

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УСПОКОЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ В СИСТЕМЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ

А.В. Щедринов (Липецкий филиал МИКТ),  
С.А. Сериков, В.В. Колмыков (ОАО "НЛМК")

*Рассматриваются существующие автоматические системы успокоения колебаний груза, транспортируемого мостовым краном. Предложена структурная схема автоматизированной системы успокоения колебаний груза, содержащей математическую модель раскачивающегося груза, благодаря которой обеспечивается быстрое затухание его колебаний. Приведено расчетное и экспериментальное обоснование справедливости математического аппарата, заложенного в математическую модель.*

*Ключевые слова: автоматическая система успокоения колебаний груза, переходный процесс, ускорение, датчики отклонения груза, задача гашения колебаний груза, частотно-регулируемый привод переменного тока.*

На промышленных предприятиях наиболее распространенным и универсальным подъемно-транспортным механизмом является мостовой кран. Обеспечивая производственный процесс доставкой сырья и полуфабрикатов, осуществляя транспортировку готовой продукции или участвуя в монтаже, краны представляют собой важное звено ТП, нередко определяющее производительность основной технологической линии.

Минимизируя колебания при перемещении груза, можно резко повысить производительность. Поэтому одной из перспективных задач рационального управления механизмами кранов является разработка АСУ, способствующих эффективному гашению колебаний груза.

В настоящее время разработан ряд способов, обеспечивающих автоматическое успокоение колебаний груза. При их использовании крановщик подает только начальный сигнал, а движение механизма автоматически формируется системой управления электроприводом. Один из таких способов заключается в поддержании постоянного ускорения точки подвеса в течение промежутка времени, кратного периоду собственных колебаний груза [1]. Недостатком этого способа является сравнительно большое время переходного процесса, кратное периоду собственных колебаний груза. Другой способ [1] заключается в формировании закона изменения ускорения на трех временных интервалах. На первом и третьем интервалах поддерживается одинаковое ускорение, на втором — ускорение равно нулю, продолжительности первого и третьего интервалов одинаковы (поэтому на каждом из них изменение скорости равно полуразности между конечной и установившейся скоростями). Общая длительность первых двух интервалов составляет половину периода колебания груза. Недостатком этого способа также является сравнительно большое время переходного процесса, хотя оно и меньше, чем в первом способе.

Более сложные системы автоматического успокоения колебаний используют датчики отклонения груза, что позволяет производить непосредственную коррекцию по текущему отклонению. Примером может служить система управления портовыми кранами SmartCrane (компания SmartCrane, США, г. Хамптон, www.smartcrane.com), использующая датчик угла откло-

нения для компенсации колебаний, вызванных ветровыми нагрузками и возникающих при подъеме груза.

Одной из систем, способной осуществлять высокоточное, быстрое и плавное передвижение груза с полным отсутствием раскачивания является система автоматического регулирования колебаний НІРАС (Highly Intelligent Pendulum and Automation Control) фирмы Siemens. Принцип работы этой системы заключается в том, что задание скорости горизонтального перемещения груза формируется микропроцессорной системой НІРАС на основании актуальной величины угла отклонения груза и скорости передвижения тележки (www.automation-drives.ru). Применение системы НІРАС позволяет в значительной мере ограничить раскачивание груза, однако существует ряд недостатков, препятствующих внедрению подобных систем на отечественных промышленных предприятиях. Во-первых, высокая стоимость комплекта оборудования для установки системы НІРАС. Во-вторых, использование сложного датчика отклонения груза ухудшает надежность системы.

Недостатки рассмотренных способов подавления колебаний приводят к тому, что разработка доступной и эффективной автоматической системы гашения колебаний транспортируемого груза в подъемно-транспортных механизмах до сих пор является актуальной задачей.

Решение задачи гашения колебаний груза, транспортируемого мостовым краном, заключается в формировании такого закона управления скоростью электроприводов моста и тележки, чтобы после достижения заданной скорости колебания груза были минимальными, и по возможности ограничивалась амплитуда колебаний в переходных процессах пуска и торможения. Для этого в системе управления приводами тележки и моста вводится корректирующий сигнал, пропорциональный величине отклонения груза от положения равновесия в соответствующей плоскости движения (моста, тележки) и полученный по математической модели системы "точка подвеса — груз" [2]:

$$\begin{aligned} d^2x_0/dt^2 + (K_{св}/m_с)(dx_0/dt)^2 + (1 + m_с/m_m)(g/l_n)x_0 &= a_m, \\ d^2y_0/dt^2 + (K_{св}/m_с)(dy_0/dt)^2 + \\ + (1 + m_с/(m_m + m_с))(g/l_n)y_0 &= a_m, \end{aligned}$$

