



OSTIS-2011

(Open Semantic Technologies for Intelligent Systems)

УДК 004.42:621.87

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ

А.П. Кузнецов (*kuznap@bsuir.by*)

А.В. Марков (*markov@bsuir.by*)

М.К. Хаджинов (*kafsu@bsuir.by*)

А.С. Шмарловский (*sas@bsuir.by*)

Т.В. Гаврилик (*a702@tut.by*)

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г.Минск, Республика Беларусь*

Проведен анализ современных алгоритмов управления подъемно-транспортными механизмами. Описаны интеллектуальные алгоритмы управления грузоподъемными механизмами, основанные на решении обратной задачи динамики и применении нечеткой логики. Алгоритмы снижают требования к квалификации операторов грузоподъемных механизмов и позволяют перенести "интеллект" обученного персонала на системы управления. Проведено исследование чувствительности алгоритма к вариациям параметров.

Ключевые слова: нечеткая логика, подавление колебаний, подъемно-транспортные механизмы, шейпинг-фильтры.

Введение

Высокая точность позиционирования (без раскачивания) необходима при монтаже технологического оборудования (турбины и генераторы электростанций, розлив жидкого металла на металлургических комбинатах, монтаж технологического оборудования на анкерные болты и т.д.). Кроме того, повышение точности перемещения грузов (контейнеров) актуально при загрузке/разгрузке судов, а также при работе современных контейнерных терминалов, поскольку значительно уменьшается время погрузки и разгрузки контейнеров. Достижимое повышение производительности влечет за собой снижение энергозатрат. Реализация алгоритмов и методов, предотвращающих раскачивание груза при его перемещении, позволяет существенно повысить точность позиционирования полезного груза, сокращает время этих процессов, значительно повышает безопасность работы подъемно-транспортных механизмов и ведет к снижению потребления электроэнергии, с другой стороны снижаются требования к квалификации операторов грузоподъемных механизмов. Таким образом, разработка алгоритмов управления, позволяющих перенести "интеллект" обученного персонала на системы управления, является актуальной задачей.

Подъемно-транспортные механизмы применяются практически во всех областях промышленности. Для транспортировки грузов в промышленности, на строительных площадках, складах и в портах широко используются подъемные краны. Подъемные краны различаются по конфигурации рабочей зоны, виду перемещаемых грузов и точности позиционирования. В зависимости от требований по данным характеристикам существуют различные типы конструкций кранов. Для перемещения тяжелых грузов чаще используют порталные (козловые) краны. Конструкция порталного крана предполагает наличие специальной тележки с прямолинейным движением по направляющим рельсам и троса, с помощью которого полезный груз крепится к тележке. Портальный кран может передвигаться

по рельсам, это позволяет осуществить транспортировку груза в любую точку трехмерного пространства в пределах рабочей зоны крана. Портально-поворотные краны чаще всего применяются в портах для загрузки кораблей, а также в качестве погрузочных кранов на железных дорогах. Преимущества портально-поворотного крана заключаются в относительно большой рабочей зоне при меньшей занимаемой площади. Поворотные башенные краны характеризуются значительной высотой и чаще всего применяются в таких условиях, когда груз должен главным образом перемещаться вертикально.

Экспериментальные исследования показывают, что даже прямолинейное движение тележки кранов с поступательными движениями сопровождается вибрационными процессами, такими как качание полезного груза, циклическое изменение линейной скорости тележки, колебания механических элементов крана и т.д. Эти процессы вызваны взаимодействием механизмов крана и качающегося груза и влияют на нагрузки в элементах машины, точность позиционирования, длительность транспортировки и безопасность эксплуатации. Ошибки управления подъемным краном могут привести к непоправимым последствиям. Система управления портальным краном должна обеспечить не только быстрое перемещение тележки в заданное положение, но и подавить колебания груза в конечной точке. Рост требований к надежности и производительности с одной стороны и точности позиционирования с другой предъявляют жесткие требования к системам управления. Качество функционирования во многом зависит от применяемых математических моделей поведения грузов при их транспортировке и алгоритмов управления. При этом, как правило, чем точнее используемая модель, тем сложнее система управления.

2. Математическое описание подъемно-транспортных механизмов

Подвижная часть подъемного крана представляет собой двухмассовую систему маятникового типа, состоящую из тележки и гибкой подвески рабочего органа с грузом (рисунок 1).

