

УДК 62-531.7

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОДЪЕМНЫМ КРАНОМ НА БАЗЕ КВАЗИМОДАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА С ФУНКЦИЕЙ ПОДАВЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ПЕРЕМЕЩАЕМОГО ГРУЗА

М.К. ХАДЖИНОВ, А.С. ШМАРЛОВСКИЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 26 мая 2009*

Рассмотрены различные способы построения систем управления подъемным краном. Проведен анализ наиболее распространенных алгоритмов подавления колебаний перемещаемого груза. Предложен новый алгоритм управления краном на основе квазимодального регулятора, позволяющий предотвратить раскачивание полезного груза при его перемещении. Получены экспериментальные зависимости, характеризующие эффективность работы разработанного алгоритма.

*Ключевые слова:* кран, подавление колебаний, предотвращение раскачивания, квазимодальный регулятор.

### Введение

Подъемные краны широко используются в различных областях, таких как транспортировка тяжелых грузов и загрузка/разгрузка разнообразных материалов в верфях, промышленных заводах, на ядерных установках и при высотном строительстве. По конфигурации краны можно разделить на две основные группы: порталные и поворотные краны.

Портальные краны обычно используются на фабриках. Это обычный тип подъемного крана, используемого для перемещения полезного груза из одного положения в другое. Портальный кран включает тележку, которая передвигается в горизонтальной плоскости, и подвешенный к ней груз. Подвешенный на специальном тросе груз можно рассматривать как одномерный маятник с одной степенью свободы качания. Большинство же порталных кранов позволяет перемещать груз в двух взаимно перпендикулярных направлениях, а поэтому при одновременном движении в перпендикулярных направлениях подвешенный груз можно рассматривать как маятник с двумя степенями свободы.

Поворотные краны можно разделить на два типа: подъемные краны со стрелой, которые применяются в условиях нехватки свободной площади, и башенные краны, используемые в строительстве. В этих кранах точка приложения груза подвергается вращению. Для этой точки может существовать две степени свободы. В подъемных кранах со стрелой эта точка перемещается вертикально, тогда как в башенных кранах она перемещается горизонтально. При этом длина троса может быть увеличена или уменьшена. В этом случае трос и груз рассматривают как сферический маятник с двумя степенями свободы качания.

Транспортировка подъемным краном тяжелого груза вызывает качающееся движение последнего из-за ускорения и замедления тележки. Раскачивание груза влияет на точность позиционирования, безопасность в эксплуатации, нагрузку на элементы машины и т.д. Неподходящее управление может привести к тому, что несущие тросы оставят свои пазы, что, в свою очередь, может привести к серьезным повреждениям и нанести значительный урон. В большинстве случаев основной задачей системы управления подъемным краном является максимально быстрая транспортировка груза к целевому положению без значительного колебания

троса. В настоящее время подъемными кранами в большинстве случаев управляют, основываясь на одном только опытном знании, а, соответственно, разработка удовлетворительного способа управления, который может эффективно подавить влияние полезного груза во время его транспортировки, является актуальной.

### **Алгоритмы предотвращения раскачивания груза**

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 угаснут. В любом случае это потребует затрат времени, которые уменьшают пригодность системы. Эти проблемы заставили многих исследователей разработать алгоритмы управления, позволяющие автоматизировать операции подъемного крана. Однако большинство существующих схем не является подходящим 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 [1], 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 [2], 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, Otagi предложил ПД-регуляторы (пропорционально-дифференциальные регуляторы) как для позиционирования, так и для подавления колебаний [3]. 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 порталного крана [4]. 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. Nalley и Trabia [5] применили аппарат нечеткой логики как к устройству управления положением тележки, так и к демпфированию колебаний. Существуют также подходы, где нечеткую логику применяют только для подавления колебаний [6].

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.

### **Управление подъемным краном на основе квазимодалного регулятора**

Основным недостатком разомкнутых систем управления подъемным краном является высокая чувствительность к изменениям параметров системы, а поэтому отсутствие обратной связи на практике позволяет, в лучшем случае, только немного погасить колебания. Недостатком же замкнутых систем является потребность в датчиках положения тележки и угла отклонения груза. Кроме того, создание датчика измерения колебаний в реальной системе порталного 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 ССD-камеры (датчика технического зрения) являются сложность обслуживания и высокая стоимость.

В данной статье предлагается использовать методику, основанную на измерении электромагнитного вращающего момента и угловой скорости двигателя и применении наблюдателя динамической нагрузки. Этот метод позволяет оценить угол отклонения груза по доступной из силового привода информации и не требует применения дорогостоящих и технически сложных датчиков.