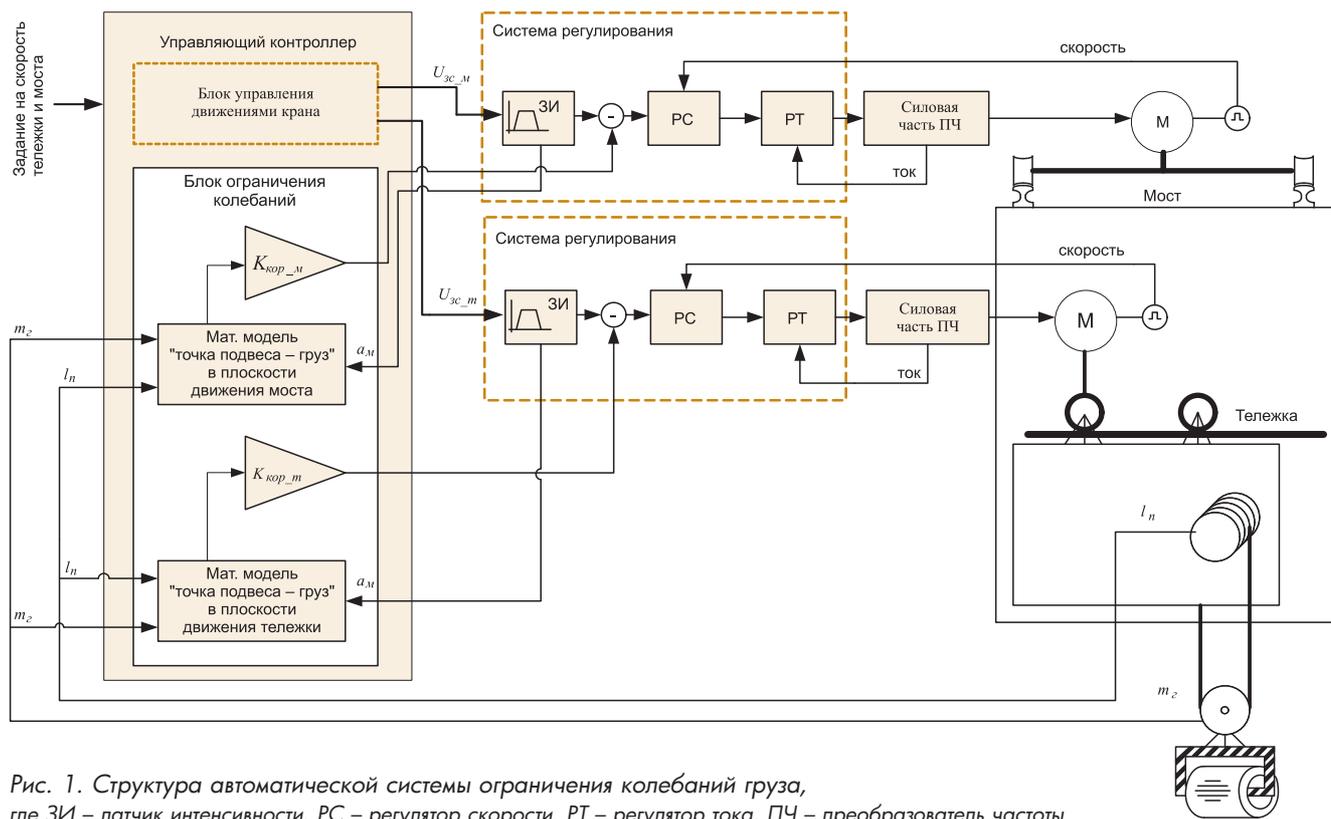


Рис. 1. Структура автоматической системы ограничения колебаний груза, где ЗИ – датчик интенсивности, РС – регулятор скорости, РТ – регулятор тока, ПЧ – преобразователь частоты

где  $K_{св}$  – коэффициент сопротивления воздуха;  $x_0, y_0$  – отклонения груза от положения равновесия в плоскостях движения тележки и моста;  $m_g, m_m$  – массы груза и тележки соответственно;  $a_m, a_t$  – ускорения двигателя тележки и моста;  $l_n$  – длина подвеса.

