

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ГРУЗОВОЙ ТЕЛЕЖКИ МОСТОВОГО КРАНА В РЕЖИМЕ ПОДАВЛЕНИЯ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА

М.С. Корытов

Решена последовательность задач однопараметрической оптимизации для нахождения программного управления точкой подвеса груза мостового крана в задаче терминального наведения. Рассмотрена проблема раскачивания груза, перемещаемого мостовым краном. Предложен способ решения задачи перемещения грузовой тележки мостового крана на заданное расстояние, при котором происходит полное подавление неуправляемых маятниковых пространственных колебаний груза на канатном подвесе. Применен принцип пересчета временной зависимости углов отклонения грузового каната от вертикали в зависимости ускорений, скоростей и перемещений точки подвеса груза на грузовой тележке. Учтены кинематические ограничения на перемещения точки подвеса груза в виде максимально достижимых ускорений и скоростей моста и грузовой тележки крана.

Ключевые слова: мостовой кран, траектория груза, гашение колебаний, раскачивание.

ВВЕДЕНИЕ

Перемещение грузов мостовыми кранами (МК) с нежестким канатным подвесом груза вызывает маятниковые колебания груза, в которых присутствует неуправляемая компонента. Колебания значительно увеличивают время цикла МК, снижают производительность и безопасность работ [1–3]. Возрастает опасность столкновения груза с объектами, присутствующими в зоне перемещений, при этом вероятны повреждения груза, других объектов и самого МК. В связи с этим целесообразно полное подавление неуправляемой компоненты маятниковых колебаний груза как при его перемещении, так и при достижении грузом целевой точки [4]. Особенно это актуально при перемещении опасных грузов: емкостей с жидким металлом, горючими жидкостями и др.

Нормированные управляемые отклонения грузового каната МК от гравитационной вертикали при перемещении грузов необходимы. Сообщить грузу горизонтальные ускорения без отклонений

грузового каната от вертикали невозможно. Но при этом целесообразно, чтобы указанные отклонения были кратковременными и не превышали заданных пределов.

Известны аналитические зависимости оптимального и квазиоптимального режимов управления маятниковой системой с подвижной точкой подвеса для задачи наискорейшего разгона (торможения) с гашением колебаний [4]. На скорость и ускорение точки подвеса наложены ограничения. Недостаток известного способа: рассмотрение только малых колебаний маятника вокруг положения равновесия, отсутствие определенного (предельного) значения угла отклонения грузового каната МК от вертикали. Оптимальное управление носит релейный характер: ускорение точки подвеса принимает лишь граничные значения. Гашение колебаний маятника происходит не на всем интервале времени рабочего цикла, а лишь к концу разгона или перемещения системы [4].

Известны работы по решению задачи быстрого действия для нелинейного маятника (приведение нелинейного маятника в устойчивое нижнее поло-



жение равновесия) [5, 6]. Однако рассматривается система с неподвижной точкой подвеса и приложенным по угловой координате маятника моментом. Кроме того, в известных работах не учитывается диссипация энергии. Уравнения маятника с фиксированной точкой подвеса не подходят для описания рассматриваемой в настоящей работе задачи как по структуре, так и по входящим в них параметрам.

При решении задачи гашения колебаний грузов на канатном подвесе с подвижной верхней точкой подвеса (с подвижным основанием) находят применение такие современные подходы, как применение ПД- и ПИД-регуляторов [7–11], аппарата нечеткой логики [3, 12] и shaping-алгоритмов [13, 14]. В соответствии с ними осуществляется управление траекторией верхней точки подвеса груза.

Известные способы при всех своих различиях имеют, в понимании автора, общий недостаток — сравнительно большую погрешность реализации как угла отклонения грузового каната МК от вертикали, так и линейных координат перемещения груза. Неуправляемая компонента маятниковых колебаний груза подавляется не полностью. Время перемещения при гашении колебаний, как правило, увеличивается.

Целесообразна разработка такого алгоритма, который при заданных ограничениях в виде максимальных скорости и ускорения подвижной точки подвеса груза на МК (грузовой тележки) синтезировал бы непрерывное (бесступенчатое, не релейное) управление точкой подвеса при помощи частотно-регулируемых приводов МК. Такими приводами оснащается ряд изготавливаемых в настоящее время МК. Алгоритм должен также учитывать возможность больших углов отклонения грузового каната от гравитационной вертикали, что позволит повысить скорость перемещения и производительность МК. На предельный угол отклонения грузового каната в процессе разгона и торможения МК также должны быть наложены жесткие ограничения в виде его точного достижения. Выполнение этого условия повысит производительность МК с учетом достижения максимальных значений скорости и ускорения подвижной точки подвеса.

1. ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Принята математическая модель плоского маятника с подвижной точкой подвеса. В процессе вычислительных экспериментов было установлено, что для малых значений углов отклонения каната (менее 5°) пространственные колебания груза

могут быть со сравнительно небольшой погрешностью представлены как суперпозиция колебаний в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Для системы плоского маятника были приняты обозначения: m — масса груза, кг; L — длина грузового каната МК от подвижной точки подвеса на грузовой тележке (центр блока роликов полиспаста) до центра масс груза, м; b — приведенный к угловой координате коэффициент вязкого трения, задающий меру диссипации энергии, Н · м · с/рад; q, \dot{q}, \ddot{q} — угол отклонения грузового каната МК от гравитационной вертикали и его первые две производные по времени, соответственно рад, рад/с, рад/с²; $g = 9,81$ — ускорение свободного падения, м/с²; \ddot{x} — линейное ускорение точки подвеса груза в горизонтальном направлении движения грузовой тележки, м/с².

Систему плоского маятника в больших перемещениях (допускаются отклонения грузового каната свыше $10...15^\circ$) описывает известное нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка вида [15–18]

$$\ddot{q} + (2b/m)\dot{q} + (g/L)\sin(q) + (\ddot{x}/L)\cos q = 0. \quad (1)$$

При исследованиях были приняты допущения о постоянстве длины грузового каната L в процессе перемещения груза, о бесступенчатом характере регулирования скорости \dot{x} и ускорения \ddot{x} разгона и торможения точки подвеса груза (грузовой тележки МК, что обеспечивает частотно-регулируемый привод) в горизонтальном направлении и о пренебрежимо малом влиянии массы перемещаемого груза и подвижных звеньев МК на управляемые параметры скорости \dot{x} и ускорения \ddot{x} точки подвеса.

Рассматривался элементарный такт перемещения. Груз из состояния покоя на вертикальном канатном подвесе перемещается МК на заданное расстояние l_x за время T . После перемещения (в момент времени T) груз также находится в состоянии, близком к состоянию покоя (отсутствие остаточных колебаний). Таким образом, в задаче присутствуют не только ограничения, но и краевые условия.

Приняты обозначения предельных (максимально допустимых) абсолютных значений скорости и ускорения точки подвеса груза \dot{x}_{lim} и \ddot{x}_{lim} соответственно, предельного угла отклонения грузового каната от вертикали q_{lim} , абсолютных пороговых (ниже которых краевые условия считаются выполненными) значений угла каната, его скорости и ускорения q_p, \dot{q}_t и \ddot{q}_t соответственно,

абсолютных пороговых значений отклонения координаты точки подвеса, ее скорости и ускорения x_p , \dot{x}_t и \ddot{x}_t соответственно.

Целевая функция, краевые условия и ограничения задачи имеют вид:

$$T \rightarrow \min, \quad (2)$$

$$|q|_{t=0, T} \leq q_p, \quad |\dot{q}|_{t=0, T} \leq \dot{q}_p, \quad |\ddot{q}|_{t=0, T} \leq \ddot{q}_p,$$

$$|x|_{t=0} \leq x_p, \quad |x|_{t=T} - l_x \leq x_p, \quad |\dot{x}|_{t=0, T} \leq \dot{x}_p, \quad (3)$$

$$|\ddot{x}|_{t=0, T} \leq \ddot{x}_p,$$

$$|q(t)| \leq q_{\text{lim}}, \quad |\dot{x}(t)| \leq \dot{x}_{\text{lim}},$$

$$|\ddot{x}(t)| \leq \ddot{x}_{\text{lim}} \quad \forall t \in [0, T]. \quad (4)$$

2. МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Для уменьшения вычислительных затрат было предложено представить исходную задачу как последовательность задач однопараметрической оптимизации для нахождения программного управления в заданном классе для задачи терминального наведения.

