

УДК 681.511-047.26:621.873

ОЦЕНКА И КОМПЕНСАЦИЯ АПОСТЕРИОРНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОЖИДАНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В СИСТЕМЕ МОДАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ В ПРИЛОЖЕНИИ К УСТАНОВКАМ МОСТОВЫХ КРАНОВ

М.К. ХАДЖИНОВ, В.А. ШЕВЕЛЕВА

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

Поступила в редакцию 24 апреля 2015

Задача оценки и компенсации математического ожидания случайных возмущений, воздействующих на объект управления, решается с помощью регулятора с модальным управлением, основанном на расширенной эталонной модели, которая оценивает переменные состояния объекта управления и величину возмущений, воздействующих на объект управления, позволяя их компенсировать. Проведенные эксперименты показывают, что система оценивает величину математического ожидания и компенсирует возмущения.

Ключевые слова: модальное управление, эталонная модель, случайные возмущения, оценка математического ожидания.

Введение

Данная статья посвящена решению проблемы точности и плавности перемещения груза крановыми установками. Для увеличения производительности крановых установок желательно перемещение с наибольшими ускорениями и скоростями, что вызывает раскачивание груза. Колебания груза на тросовом подвесе практически не демпфируются воздушной средой. Одна из задач – быстрое управление точкой подвеса груза без его раскачивания. Другой причиной раскачивания груза будут случайные порывы ветра, действующие на груз и конструкции крана. Проблема гашения колебаний груза усугубляется отсутствием непосредственных датчиков измерения отклонения подвеса груза из-за их нетехнологичности и ненадежности. Раскачивание груза не только снижает производительность крановой установки, но и может привести к аварии. Поэтому разработка алгоритмов управления грузовой тележкой и мостом предотвращающих колебания груза, что является важной и актуальной задачей. При этом ключевым моментом решения задачи управления является получение оценок переменных состояния подвеса, а также случайных и детерминированных возмущений по косвенным измерениям.

Обзор имеющихся разработок

Рассмотрим одну из трактовок задачи управления в условиях воздействия внешней среды [1]. В работе есть раздел, посвященный синтезу оптимальных законов управления технологическими процессами. Автор рассматривает способы управления с учетом случайных факторов, воздействующих на процесс. Отмечается, что невозможно контролировать все параметры технологического процесса, поскольку не всегда возможно установить соответствующие датчики. Но даже если измерение возможно, оно происходит с большими погрешностями. Зачастую измерения представляют собой функции переменных состояния и содержат случайные ошибки. Кроме этого, сама система подвержена воздействию случайных возмущений.

Таким образом, для обеспечения оптимального управления необходимо оценивать переменные состояния либо по слишком малому, либо по слишком большому числу измерений, которые сами являются неточными и представляют собой функции переменных состояния. Оцененные значения переменных состояния можно получить, применяя фильтр Калмана-Бьюси, состоящий из модели управляемого объекта и окружающей среды, охваченных линейно-квадратичным регулятором.

Комбинация оптимального фильтра и оптимального детерминированного регулятора является регулятором с обратной связью, оптимальным в смысле среднего по ансамблю для линейной задачи с квадратичным функционалом и аддитивным гауссовским белым шумом. Оказывается, что при этом линейная обратная связь такая же, какой она получилась бы при отсутствии помех и точном измерении состояния системы. Линейная обратная связь находится, как и прежде, путем решения задачи детерминированного управления. Условное среднее значение состояния характеризуется выходной переменной фильтра Калмана-Бьюси, который по существу представляет математическую модель системы, когда управление осуществляется по наблюдениям. Характеристики фильтра зависят от помех и динамических свойств системы, но не зависят от критерия качества системы управления.

Задача прогнозирования и проблема управления по квадратичному критерию представляют собой математически двойственную задачу. Если одна из них решена, то, обращаясь к принципу двойственности, легко решить другую задачу. Для решения задач фильтрации и детерминированного управления могут быть использованы одни и те же программы для вычислительных машин.