Для реализации такого способа управления требуется наличие замкнутой цифровой системы регулирования (СР) координатами электропривода. Наиболее перспективными в этом плане представляются частотно-регулируемые приводы переменного тока с микропроцессорным управлением. Применение привода переменного тока обусловлено спецификой кранового электрохозяйства. В настоящее время наиболее перспективным и экономичным методом управления привода переменного тока представляется привод с векторным управлением. Наиболее распространенной системой векторного управления является система с косвенной ориентацией вектора потока сцепления ротора [3]. Подобная система реализована в приводах фирм Siemens (Simovert, Sinamics), Shneider (Altivar), Allen Bradley (Power Flex) и др.

На рис. 1 приведена структурная схема электромеханической системы мостового крана с включенной в СР моделью раскачивающегося груза. На основании вычисленных значений ускорений моста  $a_m$  и тележки  $a_t$ , а также измеренных с помощью датчиков длины подвеса  $l_n$  и массы груза  $m_g$  строится математическая модель раскачивающегося груза, по которой вырабатываются корректирующие сигналы для привода передвигания моста  $U_{кор\_м}$  и привода передвигания тележки  $U_{кор\_т}$ .

Математическая модель раскачивающегося груза программно реализована на управляющем контрол-

лере, осуществляющем управление движениями крана. Корректирующий сигнал поступает на вход регулятора скорости и позволяет воздействовать на скорость привода при отклонении груза от положения равновесия.

В начальный момент пуска точка подвеса груза разгоняется с постоянным ускорением. При этом груз под действием сил инерции отклоняется от вертикального положения в плоскости движения тележки  $x_0$  и плоскости движения моста  $y_0$ . Движение груза с ускорением приводит к появлению ненулевого корректирующего сигнала, уменьшающего задание на входе регулятора скорости. В какой-то момент времени величина задания, поступающего на регулятор скорости, становится достаточной, чтобы регулятор скорости вышел из режима ограничения, причем это происходит до достижения приводом заданной скорости. Следовательно, в конце переходного процесса уменьшается ускорение привода, и груз догоняет точку подвеса. В результате этого после завершения переходного процесса отклонения груза практически отсутствуют.

Введение в СР приводов передвигания моста и тележки корректирующих сигналов позволяет в значительной степени снизить колебания груза (рис. 2, 3). При пуске, вследствие воздействия корректирующего сигнала, ускорение (положительное) уменьшается, а при торможении (отрицательное) – увеличивается, в результате чего происходит выравнивание груза относительно положения равновесия. Степень снижения колебаний груза зависит от времени выхода регулятора скорости из ограничения, а следовательно, от

величины корректирующего сигнала. Влияние корректирующего сигнала на СР определяется величиной коэффициентов коррекции ( $K_{кор\_m}$  – для привода тележки,  $K_{кор\_м}$  – для привода моста), рассчитываемых по формулам (1) и (2) для системы управления приводами тележки и моста.

Увеличение коэффициента коррекции приводит к уменьшению колебаний, но в то же время вызывает затягивание переходного процесса. Оптимальное значение коэффициента коррекции определяется из соображения, что максимальному значению корректирующего сигнала должно соответствовать максимальное значение отклонения груза. При этом значение коэффициента коррекции предлагается определять по формулам:

$$K_{кор\_m} = \Omega_x^2 / (2a_m) = T_{zu\_m} g (1 + m_z / m_m) / (2V_{n\_m} / l_n), \quad (1)$$

$$K_{кор\_м} = \Omega_y^2 / (2a_m) = T_{zu\_m} g (1 + m_z / (m_m + m)) / (2V_{n\_m} / l_n), \quad (2)$$

где  $\Omega_x, \Omega_y$  – частоты колебаний груза в плоскостях движения тележки и моста;  $a_m, a_n$  – ускорения тележки и моста;  $T_{zu\_m}, T_{zu\_н}$  – время выхода на заданную скорость;  $V_{n\_m}, V_{n\_н}$  – номинальные скорости тележки и моста.

Для оценки справедливости (1) и (2) проведем исследование влияния величины коэффициента коррекции на степень затухания колебаний груза и времени завершения переходного процесса при различных значениях массы груза и длины подвеса на примере (1). При этом воспользуемся математической моделью электромеханической системы мостового крана (рис. 1), построенной в приложении Simulink пакета программ Matlab 6.5.