Временная зависимость ускорения точки подвеса груза $\ddot{x} = f(t)$ была получена в аналитическом виде по предложенной автором методике в виде суммы четырех элементарных сигмоидальных функций по временной зависимости $q = f(t)$ угла наклона грузового каната МК [1, 9, 19]:

$$q(t) = A/(e^{k(c_1-t)} + 1) - A/(e^{k(c_3-t)} + 1) + A/(e^{-k(c_2-t)} + 1) - A/(e^{-k(c_4-t)} + 1), \quad (5)$$

где A — амплитуда угла наклона грузового каната МК во время перемещения груза, рад; k — коэффициент крутизны нарастания и спада значения угла q ; c_1 и c_2 — временные значения локальных центров нарастания и спада угла наклона грузового каната МК в положительном направлении (разгон МК с грузом), c_3 и c_4 — временные значения локальных центров нарастания и спада угла наклона грузового каната МК в отрицательном направлении (торможение МК с грузом при приближении к целевой точке), с.

Выражение (5) позволило представить исходную задачу как последовательность задач однопараметрической оптимизации. Сначала путем дифференцирования выражения (5) осуществлялся вывод аналитических выражений скорости и ускорения угла наклона каната. Далее по ним численно определялись ускорения, скорости и пере-

мещения точки подвеса. Сравнительно простой вид выражения (5) позволил получить часть выражений перечисленных выше параметров в аналитическом виде, что повысило точность и устойчивость решения, а также, как подтвердили дальнейшие вычислительные исследования, выполнить все краевые и граничные условия задачи.

Существуют такие значения $T > 0$, для которых краевые условия (3) выполняются. Это обеспечивается свойством стремления к нулю производных сигмоидальной функции в пределах на плюс бесконечности и на минус бесконечности аргумента.

При введении промежуточных переменных $\lambda_1 = e^{k(c_1-t)}$, $\lambda_2 = e^{-k(c_2-t)}$, $\lambda_3 = e^{k(c_3-t)}$ и $\lambda_4 = e^{-k(c_4-t)}$ аналитические выражения первой \dot{q} и второй \ddot{q} производных угла наклона каната, полученных дифференцированием (5) имеют вид:

$$\dot{q}(t) = Ak\lambda_1/(\lambda_1 + 1)^2 - Ak\lambda_3/(\lambda_3 + 1)^2 - Ak\lambda_2/(\lambda_2 + 1)^2 + Ak\lambda_4/(\lambda_4 + 1)^2; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \ddot{q}(t) = & Ak^2\lambda_4/(\lambda_4 + 1)^2 - Ak^2\lambda_2/(\lambda_2 + 1)^2 - \\ & - Ak^2\lambda_3/(\lambda_3 + 1)^2 + 2Ak^2\lambda_1^2/(\lambda_1 + 1)^3 + \\ & + 2Ak^2\lambda_2^2/(\lambda_2 + 1)^3 - 2Ak^2\lambda_3^2/(\lambda_3 + 1)^3 - \\ & - Ak^2\lambda_1/(\lambda_1 + 1)^2 - 2Ak^2\lambda_4^2/(\lambda_4 + 1)^3. \end{aligned} \quad (7)$$

Зависимость ускорения точки подвеса \ddot{x} от остальных переменных уравнения (1) имеет вид:

$$\ddot{x} = -L(\ddot{q} + 2b\dot{q}/m + g \cdot \sin q/L)/\cos q. \quad (8)$$

Вывод аналитических выражений интегралов $\dot{x}(t)$ и $x(t)$ затруднен. Поэтому вектор дискретных значений ускорения точки подвеса \ddot{x} , полученных по зависимости (8) путем подстановки численных значений, полученных по формулам (6) и (7) для различных моментов времени $t \in [0, T]$ с определенным шагом дискретизации, может быть дважды проинтегрирован при помощи известного численного метода трапеций [20].

Схематично последовательность получения временных зависимостей ускорения, скорости и перемещения точки подвеса по заданной функции угла (5) в дискретные моменты времени можно представить в виде:

$$\begin{aligned} & \underbrace{q(t) \xrightarrow{d/dt (6)} \dot{q}(t) \xrightarrow{d/dt (7)} \ddot{q}(t) \xrightarrow{(8)} \ddot{x}(t) \xrightarrow{\int dt}}}_{\text{Аналитические выражения}} \\ & \underbrace{\dot{x}(t) \xrightarrow{\int dt} x(t)}_{\text{Численное интегрирование}} \end{aligned} \quad (9)$$



