

А. С. Антипов, математик, scholess18@mail.ru,
С. А. Краснова, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., skrasnova@list.ru,
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова, г. Москва

Система стабилизации положения тележки крана с использованием сигмоидальной функции¹

Рассматривается задача управления тележкой-краном с закрепленным на стержне грузом. Под действием управляющей силы тележка способна совершать перемещение массивных грузов, что определяется целями промышленного производства. Математическая модель, описывающая движение тележки-крана, представлена лагранжевой системой нелинейных уравнений с двумя степенями свободы и одним управляющим воздействием. Предполагается, что стержень невесом, его жесткостью пренебрегается, и трение во всех сочленениях отсутствует. Ставится задача стабилизации заданного положения тележки-крана с неопределенными массо-инерционными характеристиками при действии кусочно-гладких ограниченных внешних возмущений и при отсутствии полного комплекта измерительных устройств. На основе свойства пассивности системы строится закон управления, содержащий линейную и сигмоидальную части, решающий задачу стабилизации заданного положения. Полагается, что измерениям доступно только положение тележки-крана, шумы измерений отсутствуют. В целях получения оценки скорости тележки, необходимой для реализации закона управления, вводится наблюдатель состояния пониженного порядка с сигмоидальным корректирующим воздействием. Показано, что использование сигмоидальной функции как допредельной реализации функции знака в задаче управления обеспечивает инвариантность с заданной точностью по отношению к внешним возмущениям, а в задаче наблюдения позволяет получить с заданной точностью текущие оценки неизмеряемых сигналов. В силу ограниченности сигмоидальной функции помогает избежать излишнего расхода ресурсов управления и уменьшить возможную величину перерегулирования в начале переходных процессов. При этом в отличие от функции знака она является реализуемой в электромеханических системах с учетом динамики исполнительных устройств, в которых в силу физических ограничений обобщенные моменты и силы не могут быть разрывными функциями. В системе MATLAB-Simulink проведено моделирование разработанного закона управления с линейной и сигмоидальной частью применительно к механической системе. В целях сравнения также представлены результаты моделирования для классически используемого ПД регулятора. Приведенные результаты моделирования подтверждают эффективность разработанного подхода.

Ключевые слова: механическая система, пассивность, стабилизация, инвариантность, сигмоидальная функция, наблюдатель состояния пониженного порядка, параметрическая неопределенность, внешние возмущения

Введение

Транспортировочные краны широко распространены в промышленности для перемещения массивных грузов в производственных целях. При этом предъявляются требования по скорости и безопасности транспортировки различных грузов в заданное положение.

В работе рассматривается задача построения системы управления перемещением грузов в заданный пункт. В качестве объекта управления выступает тележка-кран, ее математическая модель представляет собой нелинейную динамическую систему с двумя степенями свободы. Сложность управления подобной системой возникает из-за наличия только одного управляющего воздействия. В настоящее время разработано множество алгоритмов управления системами с недостатком управляющих воздействий. Классически, ориентируясь на линейную теорию управления, законы управления

строили на основе линеаризации подобных систем [1–3]. Такие методы позволяют добиться локальной стабилизации в окрестности линеаризуемого положения. Другой подход основан на свойствах пассивности исследуемых систем, построении для них функций Ляпунова и глобальной стабилизации [4–7]. В частности, стандартным решением является использование пропорционально-дифференцирующего (ПД) регулятора, зависящего от положения и скорости, а также пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) регулятора [4, 5]. Строятся различные модификации данных законов. Например, в работе [7] синтезируют модифицированный закон управления, добавляя в ПД регулятор угловую координату с ее производной и, тем самым, улучшая качество переходных процессов. При наличии внешних возмущений и неопределенностей в модели естественным подходом к управлению выступают силовые методы, такие как управление на скользящих режимах [8, 9]. Для рассматриваемых систем широко распространены методы иерархии скользящих режимов [10, 11], согласно

¹Статья подготовлена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-01-00846А.

которым обеспечивается последовательное попадание на заданные поверхности скольжения, выбранные исходя из целей управления. Однако на практике нельзя использовать разрывные, высокочастотные сигналы в качестве управляющих моментов.

В данной работе изучается задача стабилизации заданного положения тележки-крана при действии неизвестных внешних ограниченных возмущений, которые являются согласованными. Предложен подход к синтезу закона управления, основанный на свойстве пассивности системы. В законе управления присутствует часть с сигмоидальной функцией. Являясь гладкой допредельной реализацией функции знака, сигмоидальная функция в обратной связи позволяет подавить согласованные внешние возмущения. Ограниченность сигмоидальной функции помогает избежать излишнего расхода ресурсов управления, который нередко приводит к перерегулированию в начале переходных процессов.