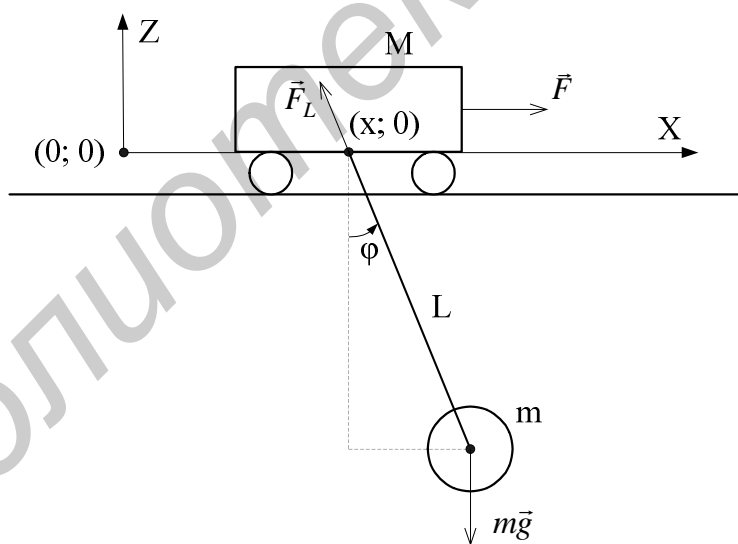


Рисунок 1 – Подъемно-транспортный механизм с двумя степенями свободы перемещаемого груза: L – длина троса; M – масса тележки; m – масса груза; φ – угол отклонения груза; x – расстояние от центра оси до точки подвеса груза; F – сила, действующая на тележку; F_L – сила, действующая на трос с грузом со стороны электропривода подъема

Для получения математического описания объекта управления можно воспользоваться как механикой Ньютона, так и уравнениями Эйлера–Лагранжа. С практической точки зрения второй путь гораздо легче, потому что в этом случае соответствующие обобщенные координаты q_i могут быть выбраны с учетом симметрий рассматриваемой двухмассовой системы. Математическая модель поведения груза при его перемещении для рассматриваемого

случая может быть описана системой двух нелинейных уравнений второго порядка [Кузнецов и др., 2009]:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{F_x + m \sin \varphi (L \dot{\varphi}^2 + g \cos \varphi - \ddot{L}) - 2F_L \cos^2 \varphi \sin \varphi}{M + m \sin^2 \varphi} \\ \ddot{\varphi} = \frac{-1}{L} (\ddot{x} \cos \varphi + 2\dot{L}\dot{\varphi} + g \sin \varphi - 2\frac{F_L}{m} \cos \varphi \sin \varphi). \end{cases}$$

Поднимать груз во время его перемещения в большинстве случаев необходимо лишь для того, чтобы избежать препятствий. Подъем обычно является медленным, а следовательно, изменения длины троса можно рассматривать как возмущения в системе. В этом случае полученной упрощенной системой уравнений можно пользоваться и при небольших скоростях изменения длины троса. Для малых углов колебаний при условии $\dot{L} \approx 0$ систему уравнений можно линеаризовать:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -L\ddot{\varphi} - g\varphi \\ \ddot{\varphi} = \frac{-F_x - (M + m)g\varphi}{ML}. \end{cases}$$

Большое количество промышленных мостовых и козловых кранов может перемещать груз с тремя степенями свободы, достигаемых перемещением тележки в продольном направлении, перемещением всего крана или его мостовой части в поперечном направлении и подъемом/опусканием груза. В этом случае математическая модель описывается системой четырех нелинейных уравнений второго порядка [Кузнецов и др., 2009]:

$$\begin{cases} (M + m)\ddot{x} + m(\ddot{L} - L\dot{\varphi}^2 - L\dot{\theta}^2) \sin \varphi \cos \theta + m(L\ddot{\varphi} + 2\dot{L}\dot{\varphi}) \cos \varphi \cos \theta - \\ - m(L\ddot{\theta} + 2\dot{L}\dot{\theta}) \sin \varphi \sin \theta - 2mL\dot{\varphi}\dot{\theta} \cos \varphi \sin \theta = F_x \\ (m + M)\ddot{y} + mL(\ddot{\theta} \cos \theta - \dot{\theta}^2 \sin \theta) + m\ddot{L} \sin \theta + 2m\dot{L}\dot{\theta} \cos \theta = F_y \\ (2\dot{L}\dot{\varphi} + L\ddot{\varphi}) \cos \theta - 2L\dot{\varphi}\dot{\theta} \sin \theta + \ddot{x} \cos \varphi + g \sin \varphi = 0 \\ 2\dot{L}\dot{\theta} + L\ddot{\theta} - \ddot{x} \sin \varphi \sin \theta + \ddot{y} \cos \theta + L\dot{\varphi}^2 \sin \theta \cos \theta + g \cos \varphi \sin \theta = 0, \end{cases}$$

где φ, θ – углы отклонения груза;
 x, y – координаты положения тележки;
 F_x, F_y – силы, действующие на тележку по соответствующим осям.

Математическая модель поворотного крана описывается системой достаточно громоздких нелинейных уравнений и является сложной для синтеза системы управления. Однако при небольших величинах углов и незначительном изменении длины подвеса уравнения можно упростить:

$$\begin{cases} M\ddot{x} + mg\varphi = F_x \\ L\ddot{\varphi} + g\varphi - \ddot{x} + L\dot{\gamma}\dot{\theta} = 0 \\ (J_0 + Mx^2)\dot{\gamma} - mgx\theta = T_\gamma \\ L\ddot{\theta} + g\theta + x\dot{\gamma} - L\dot{\gamma}\dot{\varphi} = 0, \end{cases}$$

где γ – угловая скорость башни;
 J_0 – момент инерции башни по вертикальной оси;
 T – сила (момент), действующая на башню.