При анализе будем использовать следующие показатели:

- колебательности  $\lambda$ , позволяющий оценить, в какой степени снижаются колебания в системе с корректирующим устройством по сравнению с системой без коррекции:  $\lambda = K_{кол} / K_{кол0}$ , где  $K_{кол}, K_{кол0}$  – значения коэффициентов колебательности в системе с/без коррекции. Коэффициент колебательности характеризует суммарный угол отклонения груза от положения равновесия:

$$K_{кол} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{|X_0(t)|}{l_n(t)} dt ;$$

- амплитуды  $\alpha$ , позволяющий оценить степень снижения максимальной амплитуды колебаний в системе с коррекцией, по сравнению с системой без коррекции:  $\alpha = A_{max} / A_{max0}$ , где  $A_{max}, A_{max0}$  – максимальные амплитуды колебаний груза в системе с/без коррекции;

- быстродействия  $\upsilon$ , характеризующий увеличение времени переходного процесса при введении в СР корректирующего устройства:  $\upsilon = T_{нм} / T_{нм0}$ , где  $T_{нм}, T_{нм0}$  – время переходного процесса в системе с/без коррекции;

- качества  $\gamma$ , характеризующий оптимальность настройки СР. Он показывает, во сколько снижение

*Осознав необходимость, оценив чужой опыт, осмыслив пособия, построив модель и предусмотрев риски, ты наградишь себя правильным решением.*

Санта Суксес

амплитуды и увеличение степени затуханий колебаний груза больше, чем увеличение времени переходного процесса:  $\gamma = 1 / (\alpha \lambda \upsilon)$ . То есть показатель  $\gamma$  определяет целесообразность применения корректирующего сигнала в СР.

На рис. 4 приведены кривые зависимостей данных показателей от величины коэффициента коррекции. Кривые получены перебором значений коэффициента коррекции в математической модели. Анализ графиков показывает, что при введении в СР корректирующего сигнала амплитуда колебаний уменьшается, суммарный угол отклонения становится меньше, но возрастает время переходного процесса достижения заданной скорости. При увеличении значений коэффициента коррекции показатели амплитуды и колебательности снижаются (колебания груза уменьшаются), а показатель быстродействия возрастает (переходный процесс затягивается). Следовательно, функция показателя качества имеет экстремум, в котором коэффициент коррекции имеет оптимальное значение. Причем показатель качества для оптимального значения коэффициента коррекции имеет большее

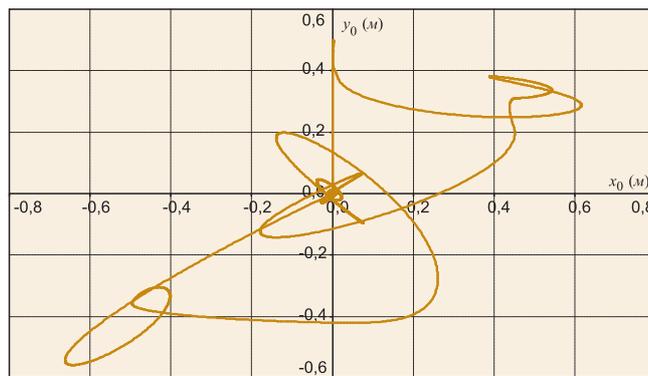


Рис. 2. Колебания груза в плоскости  $x_0, y_0$ , неподвижной относительно точки подвеса, в системе без коррекции

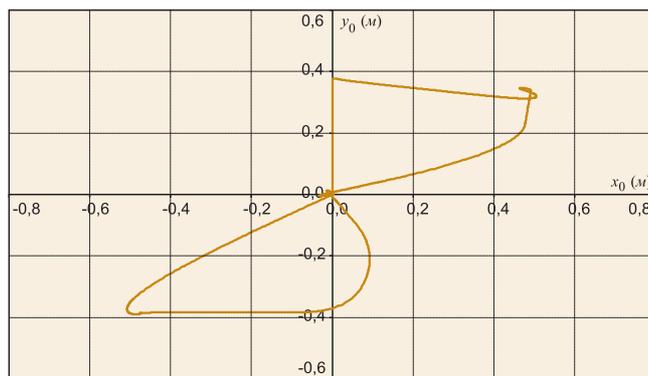


Рис. 3. Колебания груза в плоскости  $x_0, y_0$ , неподвижной относительно точки подвеса при введении в систему управления корректирующего сигнала

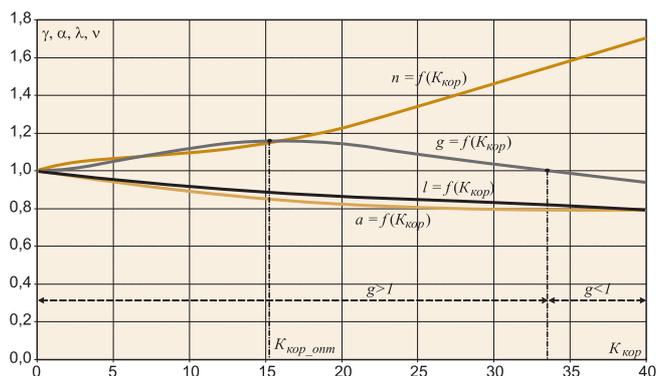


Рис. 4. Определение оптимального коэффициента коррекции

значение, чем в системе без коррекции (значение показателя качества больше единицы). Дальнейшее увеличение значения коэффициента коррекции приводит к ухудшению показателя качества, и при больших его значениях настройка системы будет хуже, чем в системе без коррекции ( $\gamma < 1$ ).