Математическая модель подъемного крана является достаточно сложной [3] и обладает сильно выраженными колебательными свойствами, а поэтому для достижения высоких показателей качества требуется достаточно сложная система управления. Из теории автоматического управления известно, что в этом случае эффективным может оказаться принцип модалного управления, при использовании которого объект управления (ОУ) замыкается по всем переменным состояниям, что дает возможность свободного управления корнями замкнутой системы. Однако на практике не все координаты могут быть доступны непосредственному измерению, поэтому для практической реализации модалного регулятора необходимо использовать наблюдающее устройство. Наблюдающее устройство, оценивающее полный вектор состояния ОУ, имеет ранг, равный рангу ОУ, а поэтому оказывается избыточным при наличии датчиков для некоторых переменных состояний. В этом случае целесообразно использовать редуцированное наблюдающее устройство.

На практике применение модалного регулятора часто является избыточным и приводит к значительному усложнению системы управления, что, в свою очередь, сказывается на надежности системы и устойчивости к вариациям параметров ОУ. Модалное управление изменяет расположение всех корней замкнутой системы, однако в подавляющем большинстве

случаев достаточно скорректировать только некоторые из них. Этого можно добиться, если применить гибкие обратные связи, которые, как известно, действуют только в переходных режимах, а в установившемся режиме как бы отключаются. Квазимодалный регулятор объединяет в себе положительные свойства принципа модалного управления и гибких отрицательных обратных связей и при этом имеет меньший порядок по сравнению с модалным регулятором.

### Моделирование

Моделирование системы управления электроприводом грузовой тележки подъемного крана проводилось в среде Matlab при следующих достаточно сложных с точки зрения управления условиях. Грузовая тележка массой 500 кг с грузом массой 4000 кг на подвесе длиной 10 м приводится в движение скоростным электроприводом подчиненного регулирования с внутренним контуром ускорения. Частота среза электропривода составляет  $30 \text{ с}^{-1}$  и имеются следующие ограничения: максимальная скорость движения тележки 0,5 м/с, максимальное ускорение –  $2 \text{ м/с}^2$ . Управление координатой груза производится при помощи программатора (задающего устройства) с ограничением по скорости в 65% и ограничением по ускорению в 85% от максимально возможных. Данные ограничения введены для сохранения способности компенсации ветровых возмущений, составляющих 10% веса груза.

Для данных условий была рассчитана передаточная функция непрерывного квазимодалного регулятора:

$$K(s) = \frac{48,78 s (s + 0,319) (s + 30,01)}{(s + 3,55) (s^2 + 5,22s + 35,43)}.$$

Дискретная передаточная функция регулятора с периодом дискретизации  $T = 0,2 \text{ с}$  имеет следующий вид:

$$K(z) = \frac{79,26 (z - 1) (z - 0,938) (z + 0,499)}{(z - 0,477) (z^2 - 0,690z + 0,444)}.$$

Последнее выражение используется при микропроцессорной реализации квазимодалного регулятора.

Результаты моделирования процесса перемещения груза на расстояние 15 м представлены на рисунке.

Процесс управления можно разбить на 4 участка.

1. Разгон тележки и груза с подавлением колебаний подвеса (0 – 12 с).
2. Реакция системы на попутный порыв ветра (12 – 27 с).
3. Реакция на изменение направления ветра с попутного на встречный (27 – 45 с).
4. Позиционирование груза в заданной точке (45 – 60 с).

На первом участке тележка сначала быстро разгоняется, что приводит к отклонению груза. Это заставляет тележку замедлиться и почти полностью остановиться, в результате чего груз начинает догонять тележку, которая, в свою очередь, плавно ускоряется и переходит на постоянную скорость движения 0,325 м/с. Угол отклонения в итоге уменьшается практически до нуля. На втором участке порыв попутного ветра приводит к отклонению груза, но на этот раз уже в противоположную сторону. Чтобы предотвратить неминуемое при постоянной скорости движения раскачивание груза, система управления замедляет тележку и, ввиду ее малой массы по сравнению с массой перемещаемого груза, даже заставляет ее некоторое время двигаться в обратную сторону. Такие действия позволяют стабилизировать угол отклонения подвеса на значении -0,1 рад. На третьем участке происходит изменение направления ветра. При этом сила, с которой ветер действует на груз, увеличивается в два раза. Это приводит к резкому уменьшению скорости груза. Чтобы компенсировать это возмущающее воздействие, система управления вынуждена несколько раз поменять направление движения тележки. На практике скорость стабилизации груза является функцией ограничений электропривода и коэффициентов запаса, заложенных в программаторе. На последнем участке тележка постоянно находится впереди груза и при этом плавно замедляется, не допуская раскачивания груза. Остановка тележки происходит в вынесенной вперед точке, поскольку учитывается влияние ветра. При исчезновении ветра тележка вернется назад, позиционируя груз в заданной точке. Данное свой-

ство компенсации не измеряемого ветрового возмущения основывается на совмещении качеств регулятора и контура ускорения (не контура тока) электропривода.