Полученные математические модели позволяют сделать вывод, что динамическое поведение подъемного крана имеет нелинейные особенности. Подъемный кран в общем случае представляет собой нестационарный объект, особенно при изменении длины троса. Представленные математические модели подъемных кранов могут быть использованы как для моделирования процесса раскачивания груза при его перемещении в двухмерном и трехмерном пространствах, так и для разработки алгоритмов управления, позволяющих компенсировать

данные колебания. В случае, когда не допускается большая амплитуда колебаний, а скорость изменения длины подвеса небольшая, при проектировании алгоритмов управления можно воспользоваться линеаризованными передаточными функциями, учитывая изменение длины троса во время транспортировки.

3. Алгоритмы управления подъемно-транспортными механизмами

Алгоритмы управления подъемно-транспортными механизмами обычно являются многозадачными. Они должны быть быстродействующими, точными, робастными и по своей сути заменять действия обученного персонала, т.е. они должны обладать "интеллектом". Система управления должна переместить груз с максимально возможной скоростью, во время транспортировки минимизировать колебания груза и полностью подавить их в месте остановки. Также должны быть учтены возможные изменения параметров системы, такие как длина троса и вес груза. При разработке алгоритмов управления должны учитываться и вопросы практической реализации: мощность управляющего воздействия, максимальные ускорения и скорости и др. Для исключения возможности столкновений с препятствиями груз не должен выходить при транспортировке за пределы заданного коридора.

Система управления процессом перемещения груза может быть как разомкнутой, так и замкнутой. Разомкнутое управление характеризуется большей чувствительностью к изменениям параметров и возмущениям. При создании замкнутой системы управления возникает необходимость в соответствующих датчиках. Информацию о положении и скорости тележки обычно получают из системы управления электроприводом тележки. Сложнее получить информацию об угле отклонения груза. Можно использовать датчик технического зрения, однако недостатками видеосистемы являются сложность обслуживания и высокая стоимость [Kim et al., 2003]. При известной длине троса оценить угол отклонения можно по электромагнитному вращающему моменту и угловой скорости двигателя тележки, иными словами в структуру системы управления необходимо включить наблюдатель динамической нагрузки.

Взаимодействие между механизмом движения и подвешенным полезным грузом приводит к раскачиванию последнего. Если амплитуда колебаний превышает заданный предел, они должны быть подавлены или должна быть остановлена операция, пока колебания не прекратятся. В любом случае это приведет к ухудшению быстродействия системы. Эти проблемы заставили многих исследователей разработать алгоритмы управления, позволяющие автоматизировать операции подъемного крана. Однако большинство существующих схем не являются подходящими для практического применения. Поэтому большое количество промышленных подъемных кранов не автоматизировано и все еще зависит от действий человека. При этом обеспечить должную компенсацию колебаний в состоянии только высококвалифицированный оператор (крановщик).

Существуют различные способы управления подъемным краном, основанные как на разомкнутой системе, так и на системе управления с обратной связью. Автоматизацию подъемного крана можно разделить на два подхода. В первом подходе оператор сохраняется в цепи управления, а силы, перемещающие груз, определенным образом изменяются, чтобы облегчить работу оператора. Один путь состоит в том, чтобы добавить демпфирование, замыкая систему по углу колебаний груза и скорости его изменения. В этом случае производится коррекция траектории, заданной оператором. Второй путь состоит в том, чтобы избежать возбуждения груза около его собственной частоты, добавляя фильтр, чтобы удалить эту частоту из входного сигнала. Это приводит к запаздыванию между действием оператора и входным сигналом подъемного крана. Эта задержка может смутить оператора. Третий путь состоит в том, чтобы добавить механический поглотитель к структуре подъемного крана. Однако осуществление этого метода требует значительной мощности, что делает его непрактичным.

Во втором подходе оператор удален из цепи управления, и операция перемещения выполняется в автоматическом режиме. Это может быть сделано, используя различные способы. Первый способ основан на формировании траекторий, позволяющих переместить груз в точку назначения с минимальным раскачиванием. Эти траектории достигаются или

формированием специальным образом входного сигнала, или методами оптимального управления. Второй способ основан на обратной связи по положению и углу отклонения груза. Третий способ основан на разделении системы управления на две части: регулятор подавления колебаний и регулятор положения. Каждый разрабатывается отдельно, а затем объединяются, чтобы гарантировать работу системы с сохранением стабильности.

Применение как оптимальной по времени разомкнутой системы управления подъемным краном [Manson, 1982], так и разомкнутой системы управления, в которой входной сигнал формируется таким образом, чтобы при перемещении тележки в заданное положение не вызывать чрезмерных маховых движений полезного груза [Auerig et al., 1987], дает плохие результаты, так как управление без обратной связи чувствительно к изменению параметров системы (например, длины троса) и не может компенсировать влияние ветра. Эти методы также не могут предотвратить и остаточных колебаний груза.

