


Рисунок 2 – Результат моделирования движения груза без и с блоком адаптации

Материал принят к публикации 16.10.21.