Поскольку переход к системам со многими переменными не вызывает трудностей, то линейная стохастическая теория управления представляет собой мощное средство решения задач управления. Для решения уравнений Риккати, соответствующих оптимальной стратегии управления, известны численные методы проектирования систем управления.

В этой же работе [1] указывается, что обнуление матрицы обратных связей модели окружающей среды в фильтре Калмана-Бьюси позволяет решать задачу оптимального управления для возмущений с низкочастотным спектром.

Постановка задачи

В работе используется вышеизложенный подход к упрощению модели окружающей среды в фильтре Калмана-Бьюси. При этом задача оптимального управления и оптимального оценивания возмущения объекта управления окружающей средой не ставится. Считается достаточным точное оценивание возмущений наблюдателем со структурой фильтра Калмана-Бьюси и их компенсацию для установившегося процесса управления. То есть считается достаточным придание системе управления свойства астатизма по отношению к возмущению случайным и детерминированным воздействиями окружающей среды без использования специальных измерительных средств. Компенсатор возмущений легко встраивается в модальный регулятор контура управления.

Для заявленного технического приложения модель процессов управления грузом на подвесе сводится к управлению положением точки подвеса двумя электроприводами. Датчики положения груза относительно точки подвеса обычно не устанавливаются и не используются по технологическим причинам. Штатные датчики скорости электроприводов крановой установки принципиально могут их заменить, так как относительные координаты груза наблюдаемы в сигналах датчиков электроприводов.

Чтобы получить оценки координат груза в наблюдателе, в общую модель объекта следует включать как модель подвеса, так и электроприводов. Собственные числа модели подвеса и электропривода отличаются в 1000 и более раз. Поэтому порядок модели электропривода может быть уменьшен до единицы. Что фактически приводит к реализации идеи квазимодального регулятора [2]. При использовании безынерционной модели электропривода наблюдаемость переменных модели подвеса в сигналах датчиков скорости электроприводов исчезает.

Внесем ряд уточнений в традиционное математическое описание модели динамики объекта управления:

$$\dot{x}_1 = Ax_1 + Bu + Gv$$

$$y_1 = C_1x_1 + w_1,$$

и модели внешнего воздействия окружающей среды:

$$\dot{x}_2 = Ex_2 + Fn,$$

$$v = Hx_2.$$

Здесь: x_1 – 3-мерный вектор состояния: скорость тележки, скорость груза, отклонение груза; u – управление электроприводом тележки; v – вектор возмущений; y_1 – измерение скорости тележки; w_1 – шум измерения; x_2 – скалярное возмущение; $E = 0$; $H = 1$; $G = B$; n – вектор белого шума с нулевым средним значением; измерений возмущений не производится.

Разумно задать коэффициенты целевой функции квадратичного критерия качества для расчета линейно-квадратичного регулятора крайне затруднительно. Более того, рассчитанный линейно-квадратичный регулятор обязательно изменит частоту колебаний подвеса в сторону ее увеличения, путем чрезмерно интенсивных перемещений точки подвеса электроприводами. Что неизбежно отрицательно скажется на энергосбережении и безопасности эксплуатации крана.

В отличие от линейно-квадратичных регуляторов модальные регуляторы позволяют формировать систему управления более тонко и целенаправленно. Например, для крановой установки представляется нецелесообразным вводить изменение собственных частот колебаний электропривода и подвеса, а следует лишь добавить демпфирование колебаний подвеса до желаемого значения. Поэтому разумным представляется использование модальных регуляторов, как в контуре управления, так и в контуре оценивания. При этом в контуре оценивания следует сохранить структуру фильтра Калмана-Бьюси для возможности оценивания внешних возмущений без установки дополнительных датчиков.

Ранее авторами были разработаны алгоритмы [3–6] увеличения порядка астатизма по возмущению в системе управления с модальным регулятором без изменения порядка астатизма по управлению. Для достижения этого в контур оценивания вводится дополнительный интегратор для оценивания величины возмущений окружающей среды, действующих на объект управления в разных точках. На выходе этого интегратора формируется апостериорная оценка математического ожидания случайных возмущений. С целью упрощения компенсатора возмущений (сведения его коэффициента к единице) оценивание приводилось ко входу модели объекта управления [5].