Управление с обратной связью, как известно, менее чувствительно к изменениям параметров и возмущениям. Поэтому в большинстве исследований последних лет предложены алгоритмы замкнутого управления: от обычного ПИД-регулятора (пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора) до интеллектуальных подходов. В частности, Omer предложил ПД-регуляторы (пропорционально-дифференциальные регуляторы) как для позиционирования, так и для подавления колебаний [Ridout, 1989]. Однако известно, что управление положением с использованием ПД-регулятора не эффективно в устранении статической ошибки. Поэтому также был предложен и ПИД-регулятор для управления системой портального крана [Omer, 2003]. Однако работа регулятора ухудшается, когда происходит насыщение силового привода.

Для построения традиционных регуляторов необходимо иметь "точную" математическую модель объекта управления, а затем синтезировать регулятор, реализующий необходимый алгоритм управления. Так как математическое описание подъемного крана представляет собой систему нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений, выполнить синтез регулятора аналитическим путем сложно, эта задача может быть решена только для малых углов отклонения груза путем линеаризации соответствующих уравнений и "замораживания" их коэффициентов. Для систем такого типа предпочтительно использование нетрадиционных регуляторов. Как известно, для управления сложными процессами, когда не существует простой математической модели, можно использовать системы с нечетким управлением. В [Kim et al., 2003] описана система, в которой применили аппарат нечеткой логики как к устройству управления положением тележки, так и к демпфированию колебаний.

Рассмотренные выше способы управления привели бы к хорошей работе при условии использования точной модели и ее параметров в регуляторе. Однако известно, что моделирование является сложным и трудоемким. Кроме того, требуется идентификация тех параметров подъемного крана, которые невозможно измерить. Идентификация параметров – это тоже сложный и трудоемкий процесс. Кроме того, передовые регуляторы имеют тенденцию быть все более сложными и, соответственно, проблемными с точки зрения их реализации в масштабе реального времени. Очень часто настраивать такие регуляторы должны инженеры, не имеющие опыта в работе с подобными системами управления. Следовательно, простые конструкция и структура регулятора очень важны с практической точки зрения.

Недостатком замкнутых систем является потребность в датчиках положения тележки и угла отклонения груза. Кроме того, создание датчика измерения колебаний в реальной системе портального крана не является легкой задачей, так как есть спускоподъемный механизм на параллельном гибком подвесе. В некоторых исследованиях сосредоточились на схемах управления с видеосистемой, которая на практике нашла большее применение ввиду того, что не нужно располагать датчик на стороне груза. Недостатками управления с обратной связью на основе CCD-камеры (датчика технического зрения) являются сложность обслуживания и высокая стоимость.

В рассматриваемых случаях целесообразным представляется использование методики, основанной на измерении электромагнитного вращающего момента и угловой скорости двигателя и применении наблюдателя динамической нагрузки [Хаджинов и др., 2009]. Этот

метод позволяет оценить угол отклонения груза по доступной из силового привода информации и не требует применения дорогостоящих и технически сложных датчиков.

4. Алгоритмы управления подъемно-транспортными механизмами при отсутствии обратной связи по углу отклонения груза

Задача предотвращения возникновения колебаний груза в подъемно-транспортных механизмах может решаться двумя путями. Первый путь заключается в демпфировании колебаний замкнутой системой управления с использованием измерительных или оценивающих устройств угловой скорости и/или угла подвеса. Второй путь заключается в недопущении возбуждения колебаний путем установки в цепь разомкнутого управления формирующих фильтров (шейпинг-фильтров), настроенных на частоту колебаний груза.

Замкнутая система управления гасит все колебания груза, в том числе от ветровых и других возмущений, но подразумевает установку специальных датчиков. Разомкнутое управление с формирующим фильтром в принципе не может гасить никаких колебаний, оно лишь позволяет уменьшить эффект возбуждения колебаний в процессе управления, никаких дополнительных датчиков при этом не требуется.

Наибольшее распространение в системе без обратной связи по углу отклонения груза получили шейпинг-регуляторы (shaping control, shaper). Алгоритм их работы основан на временном перераспределении силового воздействия на тележку на этапах разгона и торможения при сохранении неизменной величины суммарного воздействия. За счет удлинения времени перехода тельфера или тележки с одной скорости на другую обеспечивается наложение колебаний груза, при этом сдвиг управляющего воздействия на период и/или полпериода вычисленных колебаний груза обеспечивает в идеальном случае полное их подавление.

Существует множество разновидностей шейпинг-алгоритмов. Наиболее распространенные: ZV-shaper (Zero-Vibration shaper), ZVD-shaper (Zero-Vibration and Derivative shaper), ZVDD-shaper (Zero-Vibration and Derivative-Derivative shaper), ZVDDD-shaper (Zero-Vibration and Derivative-Derivative-Derivative shaper), разновидности с одним, двумя и тремя горбами – EI-shaper (Extra-Insensitive shaper), инверсный по сравнению с EI – SI-shaper (Specified-Insensitivity shaper).