При построении законов управления для систем с недостатком управляющих воздействий нередко предполагают наличие всех необходимых измерений и не ставят задачу наблюдения. На практике обычно удается получить измерения обобщенных координат, но организация измерения обобщенных скоростей является сложной и дорогостоящей задачей. В предположении, что измерению доступно только положение тележки, для оценивания ее скорости предложен оригинальный метод синтеза наблюдателя пониженного порядка. В отличие от стандартных укороченных наблюдателей, где отбрасывается динамика измеряемой переменной, мы, наоборот, не используем в наблюдателе дифференциальное уравнение неизменяемой переменной, считая ее внешним ограниченным возмущением, оценкой которого, начиная с заданного момента времени, служит сигмоидальное корректирующее воздействие.

Постановка задачи

В качестве объекта управления рассматривается тележка-кран с массой M , к которой на невесомом стержне длиной l прикреплен груз с массой m (рис. 1). Тележка может совершать горизонтальные перемещения под действием управляющей силы u . Для описания ее движения вводятся следующие обобщенные ко-

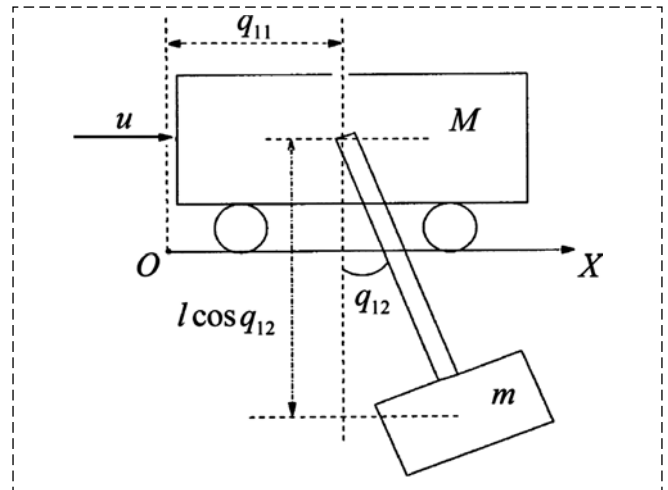


Рис. 1. Схема тележки-крана

Fig. 1. The scheme of convey-crane

ординаты: q_{11} — горизонтальное перемещение тележки; q_{12} — угол отклонения стержня от вертикальной оси.

Математическая модель объекта управления имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{q}_1 &= q_2; \\ \dot{q}_2 &= f_1(q_1, q_2) + f_2(q_1, q_2)(u + \eta(t)), \end{aligned} \quad (1)$$

где $q_1 = \text{col}(q_{11}, q_{12}) \in \mathbb{R}^2$ — вектор обобщенных координат; $q_2 = \text{col}(q_{21}, q_{22}) \in \mathbb{R}^2$ — вектор обобщенных скоростей;

$$f_1(q_1, q_2) = \text{col}(f_{11}, f_{12}) \in \mathbb{R}^2,$$

$$f_2(q_1, q_2) = \text{col}(f_{21}, f_{22}) \in \mathbb{R}^2;$$

$$f_{11} = \frac{1}{M + m \sin^2(q_{12})} [-m \sin q_{12} (l q_{22}^2 + g \cos q_{12})];$$

$$f_{12} = \frac{1}{l(M + m \sin^2(q_{12}))} \times$$

$$\times [-\sin q_{12} ((M + m)g + (ml \cos q_{12}) q_{22}^2)];$$

$$f_{21} = \frac{1}{M + m \sin^2(q_{12})}, \quad f_{22} = \frac{\cos q_{12}}{l(M + m \sin^2(q_{12}))};$$

g — ускорение свободного падения; $\eta(t)$ — обобщенная сила, трактуемая как неизвестное ограниченное возмущение. Выдвигаются следующие предположения:

- $\eta(t)$ полагается кусочно-гладкой ограниченной функцией с ограниченными односторонними производными; $|\eta(t)| \leq N$, $|\dot{\eta}(t)| \leq N_1 \forall t \geq 0$, N, N_1 — известные константы;
- параметры l, m, M точно не известны;

- груз рассматривается как точечная масса, жесткость и масса стержня не учитываются;
- измерению подлежит только положение тележки $q_{11}(t)$, шумы измерений отсутствуют.

Ставится задача синтеза закона управления u в форме обратной связи, обеспечивающего заданное положение тележки $q_{11d} = \text{const}$ и стабилизацию остальных переменных состояния. В условиях неопределенности данная задача может быть решена с заданной точностью:

$$|e_{11}(t)| \leq \delta_{11}, \quad |q_{21}(t)| \leq \delta_{21} \quad \forall t > T > 0, \quad (2)$$

где $e_{11} = q_{11} - q_{11d}$ — ошибка регулирования.