Большая часть схемы (9) вычисляется по аналитическим зависимостям, поэтому получаемые значения $x(t)$ характеризуются высокой точностью. Схема (9) также характеризуется высоким быстродействием и вычислительной устойчивостью. При достаточно крупном шаге численного интегрирования 0,01 с абсолютная погрешность значений $x(t)$ по сравнению с решением исходного уравнения (1) методом Рунге — Кутты четвертого порядка составляет не более $7 \cdot 10^{-6}$ м. Цикл об-счета по схеме (9) отдельного перемещения в сис-теме MATLAB с двойной точностью для значения $T = 20$ с и шага по времени 0,01 с занимает не бо-лее 0,03 с машинного времени на ПК средней про-изводительности (AMD Athlon 64 X2 Dual Core Processor 5600 + 2,90 GHz).

Экстремальные значения скорости и ускорения точки подвеса $\dot{x}(t)$ и $\ddot{x}(t)$, необходимые для про-верки ограничений (4), а также конечное значение перемещения точки подвеса $x(T)$ могут быть най-дены только после завершения цикла об-счета от-дельного перемещения груза МК.

Для обеспечения граничных (4) и краевого $x(T) \rightarrow l_x$ условий задачи, а также для минимиза-ции времени перемещения (2) были введены три параметра интервалов времени перемещения гру-за МК:

Δt_p — интервал времени от центра элементар-ной возрастающей сигмоиды до момента времени ранее, когда значение функции составляет долю $(1 - P)$ от амплитуды A угла отклонения каната;

$\Delta t_1 = c_2 - c_1 = c_4 - c_3$ — интервал времени между центрами двух элементарных сигмоид на рост и на спад (между центрами первого и второго или тре-тьего и четвертого слагаемых выражения (5));

$\Delta t_2 = (c_1 + c_2)/2 - (c_3 + c_4)/2$ — интервал времени между средним арифметическим центров элемен-тарных сигмоид первых двух слагаемых и послед-них двух слагаемых выражения (5).

Сумма значений трех указанных параметров ин-тервалов времени составляет полное время переме-щения груза и точки его подвеса: $T = \Delta t_1 + \Delta t_2 + 2\Delta t_p$.

Коэффициент k крутизны нарастания и спада значения угла q в элементарной сигмоиде (слагае-мые выражения (5)) связан со значениями P и Δt_p зависимостью $k = \ln(1/P - 1)/(-\Delta t_p)$.

Величина P может рассматриваться как допол-нительный второстепенный параметр алгоритма.

При сложении двух элементарных сигмоид на возрастание и спад, когда их временные центры (c_1 и c_2 либо c_3 и c_4) расположены достаточно близ-ко друг к другу, имеет место некоторое незначи-тельное уменьшение амплитуды суммарной волны.

Для обеспечения точного равенства фактичес-кой амплитуды угла отклонения каната МК за-данному значению A_{true} , значение A в выражениях (5)—(7) определялось по зависимости:

$$A = A_{true} (1 + e^{(k\Delta t_1)/2}) / (e^{(k\Delta t_1)/2} - 1). \quad (10)$$

Дополнительными вычислительными экспе-риментами была подтверждена выдвинутая гипо-теза о попарных функциональных (прямо про-порциональных) взаимосвязях между факторами и показателями: Δt_p и \ddot{x}_{max} , Δt_1 и \dot{x}_{max} , Δt_2 и $x(T)$. Не-зависимое (выполняемое по отдельности) увели-чение каждого из трех факторов (интервалов вре-мени) Δt_p , Δt_1 и Δt_2 всегда, при прочих постоянных факторах, приводит к снижению максимального ускорения точки подвеса $\ddot{x}_{max} = \max|\ddot{x}(t)|$, уве-личению максимальной скорости точки подвеса $\dot{x}_{max} = \max|\dot{x}(t)|$ и увеличению полного перемеще-ния точки подвеса $x(T)$ соответственно:

$$\Delta t_p \uparrow \Rightarrow \ddot{x}_{max} \downarrow; \quad \Delta t_1 \uparrow \Rightarrow \dot{x}_{max} \uparrow; \quad \Delta t_2 \uparrow \Rightarrow x(T) \uparrow.$$

Влияние изменения каждого интервала време-ни на изменение двух других кинематических па-раметров из тройки $[\max|\ddot{x}(t)|, \max|\dot{x}(t)|, x(T)]$ не-значительно, на порядки меньше.