Для определения параметров ZV-шейпинг-фильтра используются следующие уравнения:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & K \\ 1+K & 1+K \\ 0 & \pi/\omega_d \end{bmatrix} \\ K = \exp\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) \\ \omega_d = \omega_n\sqrt{1-\zeta^2}, \end{cases}$$

где ζ – коэффициент демпфирования колебаний груза;

ω_n – частота колебаний груза;

A_i, t_i – амплитуда и время наложения колебаний.

Подавляющее большинство шейпинг-фильтров описывается такими же уравнениями и отличается лишь количеством коэффициентов A_i и t_i и формулами для их расчета. При этом время наложения колебаний t_i привязывается к периоду колебаний груза.

Анализ различных алгоритмов управления подъемно-транспортными механизмами позволяет сделать следующие выводы. Шейпинг-фильтры приводят к уменьшению амплитуды колебаний значительно быстрее, чем стандартные фильтры [Singhose et al., 1995]. Шейпинг-фильтры имеют длительность колебаний в пределах от 0,7 до 2,0 периодов, а стандартные фильтры: от одного до более чем 10 периодов колебаний. Большинство фильтров имеет показатель 3 периода и больше. Шейпинг-фильтры обладают большим быстродействием по

сравнению с традиционными цифровыми фильтрами, это объясняется особенностями их построения и изначальной (в отличие от стандартных фильтров) направленностью на решение рассматриваемых задач.

Несмотря на то, что сегодня наиболее распространенным способом подавления колебаний груза при отсутствии какой-либо информации об угле его отклонения является шейпинг-управление, этот метод имеет ряд недостатков: сложно учесть ограничения электроприводов грузоподъемных механизмов по ускорению, а дискретный характер наложения колебаний приводит к необходимости резкого изменения скорости, что неблагоприятно сказывается на силовой части. Применение же датчика интенсивности входного сигнала приводит к увеличению времени реакции системы, а сглаживание задающей скорости на выходе шейпинг-фильтра ухудшает его качественные показатели.

Для анализа работоспособности разрабатываемых алгоритмов был создан макет подъемного крана (рисунок 2).



Рисунок 2 – Экспериментальная установка

Для расчета разомкнутых систем обычно задаются желаемым законом изменения выходных координат крана и пересчитывают их во входные координаты. Такой пересчет является решением обратной задачи динамики математической модели крана и может рассматриваться как универсальная основа для вычисления сигнала формирующего фильтра. Решение обратной задачи динамики для вычисления сигнала управления может быть заменено замкнутой схемой, состоящей из единицы в прямой цепи и модели объекта управления с идеальным регулятором в цепи обратной связи. Такая схема позволяет решать задачу в реальном времени с помощью рекурсивного фильтра, отражающего желаемые динамические свойства крана с регулятором.

Описанный алгоритм неизменно дает результат в виде режекторного фильтра, настроенного на частоту колебаний груза. На рисунке 3 представлены переходной процесс по положению груза (а) и переходной процесс по углу отклонения груза (б) при совпадении реальной и расчетной длины подвеса.

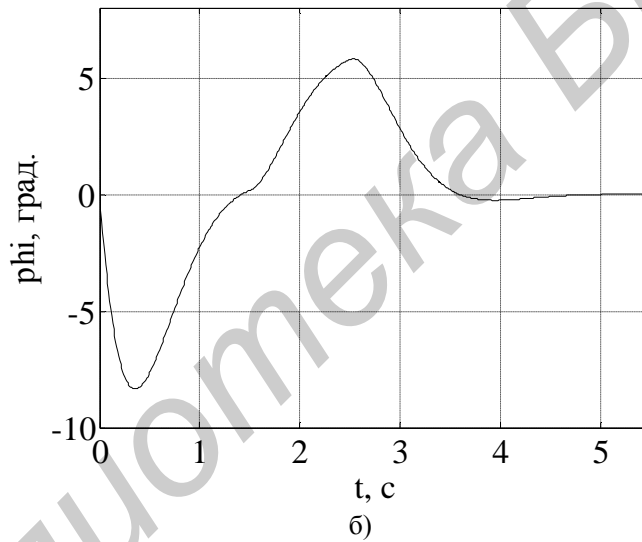
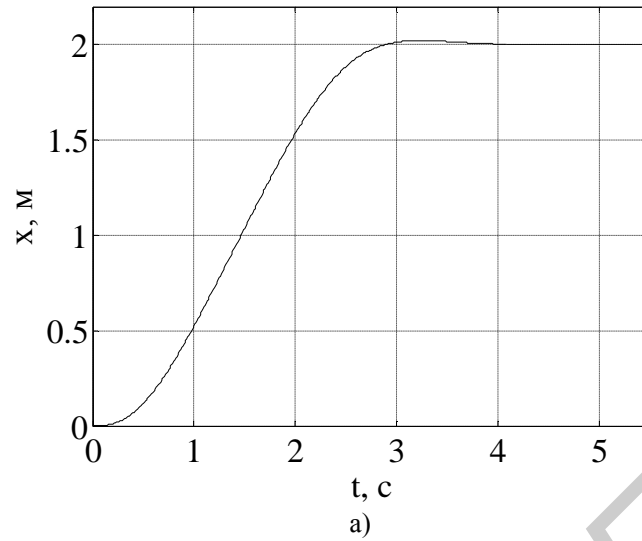