Схема системы управления одной степенью свободы крановой установки с оцениванием и компенсацией внешних возмущений приведена на рис. 1.

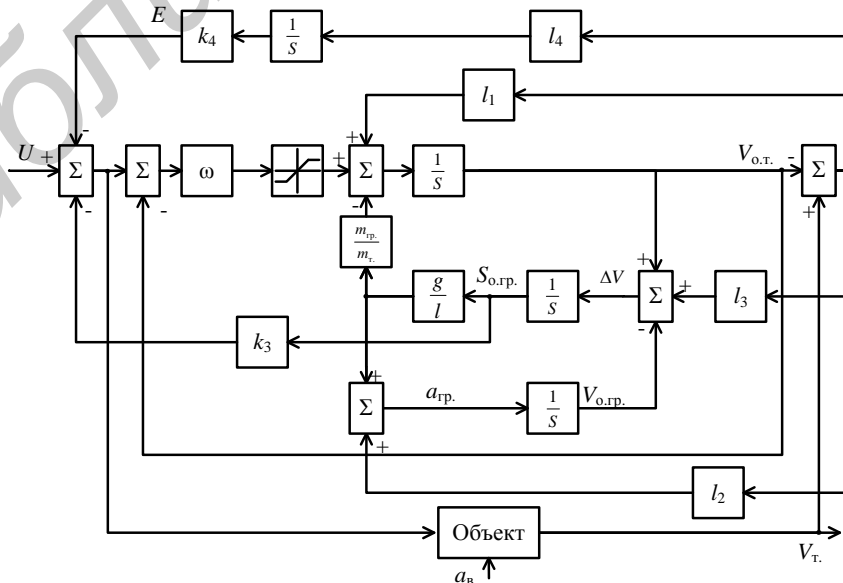


Рис. 1. Структурная схема системы управления с оцениванием и компенсацией внешних возмущений

На схеме рис. 1 приняты следующие обозначения: $m_{гр.}$ – масса груза; $m_{т.}$ – масса тележки; l – длина подвеса; g – ускорение свободного падения, $9,81 \text{ м/с}^2$; ω – частота привода; k_3, k_4 – третий и четвертый коэффициенты модального регулятора контура управления соответственно, $k_4 = 1$; l_1-l_4 – коэффициенты модального регулятора контура оценивания.

На выходах интеграторов формируются оценки: скорости грузовой тележки, отклонения груза от точки подвеса, скорости груза, внешнего возмущения.

Суть работы регулятора заключается в следующем: сигналы с выхода объекта и выхода эталонной модели объекта сравниваются, и сигнал сравнения используется при выработке управляющего сигнала. Разность этих сигналов подается на вход регулятора контура оценивания, в котором используется модальный регулятор. Для оценивания ветрового возмущения к входу модели контура оценивания подключен интегратор, определяющий величину возмущения. Для всех действующих на объект управления случайных возмущений на выходе интегратора формируется апостериорная оценка их математического ожидания. Для компенсации возмущения с выхода этого интегратора подаются компенсирующие сигналы на вход объекта. Такая схема, как было показано ранее, обеспечивает астатизм первого порядка по возмущению [4]. Кроме этого было показано, что данная схема позволяет оценивать и компенсировать математическое ожидание случайных возмущений, воздействующих на объект управления.

С помощью моделирования в Matlab были решены следующие задачи. Во-первых, исследованы компенсации нескольких возмущений (как случайных, так и детерминированных), приложенных к объекту управления в разных точках. Во-вторых, изучено влияние компенсатора при параметрическом возмущении, т. е. при несоответствии длины подвеса в модели и реальной длине подвеса, а также массы груза в модели и реальной массе груза. В-третьих, сопоставлена способность исследуемого регулятора оценивать величину математического ожидания нестационарного случайного воздействия с оценкой по стандартной процедуре на основе апериодического звена.

Программа исследования

Программа исследования включает следующие этапы.