Очевидно, что для минимизации полного вре-мени перемещения груза (2) перемещать точку подвеса необходимо с максимально возможными ускорениями и скоростями.

Были введены три функции, каждая из которых неявно зависит от одного из аргументов (интерва-лов времени) Δt_p , Δt_1 и Δt_2 :

$$f_p(\Delta t_p) = \|\ddot{x}_{max} - \ddot{x}_{lim}\|, \quad f_1(\Delta t_1) = \|\dot{x}_{max} - \dot{x}_{lim}\|, \\ f_2(\Delta t_2) = |x(T) - l_x|. \quad (11)$$

Функции (11) позволили, не прибегая к много-мерной оптимизации, выполнить краевые условия (3) и ограничения (4) задачи путем последователь-ной однопараметрической оптимизации в итера-ционном режиме. Порядок последовательной однопараметрической оптимизации соответствует порядку записи функций в выражении (11).

Выполнялась последовательная минимизация функций (11) численными методами золотого сече-ния и параболической интерполяции [21] в допус-тимых интервалах времени $[\Delta t_{pmin}, \Delta t_{pmax}]$, $[\Delta t_{1min}, \Delta t_{1max}]$ и $[\Delta t_{2min}, \Delta t_{2max}]$ соответственно в окрестнос-ти точки начальных условий $[\Delta t_{pinit}, \Delta t_{1init}, \Delta t_{2init}]$.

Сначала минимизировалась функция $f_p(\Delta t_p)$. Для вычисления $\ddot{x}_{\max} = \max|\ddot{x}(t)|$ при различных значениях Δt_p выполнялся обсчет отдельного перемещения груза по схеме (9).

Полученное оптимальное значение аргумента функции $f_p(\Delta t_p)$ использовалось как начальное значение $(\Delta t_p)_{init}$ при поиске минимума функции $f_1(\Delta t_1)$. Оптимальное значение аргумента функции $f_1(\Delta t_1)$ в свою очередь использовалось как начальное значение Δt_{1init} при поиске минимума функции $f_2(\Delta t_2)$. Наконец, при переходе к новой итерации последовательной однопараметрической оптимизации, оптимальное значение аргумента функции $f_2(\Delta t_2)$ использовалось как начальное значение Δt_{2init} при поиске минимума функции $f_p(\Delta t_p)$. Далее цикл итерации повторялся.

Для определения оптимальных значений аргументов $[\Delta t_p, \Delta t_1, \Delta t_2]$, последовательная однопараметрическая оптимизация функций (11) выполнялась дважды, т. е. всего за две итерации. Вычислительные исследования показали, что двух итераций достаточно во всех расчетных случаях для получения решения задачи с приемлемой точностью (погрешностью не более 0,001 соответствующих единиц измерения линейных ускорений, скоростей и перемещений).

Поскольку последней в итерации выполняется оптимизация функции $f_2(\Delta t_2)$, краевое условие $x(T) \rightarrow l_x$ всегда выполняется после окончания любой итерации однопараметрической оптимизации функций (11). Также максимальное абсолютное значение угла отклонения каната всегда, вследствие первичности задания аналитической зависимости $q(t)$ в схеме (9) с учетом коррекции (10), равно предельному углу отклонения грузового каната от вертикали: $\max|q(t)| = q_{lim}$.

В то же время, после решения задачи оптимального по быстродействию перемещения, максимальные абсолютные значения скорости и ускорения грузовой тележки МК в оптимальном процессе перемещения МК не всегда достигают предельных значений \dot{x}_{lim} и \ddot{x}_{lim} соответственно.

В списке независимых параметров начальных условий задачи ($l_x, \dot{x}_{lim}, \ddot{x}_{lim}, m, L, b, q_{lim}$) последний параметр предельного угла q_{lim} , в отличие от всех остальных (как правило, жестко регламентированных либо технологией процесса, либо конструктивными ограничениями реальных приводов МК), допускает определенную вариативность задания для большинства видов грузов.

3. ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ

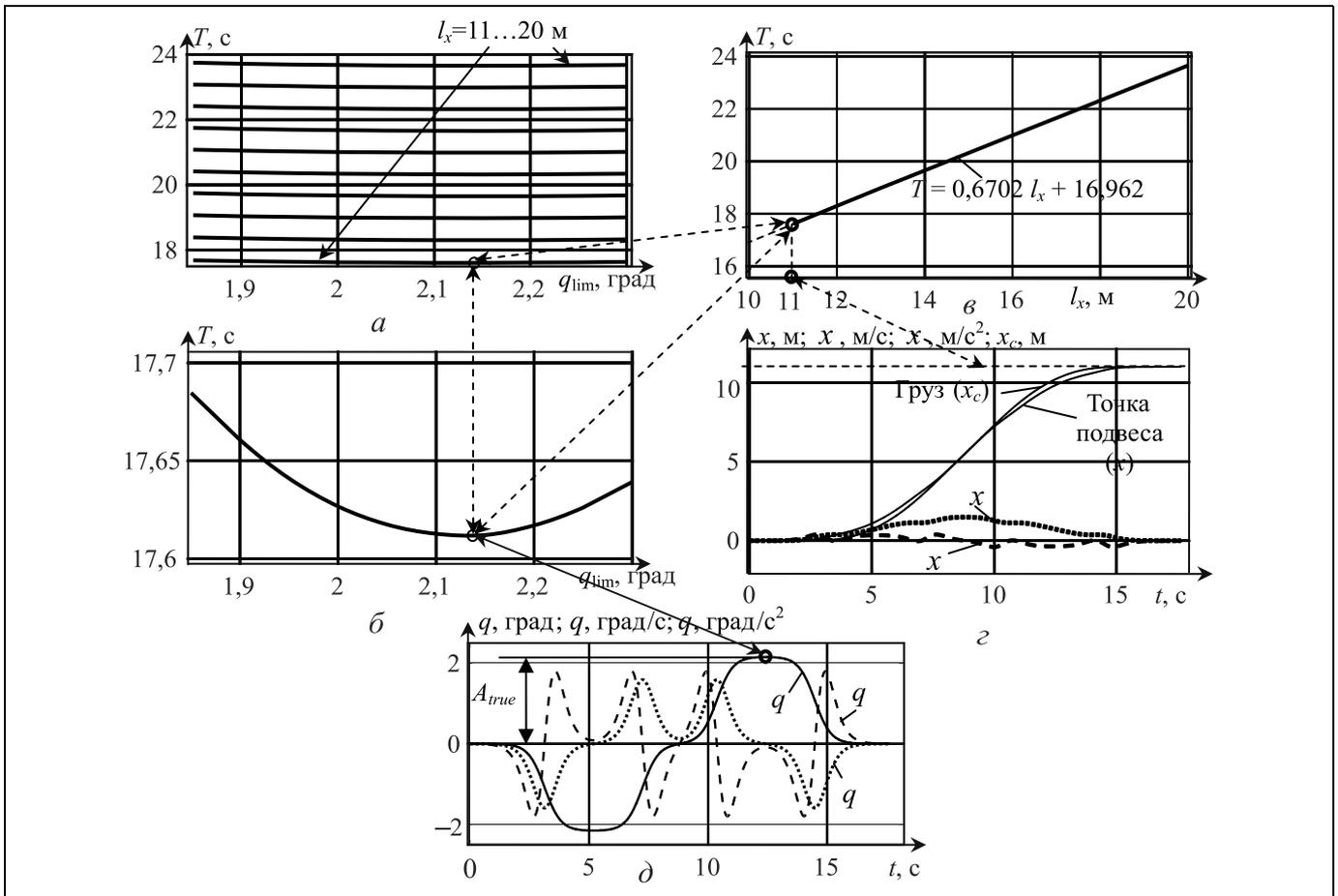
На рисунке в качестве примера представлены результаты варьирования предельного угла q_{lim} для различных значений длины заданного перемещения l_x , которые демонстрируют наличие экстремумов функции минимального времени T перемещений при определенных значениях q_{lim} . Все значения T были получены путем последовательной минимизации функций (11) с учетом схемы (9).

В результате варьирования перемещения l_x , на каждом шаге которого в свою очередь варьировались значения q_{lim} и выбиралось минимальное время, была получена функциональная зависимость минимального времени перемещений T от длины заданного перемещения l_x (рисунок *в*), которая в диапазоне изменения аргумента $l_x \in [11; 20]$ м имеет линейный характер. Она аппроксимируется уравнением $T = 0,6702l_x + 16,962$. Для значения $l_x = 11$ м на рисунке *г* приведены временные зависимости линейного перемещения моста, его первых двух производных, а также линейных перемещений груза в плоскости перемещений моста за минимальное время. На рисунке *д* для значения $l_x = 11$ м приведены соответствующие временные зависимости угловой координаты отклонения грузового каната и ее первых двух производных.