Рисунок 3 – Переходные процессы в системе

Проведенные исследования робастности системы управления позволяют сделать вывод, что наибольшее влияние на качественные характеристики системы управления оказывает изменение длины подвеса (частоты колебаний) груза. Вариация коэффициента демпфирования существенного влияния на остаточные колебания и длительность переходного процесса не оказывают. На рисунке 4 представлены графики изменения амплитуды остаточных колебаний (а) и времени успокоения груза (б) в зависимости от отклонения расчетной длины подвеса груза от ее реальной величины. Время успокоения груза измеряется в о.е., где 1 о.е. соответствует периоду недемпфированных колебаний. Амплитуда остаточных колебаний измеряется в процентах от амплитуды недемпфированных колебаний.

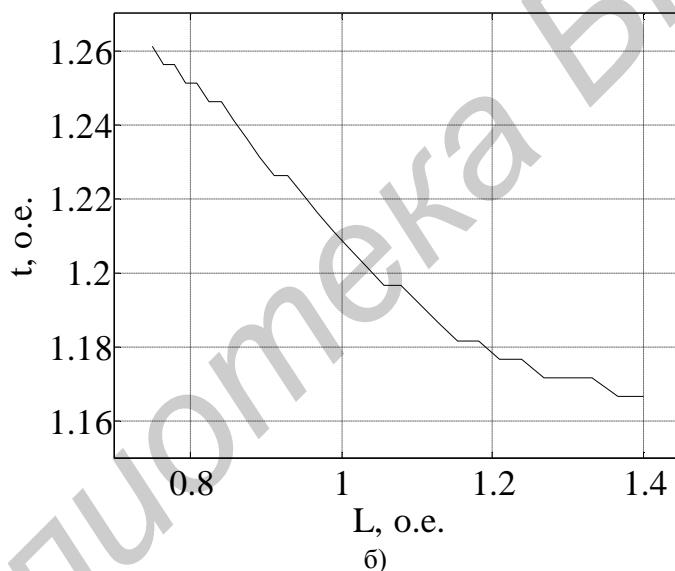
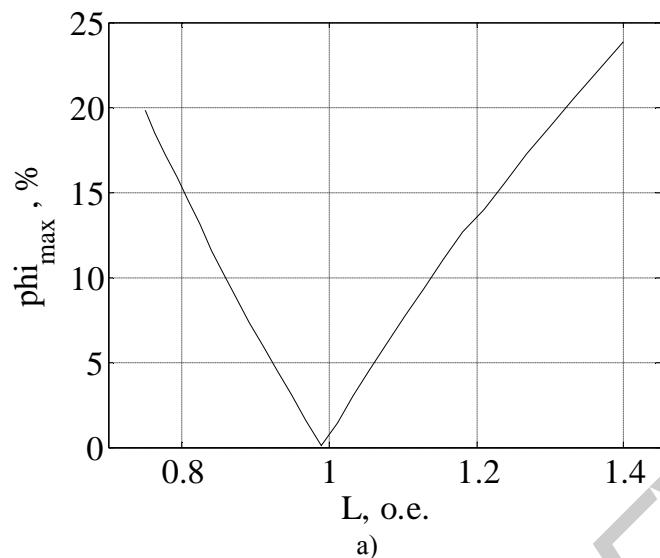
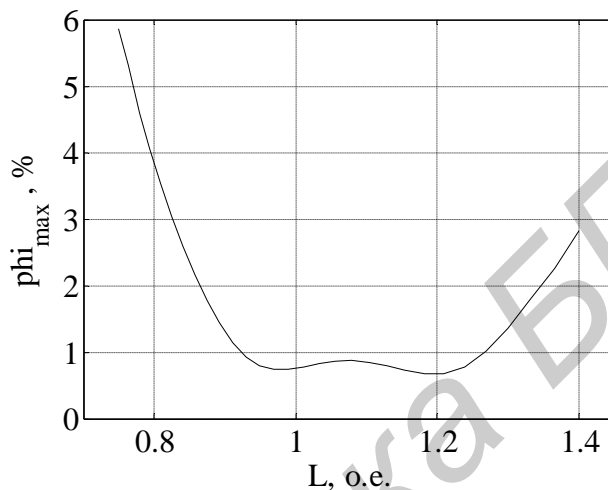