1. Исследование системы при воздействии нескольких возмущений, приложенных в разных точках к объекту. Данное исследование включает в себя:

– проверку при приложении постоянного возмущения к тележке и случайного к грузу.

При этом происходит компенсация и оценивание величины возмущений;

– проверку при подаче случайного возмущения к тележке и постоянного к грузу;

– проверку при подаче случайных возмущений и к тележке, и к грузу.

2. Исследование системы при параметрическом возмущении, включающее:

– проверку работы системы при несоответствии длины подвеса модели и объекта;

– проверку при несоответствии массы груза модели и объекта.

3. Сравнение способности апериодического звена со способностью исследуемого регулятора оценивать математическое ожидание случайных возмущений, включающее:

– исследование системы при случайном возмущении с постоянным математическим ожиданием, приложенном к грузу;

– исследование системы при случайном возмущении с линейно нарастающим математическим ожиданием, приложенном к грузу.

Моделирование производилось для следующих значений параметров: длина подвеса

$l = 1,5 \text{ м}$, отношение массы груза к массе тележки $\frac{m_{гр.}}{m_{т.}} = 3$, частота привода $\omega = 2500 \text{ с}^{-1}$,

случайные процессы с математическим ожиданием, равным 1, и среднеквадратичным отклонением, равным 1.

Воздействие нескольких возмущений и параметрических возмущений

Авторами проведена серия экспериментов, в которых возмущения прикладывались к разным точкам системы: к грузу, к тележке, а также различным образом изменялись параметры объекта, такие как длина подвеса и масса груза. Увеличение массы груза производилось до 30 % и уменьшение до 20 %. Изменение длины груза производилось в пределах 30 %. Математическое ожидание возмущений принималось равным 1, задающее воздействие также равно 1. На рис. 2 приведены некоторые из результатов, соответствующие скорости груза при воздействии возмущений на груз и тележку и параметрических возмущениях, а также при параметрических возмущениях при отсутствии внешних воздействий.

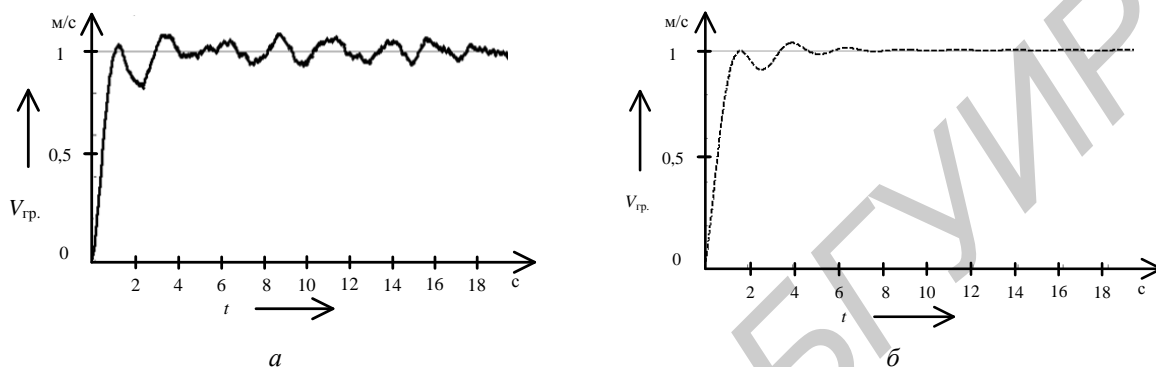


Рис. 2. Скорость груза *a* – при возмущениях в нескольких точках и параметрическом возмущении; *б* – при параметрическом возмущении

Серия экспериментов с разными соотношениями длин подвеса груза и массы груза модели и объекта показали, что при небольших отклонениях параметров модели от параметров объекта результат работы системы удовлетворительный.