При проведении описываемых вычислительных экспериментов предельные (максимально допустимые) абсолютные значения скорости и ускорения точки подвеса груза принимали значения $\dot{x}_{lim} = 1,5$ м/с и $\ddot{x}_{lim} = 0,4$ м/с² (см. ограничения (4)). Пороговые значения угла отклонения каната, его скорости и ускорения принимали значения $q_t = 0,01^\circ$, $\dot{q}_t = 0,01^\circ/\text{с}$ и $\ddot{q}_t = 0,01^\circ/\text{с}^2$. Пороговые значения отклонения координаты точки подвеса, ее скорости и ускорения $x_t = 0,01$ м, $\dot{x}_t = 0,01$ м/с и $\ddot{x}_t = 0,01$ м/с².

Допустимые интервалы времени $[\Delta t_{pmin}, \Delta t_{pmax}] = [1; 6]$ с, $[\Delta t_{1min}, \Delta t_{1max}] = [1; 20]$ с, $[\Delta t_{2min}, \Delta t_{2max}] = [1; 20]$ с. Начальные значения интервалов времени $[\Delta t_{pinit}, \Delta t_{1init}, \Delta t_{2init}] = [6; 20; 20]$ с. Значения массы груза, длины каната и коэффициента диссипации $m = 100$ кг, $L = 10$ м, $b = 0,5$ Н·м·с/рад.

Оптимизированные значения предельного угла q_{lim} , а также интервалов времени Δt_p , Δt_1 и Δt_2 , соответствующие рисунку *д*, принимали значения: $q_{lim} = -2,149^\circ$; $\Delta t_p = 3,134$ с; $\Delta t_1 = 4,113$ с;



Примеры зависимостей минимального времени перемещений T от значения предельного угла q_{lim} (а, б), минимального времени перемещений T от длины заданного перемещения l_x (в), линейных перемещений и производных перемещений точки подвеса и груза от времени (г), перемещений и производных угла наклона каната от времени (д)

$\Delta t_2 = 7,231 \text{ с}$. Полное время T перемещения составило $17,612 \text{ с}$.

Максимальные абсолютные значения скорости и ускорения грузовой тележки МК в оптимальном процессе перемещения МК принимали значения: $\dot{x}_{max} = \max|\dot{x}(t)| = 1,4965 \text{ м/с}$; $\ddot{x}_{max} = \max|\ddot{x}(t)| = 0,3998 \text{ м/с}^2$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан способ синтеза программного управления точкой подвеса груза, перемещаемого мостовым краном в режиме подавления неуправляемых колебаний груза. Способ позволяет не только переместить груз на гибком канатном подвесе за минимальное время на заданное расстояние, но и задать в процессе перемещения требуемую временную зависимость угла отклонения

грузового каната, причем угол отклонения в процессе перемещения достигает заданного максимального значения. Применение суммы элементарных сигмоидальных функций обеспечивает выполнение краевых условий задачи в виде нулевых скоростей и ускорений самого груза, точки его подвеса и угла отклонения грузового каната. Принцип пересчета аналитической временной зависимости угла отклонения грузового каната от вертикали в зависимости ускорений, скоростей и перемещений точки подвеса груза на грузовой тележке позволяет обойтись без сложных методов решения задачи оптимального управления.

Выделение трех интервалов времени в аналитической временной зависимости угла отклонения грузового каната позволило отказаться от ресурсоемкой многомерной оптимизации и заменить ее однопараметрической оптимизацией в итерационном режиме, выполняемой со сравнительно малыми затратами машинного времени расчетов.