Рисунок 4 – Робастность алгоритма управления

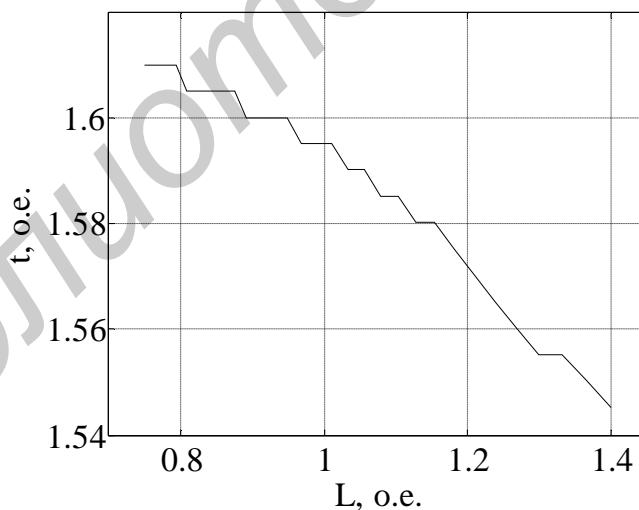
Можно выделить два подхода к управлению изменяющимися объектами: самонастройка с использованием максимальных возможностей системы управления и робастность со стабилизацией свойств по неблагоприятному варианту. Самонастройка требует решения в реальном времени задач идентификации объекта, перерасчета и перенастройки системы управления. При этом свойства системы будут близки к оптимальным, но будут изменяться, последнее обычно создает проблемы в процессе управления. Алгоритмы с неизменными параметрами, как правило, реализуют вариант для самого тяжелого случая параметров объекта с допустимыми, приемлемыми характеристиками системы. При благоприятном случае регулятор реализует практически тот же приемлемый вариант управления, однако не являющийся оптимальным. На рисунке 5 представлены графики изменения амплитуды остаточных колебаний (а) и времени успокоения груза (б) в зависимости от отклонения расчетной длины подвеса груза от ее реальной величины для случая применения двух фильтров, настроенных на разную частоту колебаний. В этом случае нет необходимости анализировать ситуацию и менять какие-либо параметры, а характеристики замкнутой системы

остаются практически стабильными. Таким образом, стабильность достигается настройкой системы управления на неблагоприятный вариант.

Более качественного управления как в системе с сигналом обратной связи, так и в разомкнутой системе можно добиться, если дополнительная информация будет поступать от крановщика (в частности, когда крановщик задает примерное расстояние до центра масс груза). Если система работает без сигнала обратной связи, то эта информация позволит уменьшить диапазон нечувствительности системы управления к изменению частоты собственных колебаний груза (при заданном допустимом уровне остаточных колебаний) и соответственно увеличить быстродействие системы.



а)



б)

Рисунок 5 – Робастность алгоритма управления с двумя фильтрами

К подъемно-транспортным механизмам предъявляются различные требования в зависимости от их типа и назначения. Для каждого конкретного случая требуется соответствующая настройка системы управления, при этом следует учитывать требования по быстродействию, точности позиционирования и амплитуде допустимых колебаний. В некоторых случаях определяющим является не качество подавления колебаний, а

долговечность механизмов. В такой ситуации первостепенной становится задача минимизации износа силовых элементов в процессе управления и, как следствие, возникают ограничения на реверс двигателя, что часто требуется для более качественного подавления колебаний груза.

Эффективным в этом случае является применение управления с нечеткой логикой функционирования (fuzzy-control), поскольку в системе с нечеткой логикой управления возможно учесть совокупность большого количества противоречивых факторов, влияющих как на точность позиционирования, так и на степень износа элементов системы: возникающие в процессе перемещения колебания груза и несущих частей подъемно-транспортных механизмов (башенных и козловых кранов), скорость ветра и его порывы (актуально для строительных кранов), изменяющаяся масса груза (при невозможности ее точного измерения) и т.д.

Применение системы с нечеткой логикой функционирования делает возможной настройку коэффициентов системы управления исходя из комплексного критерия, что позволяет с минимальными затратами приспособить алгоритм управления к конкретному применению.

В частности разработанный алгоритм может быть использован при синтезе системы управления электроприводами скоростных лифтов высотных зданий. У таких лифтов во время ускорения и замедления возникают продольные колебания кабины ввиду особенностей механической части [Хаджинов и др., 2010]. Представленные алгоритмы позволяют за счет подавления колебаний кабины лифта при ее перемещении повысить точность позиционирования на заданном этаже, уменьшить износ силовой части, увеличить комфорт пассажиров при перемещении, а также, как дополнительный эффект, снизить энергопотребление вследствие исключения затрат энергии на образование колебаний.

Заключение

Сравнение шейпинг-управления с разработанными алгоритмами позволяет сделать вывод, что шейпинг-фильтры не настолько эффективны для формирования управляющего воздействия по сравнению с непрерывными регуляторами. Разработанные алгоритмы обладают существенными преимуществами работы: требуют меньшего количества времени и обеспечивают низкие уровни остаточных колебаний. Качество их работы определяется точностью идентификации частоты колебаний груза (при наличии даже зашумленной информации о каком-либо параметре, связанном с частотой колебаний).