Таким образом, для заданной массы и длины подвеса существует такое значение коэффициента коррекции, при котором обеспечивается наилучшее соотношение степени снижений колебаний груза и увеличения времени переходного процесса. Следует отметить, что, даже если оптимальное значение коэффициента коррекции не определено (например, при неточности математической модели), то введение корректирующего сигнала в СР улучшает свойства системы при  $\gamma > 1$ .

На рис. 5 приведены кривые зависимостей показателя качества от длины подвеса и массы транспортируемого груза, рассчитанные по формуле (1), а также экспериментальные точки, соответствующие оптимальным значениям показателя качества.

Анализ графиков показывает, что экспериментальные и расчетные значения оптимального значения коэффициента коррекции практически полно-

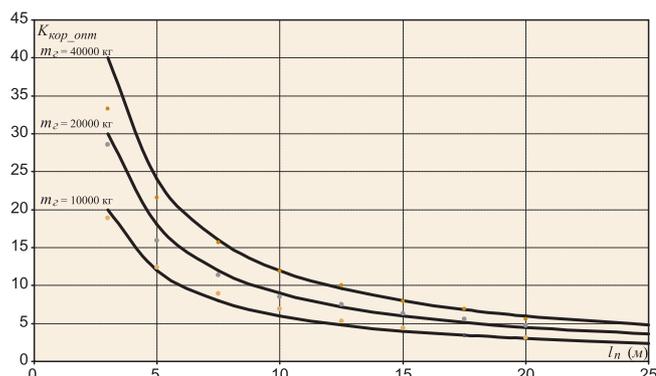


Рис. 5. Расчетные и экспериментальные зависимости оптимальных значений коэффициента коррекции от длины подвеса

стью совпадают. Таким образом, для определения оптимального значения коэффициента коррекции для СР привода тележки мостового крана справедлива формула (1). Аналогичные результаты были получены для электропривода моста, что подтверждает справедливость формулы (2).

Применение предлагаемого способа ограничения раскачивания груза с оптимальной настройкой блока ограничения колебаний позволит обеспечить быстрое гашение колебаний груза, транспортируемого мостовым краном, что упростит операции позиционирования груза и снизит нагрузку на привод и механическую конструкцию крана.

**Список литературы**

1. Масандилов Л.Б., Фесенко Ю.И. Анализ оптимального управления электроприводом механизма перемещения груза // Тр. МЭИ. 1975. Вып. 223.
2. Сериков С.А. Способ успокоения колебаний груза, транспортируемого мостовым краном // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. №9.
3. Терехов В.М., Осипов О.И. Система управления электроприводов. М.: Изд. центр "Академия". 2005.

**Щедрин Александр Васильевич** — канд. техн. наук, проф., директор Липецкого филиала

Международного института компьютерных технологий;

**Сериков Сергей Александрович** — канд. техн. наук, начальник бюро Центра автоматизации ТП;

**Колмыков Владимир Викторович** — инженер Дирекции по информационным технологиям ОАО "Новолипецкого металлургического комбината".

Контактный телефон (4742) 40-60-69. E-mail: kolmykov\_vv@mail.ru

**НОВАЯ КНИГА**

В издательстве "Горячая линия-Телеком" вышла книга

Денисенко В.В. "Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием".

2009 г. 608 стр.

Книга содержит систематическое изложение основных вопросов современной теории и практики промышленной автоматизации. Представлены самые необходимые для практики сведения с акцентом на детальный анализ наиболее сложных и часто неправильно понимаемых вопросов. Рассмотрены широко распространенные в России промышленные интерфейсы и сети, архитектура систем автоматизации и методы их защиты от помех, тонкие нюансы техники автоматизированных измерений, ПИД-регуляторы с автоматической на-

стройкой и адаптацией, структура и характеристики управляющих контроллеров, современные методы резервирования, средства программирования контроллеров, SCADA-пакеты и OPC серверы, юридические вопросы внедрения средств автоматизации, в том числе на опасных промышленных объектах.

Книга предназначена для специалистов по промышленной автоматизации, может быть полезна студентам старших курсов технических университетов.

Подробнее <http://www.RLDA.ru/book>