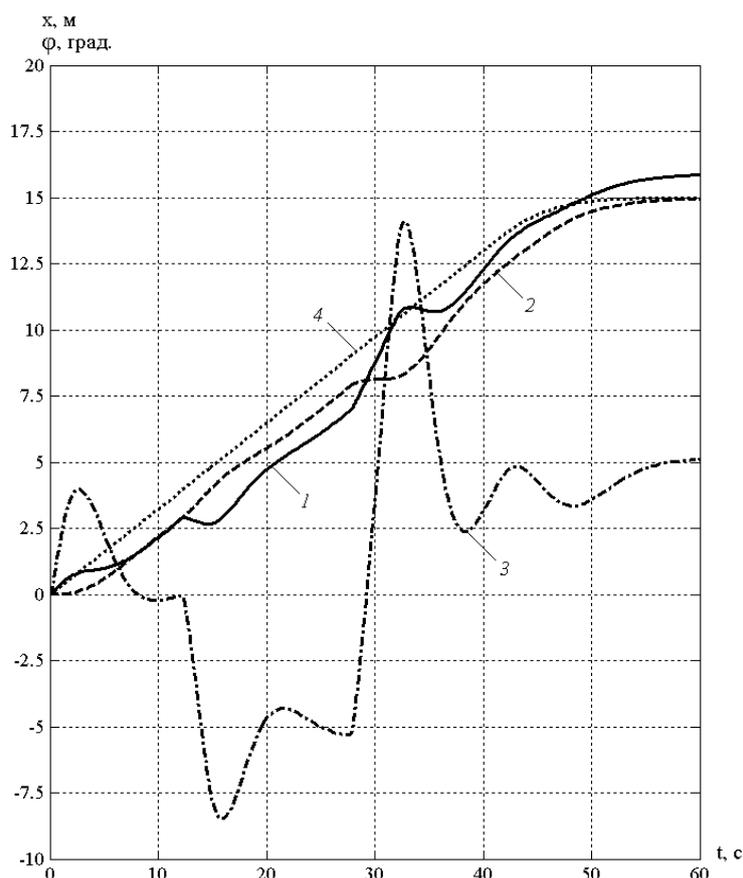


Рис. 1. Переходные процессы в системе управления подъемным краном: 1 – координата грузовой тележки, м; 2 – координата груза, м; 3 – угол отклонения подвеса, град.; 4 – выходной сигнал программатора, м

### Заключение

Разработанная на базе квазимодального регулятора стратегия управления обеспечивает высокое качество управления, хорошо компенсирует не измеряемые специальными датчиками ветровые возмущения. Размещение регулятора в цепи обратной связи обеспечивает малую чувствительность системы управления к изменению параметров подъемного крана. Регулятор не требует для реализации значительных вычислительных ресурсов, поскольку представляет собой дискретный фильтр третьего порядка с периодом дискретизации 0,2 с. Такое малое время дискретизации позволяет реализовать регулятор, используя лишь средства встроенного контроллера большинства современных электроприводов.

## ANTI-SWING CONTROL FOR AUTOMATIC CRANE SYSTEM USING A QUASI-MODAL CONTROLLER

M.K. KHAJYNAU, A.S. SHMARLOUSKI

### Abstract

Various ways of crane systems designing are considered. The analysis of the most widespread algorithms for reduction the load swing is carried out. A new strategy for control of crane using a quasi-modal controller is designed. The controller is designed to keep payload swing small during the

transfer process. The experimental data which characterize an operating efficiency of the designed controller are gained.

### Литература

1. Auernig J.W., Troger H. // International Federation of the Automatic control. Automatica. 1987. Vol. 23. No. 4. P. 437–447.
2. Singhose W.E., Porter L.J., Seering W.P. // Proceedings of the American Control Conference. 1997. P. 97–100.
3. Omar H.M. Control of gantry and tower cranes. PhD Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia. 2003.
4. Wahyudi, Sato K., Shimokohbe A. // Robotics and Autonomous System. Elsevier. 2005. Vol. 52. Issues 2-3. P. 247–256.
5. Nalley M.J., Trabia M.B. // Journal of Intelligent Fuzzy System. 2000. Vol. 8. P. 1–18.
6. Wahyudi, Jalani J., Muhida R. Salami M.J.E. // International Journal of Applied Engineering Research. 2007. Vol. 4. No. 4. P. 447–456.