При отсутствии какой-либо информации система может быть реализована только с применением формирующего фильтра. Однако к его построению следует подходить путем преобразования разработанного регулятора для замкнутой системы. В этом случае качество работы регулятора будет зависеть от точности соответствия модели реальному объекту управления, и соответственно возникает вопрос обеспечения двух противоречивых требований: высокого быстродействия и слабой чувствительности к изменению параметров объекта управления. Однако описанный подход построения формирующего фильтра позволяет разработчику системы (наладчику) определить, какому из требований и в каком процентном соотношении отдать предпочтение (путем настройки соответствующих коэффициентов системы управления с нечеткой логикой функционирования). Таким образом, описанный подход построения регулятора при условии полного отсутствия какой-либо (даже косвенной) информации об объекте управления является более гибким; в этом случае необходимо только подстроить коэффициенты регулятора, а не переключаться на регулятор другой структуры. А наличие даже очень зашумленной информации об объекте управления позволит применить идентификацию (самонастройку) системы, при этом зашумленный сигнал обрабатывается специальным фильтром, учитывающим динамику управляемого объекта. На основе заложенной в устройство управления модели осуществляется фильтрация сигнала обратной связи, что и позволяет системе автоматически перенастраиваться.

Применение системы с нечеткой логикой функционирования позволяет путем моделирования процесса мышления человека (процедуры принятия им решения) осуществлять настройку коэффициентов системы управления исходя из комплексного критерия: с учетом времени перемещения, точности позиционирования, степени подавления колебаний, степени

износа силовых элементов, ограничений на реверс двигателя при переходе с одной скорости на другую и прочего. Применение нечеткой логики позволяет сократить сроки проектирования интеллектуальных систем и делает возможным компонентное (модульное) проектирование.

Ожидаемый эффект от применения разработанных алгоритмов заключается в уменьшении затрат времени при транспортировке грузов в цехах, при строительстве, загрузке/разгрузке кораблей и т.д., а также в создании высокоточных систем позиционирования технологического оборудования при монтаже турбин и генераторов электростанций, технологического оборудования на анкерные болты и т.д. Разработанные алгоритмы будут востребованы при создании систем розлива жидкого металла на металлургических комбинатах, систем перемещения грузов (контейнеров) при загрузке/разгрузке судов на современных контейнерных терминалах, систем управления приводами строительных кранов, обеспечивающих (повышающих) их безопасность при высотном строительстве, систем управления промышленными кранами на фабриках, загрузке-разгрузке опасных материалов на ядерных установках.

Применение разработанных алгоритмов в подъемных кранах приводит к следующим улучшениям:

- сокращение времени погрузочно-разгрузочных операций вследствие исключения времени на успокоение груза;
- повышение безопасности работы крана при транспортировке грузов вблизи препятствий;
- снижение утомляемости крановщика вследствие исключения необходимости совершать дополнительные маневры и уделять повышенное внимание для слежения за грузом;
- как дополнительный эффект – снижение энергопотребления вследствие исключения затрат энергии на образование колебаний и исключения лишних движений при маневрировании.

Библиографический список

[**Auernig et al., 1987**] Auernig J. W., Troger H. Time optimal control of overhead cranes with hoisting of the load // Automatica. 1987. Vol. 23. No. 4. P. 437–447.

[**Kim et al., 2003**] Kim Y. S., Yoshihara H., Fujioka N., Kasahara H., Shim H., Sul S. K. A new vision-sensorless anti-sway control system for container cranes // Industry Applications Conference. 2003. Vol. 1. P. 262–269.

[**Manson, 1982**] Manson G. A. Time-optimal control of and overhead crane model // Optimal Control Applications & Methods. 1982. Vol. 3. No. 2. P. 115–120.

[**Omar, 2003**] Omar H. M. Control of gantry and tower cranes. PhD Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia. 2003.

[**Ridout, 1989**] Ridout A. J. Anti-swing control of the overhead crane using linear feedback // Journal of Electrical and Electronics Engineering. 1989. Vol. 9. No. 1/2. P. 17–26.

[**Singhose et al., 1995**] Singer N., Singhose W., Seering W. Comparison of Filtering Methods for Reducing Residual Vibration // European Journal of Control. 1999. No. 5. P. 208–218.

[**Кузнецов и др., 2009**] Кузнецов А. П., Марков А. В., Шмарловский А. С. Математические модели порталных кранов: Доклады БГУИР, Минск, № 8, 2009. С. 93–100.

[**Хаджинов и др., 2009**] Хаджинов М. К., Шмарловский А. С. Система управления подъемным краном на базе квази-модального регулятора с функцией подавления колебаний перемещаемого груза: Доклады БГУИР, Минск, № 7, 2009. С. 38–43.

[**Хаджинов и др., 2010**] Хаджинов М. К., Шмарловский А. С. Демпфирование колебаний в электроприводе подъема груза: Материалы Восьмой МНТК. Минск, БНТУ, 2010. С. 252.