Сравнение свойств исследуемой системы оценивания при нестационарном воздействии со стандартной процедурой на основе апериодического звена

На рис. 3 показаны результаты оценки нестационарных случайных возмущений, приложенных к грузу, с нарастающим математическим ожиданием исследуемой системой управления и апериодическим звеном:

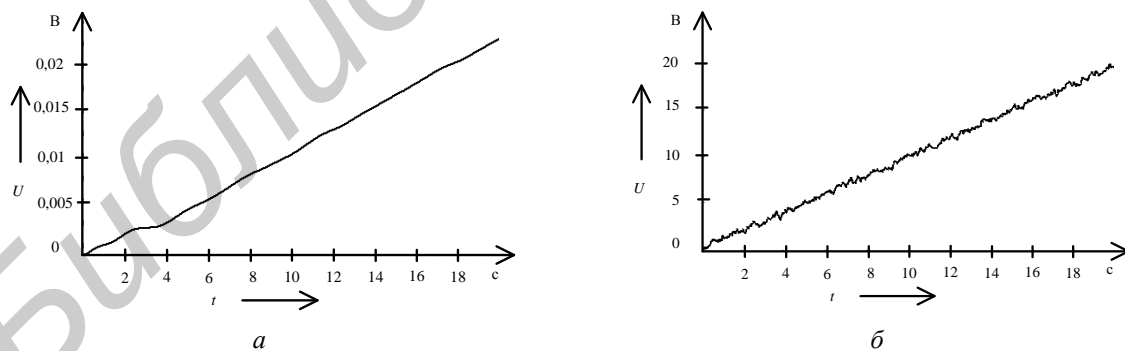


Рис. 3. Оценка возмущения *a* – системой; *б* – апериодическим звеном

Видно, что на выходе оценивающего возмущение интегратора мы получаем оценку математического ожидания с коэффициентом 0,001125. Это число соответствует пересчету случайного воздействия на вход электропривода тележки по формуле: $\frac{m_T}{m_T \cdot \omega}$. Следует отметить, что оценка математического ожидания нечувствительна к дисперсии случайного процесса.

Заклучение

Как видно из проведенных экспериментов с моделью разработанной системы управления:

– наблюдатель, построенный как аналог фильтра Калмана-Бьюси, дает апостериорные оценки математического ожидания случайных возмущений, оценивает суммарное воздействие нескольких детерминированных возмущений;

– компенсатор, встроенный в модальный регулятор, справляется со случайными и детерминированными возмущениями, и обеспечивает астатизм системы управления к возмущающим воздействиям;

– оценщик возмущений и их компенсатор хорошо справляются с нестационарными случайными и детерминированными возмущениями,

– разработанная система управления подвесом кранового устройства не использует специальных датчиков координат подвеса, а базируется на датчике скорости электропривода перемещения точки подвеса груза;

– разработанная система управления подвесом кранового устройства даже при несоответствии модели параметрам кранового устройства сохраняет работоспособность и свойство точно компенсировать внешние возмущения.

ESTIMATION AND COMPENSATION OF POSTERIORI MATHEMATICAL EXPECTATION OF RANDOM PERTURBATIONS IN MODAL CONTROL SYSTEM IN APPLICATION OF BRIDGE CRANES

M.K. KHAJYNAU, V.A. SHEVELEVA

Abstract

The problem of estimation and compensation of the mathematical expectation of random perturbations that effect the controlling object is solving by modal control based on extended object's model which estimates object's state variables and the value of perturbations that effects object and therefore allows to compensate them. Experiments show that system estimates the value of mathematical expectation and compensates perturbations.

Список литературы

1. Пузырев В.А. Управление технологическими процессами производства микроэлектронных приборов. Москва, 1984.
2. Хаджинов М.К. // Докл. БГУИР. 2010. № 8. С. 33–37.
3. Булига М.И., Шевелева В.А. // Матер. 49-й научн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Информационные технологии и управление». Минск, 6–10 мая 2013 г. С. 66.
4. Хаджинов М.К., Булига М.И., Шевелева В.А. // Матер. Междунар. научн. конф. «Информационные технологии и системы». Минск, 23 октября 2013. С. 88–89.
5. Шевелева В.А. // Матер. 50-й научн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. Минск, 24–28 марта 2014 г. С. 85.
6. Хаджинов М.К., Шевелева В.А. // Матер. междунар. научн. конф. «Информационные технологии и системы». Минск, 29 октября 2014 г. С. 82–83.