Предложенная последовательность решения задач однопараметрической оптимизации применялась для нахождения программного управления точкой подвеса груза, перемещаемого мостовым краном. Проведенные исследования подтверждают возможность применения эвристических нестандартных приемов для решения частных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Щедринов А.В., Сериков С.А., Колмыков В.В.* Автоматическая система успокоения колебаний груза для мостового крана // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2007. — № 8. — С. 13–17.
2. *Толочко О.И., Бажутин Д.В.* Сравнительный анализ методов гашения колебаний груза, подвешенного к механизму поступательного движения мостового крана // Электромашиностроение и электрооборудование. — 2010. — № 75. — С. 22–28.
3. *Алгоритмы подавления колебаний грузов подъемно-транспортных механизмов с использованием нечеткой логики функционирования / О.А. Шведова и др. // Доклады БГУИР. — 2014. — № 1 (79). — С. 65–71.*
4. *Черноусько Ф.Л., Акуленко Л.Д., Соколов Б.Н.* Управление колебаниями. — М.: Наука, 1980. — 383 с.
5. *Reshmin S.A., Chernousko F.L.* A time-optimal control synthesis for a nonlinear pendulum // Journal of Computer and Systems Sciences International. — 2007. — Vol. 46, N 1. — P. 9–18.
6. *Almuzara G.J.L., Flugge-Lots I.* Minimum time control of a nonlinear system // J. Differential Equations. — 1968. — Vol. 4, N 1. — P. 12–39.
7. *Ridout A.J.* Anti-swing control of the overhead crane using linear feedback // J. of Electrical and Electronics Engineering. — 1989. — Vol. 9, N 1/2. — P. 17–26.
8. *Omar H.M.* Control of gantry and tower cranes: PhD Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University. — Blacksburg, Virginia. — 2003. — 100 p.
9. *Korytov M., Shcherbakov V., Volf E.* Impact sigmoidal cargo movement paths on the efficiency of bridge cranes // International Journal of Mechanics and Control. — 2015. — Vol. 16, N 2. — P. 3–8.
10. *The reduction of errors of bridge crane loads movements by means of optimization of the spatial trajectory size / V. Shcherbakov, et al. // Applied Mechanics and Materials. — 2015. — Vol. 811. — P. 99–103.*
11. *Mathematical modeling of process moving cargo by overhead crane / V. Shcherbakov, et al. // Applied Mechanics and Materials. — 2014. — Vol. 701, 702. — P. 715–720.*
12. *A new vision-sensorless anti-sway control system for container cranes / Y.S. Kim, et al. // Industry Applications Conference. — 2003. — Vol. 1. — P. 262–269.*
13. *Command Shaping for Nonlinear Crane Dynamics / D. Blackburn, et al. // Journal of Vibration and Control. — 2010. — N 16. — P. 477–501.*
14. *Singer N., Singhose W., Seering W.* Comparison of filtering methods for reducing residual vibration // European Journal of Control. — 1999. — N 5. — P. 208–218.
15. *Блехман И.И.* Вибрационная механика. — М.: Физматлит, 1994. — 400 с.
16. *Щербаков В.С., Корытов М.С., Вольф Е.О.* Алгоритм компенсации неуправляемых пространственных колебаний груза и повышения точности траектории его перемещения грузоподъемным краном // Вестник машиностроения. — 2015. — № 3. — С. 16–18.
17. *Бутиков Е.И.* Необычное поведение маятника при синусоидальном внешнем воздействии // Компьютерные инструменты в образовании. — 2008. — № 2. — С. 24–36.
18. *Кильчевский Н.А.* Курс теоретической механики. Т. 1. — М.: Наука, 1972. — 456 с.
19. *Mitchell T.M.* Machine Learning. — WCB/McGraw-Hill, 1997. — 414 p.
20. *Крылов В.И.* Приближенное вычисление интегралов. — М.: Наука, 1967. — 500 с.
21. *Формалев В.Ф., Ревизников Д.Л.* Численные методы. — М.: Физматлит, 2004. — 400 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Е.Я. Рубиновичем.

Корытов Михаил Сергеевич — д-р техн. наук, профессор, Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, г. Омск, ✉ kms142@mail.ru.



Содержание сборника «Управление большими системами», 2016, вып. 65

Иванов Н.Н. Степень параллелизма обобщенных стохастических сетевых графиков

Макрушин С.В. Анализ структуры магистральных электросетей России: оценка применимости модели тесного мира

Новиков Д.А. Комплексные модели системной оптимизации производственно-экономической деятельности предприятия

Ураков А.Р., Тимеряев Т.В. Алгоритм решения динамической задачи поиска кратчайших расстояний в графе

Фуртат И.Б. Динамическая компенсация возмущений в условии насыщения сигнала управления

Фуртат И.Б., Нехороших А.Н. Робастное управление линейными мультиагентными системами с использованием левых разностей для оценки

Шумов В.В. Моделирование миграции населения в задачах обеспечения безопасности

Тексты статей в свободном доступе на сайте <http://ubs.mtas.ru/>