Характеристика сигмоидальной функции

В целях дальнейшего синтеза закона управления рассмотрим нелинейную гладкую ограниченную сигмоидальную функцию $\sigma(\alpha x) = 2/(1 + e^{-\alpha x}) - 1$, $\alpha = \text{const} > 0$, которая является допредельной реализацией функции знака $y = \text{sign} x$ в следующем смысле: $\sigma(-\alpha x) = -\sigma(\alpha x)$, $\sigma(\alpha x) \sim \alpha x/2$, $\sigma(\alpha x) \sim \text{sign} x$. Первая производная $\sigma'(\alpha x) \xrightarrow{\alpha \rightarrow +\infty} 0$ сигмоидальной функции — положительная ограниченная четная функция $\sigma'(\alpha x) = \alpha(1 - \sigma^2(\alpha x))/2$, вторая производная — ограниченная нечетная функция $\sigma''(\alpha x) = -\alpha\sigma'(\alpha x)\sigma(\alpha x)$.

Для сигмоидальной функции и ее первой производной в указанных интервалах справедливы следующие оценки [12]:

$$\begin{aligned} \sigma(\alpha\Delta) &< |\sigma(\alpha x)| < 1, \\ 0 &< \sigma'(\alpha x) < \sigma'(\alpha\Delta) \quad \forall |x| > \Delta > 0; \\ \sigma(\alpha\Delta)|x|/\Delta &\leq |\sigma(\alpha x)| \leq \sigma(\alpha\Delta), \\ 0 &< \sigma'(\alpha\Delta) \leq \sigma'(\alpha x) \leq \sigma'(0) = \alpha/2 \quad \forall |x| \leq \Delta. \end{aligned} \quad (3)$$

Из оценок (3) следует, что при $|x| > \Delta$ сигмоидальная функция близка к постоянной функции, а при $|x| \leq \Delta$ — к линейной. В качестве границы рекомендуется принять точку $\alpha\Delta = c$, где $\pm c \approx \pm 3$ — абсциссы вершин сигмоидальной функции, в которых ее кривизна достигает максимума, при этом

$$\sigma(\pm 3) \approx \pm 0,9, \quad \sigma'(\pm 3) \approx 0,1\alpha, \quad \alpha\Delta \approx 3. \quad (4)$$

Синтез закона управления

Для решения поставленной задачи (2) предлагается использовать комбинированный закон управления

$$u = -k_1 e_{11} - M_2 \sigma(\alpha q_{21}), \quad (5)$$

где $\sigma(\alpha q_{21}) = \frac{2}{1 + e^{-\alpha q_{21}}} - 1$ — сигмоидальная функция; $\alpha, M = \text{const} > 0$. Данный закон состоит из двух частей — линейной и сигмоидальной. Линейная часть служит для стабилизации ошибки регулирования e_{11} , скорость сходимости зависит от выбора $k_1 > 0$, а нелинейная (сигмоидальная) — для обеспечения инвариантности по отношению к внешнему возмущению [12].

Для выбора параметров закона управления (5) и исследования устойчивости замкнутой системы (1), (5) в качестве кандидата на функцию Ляпунова рассмотрим [4, 7] функцию

$$V(q_1, q_2) = E(q_1, q_2) + \frac{1}{2} k_1 e_{11}^2, \quad (6)$$

где $E(q_1, q_2) = \frac{1}{2} q_2^T H(q_1) q_2 + mgl(1 - \cos q_{12})$ — полная энергия системы с матрицей инерции $H(q_1) = \begin{pmatrix} M + m & -ml \cos q_{12} \\ -ml \cos q_{12} & ml^2 \end{pmatrix}$.

С учетом (1), (5) производная функции (6) имеет вид

$$\dot{V} = q_{21}(u + \eta + k_1 e_{11}) = q_{21}(\eta - M_2 \sigma(\alpha q_{21})). \quad (7)$$

При выборе параметра M_2 в указанном виде (7) за конечное время $t_1 > 0$ в замкнутой системе (1), (5) обеспечивается сходимость переменных $e_{11}(t)$, $q_{21}(t)$, $q_{12}(t)$, $q_{22}(t)$ в некоторые окрестности нуля. Параметр α , который играет роль большого коэффициента, выбирается исходя из заданной точности (2) в силу (3), (4) на основе следующих соотношений:

$$\begin{aligned} |q_{21}| \leq \delta_{21} = 3/\alpha, \quad |\eta - M_2 \sigma(\alpha q_{21})| \leq \beta = \\ = 10N_1/(M_2\alpha), \quad |e_{11}| \leq \delta_{11} = \beta/k_1 \Rightarrow \\ \Rightarrow \alpha > \max \left\{ \frac{3}{\delta_{21}}; \frac{10N_1}{M_2\delta_{11}k_1} \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Построенный базовый закон управления (5) определяется сигналами $e_{11} = q_{11} - q_{11d}$ и q_{21} . Для его реализации необходимо получить оценку скорости тележки $q_{21}(t)$ по имеющимся измерениям положения $q_{11}(t)$. В условиях существенной неопределенности модели объекта управления и действия внешних возмущений, динамическая модель которых не вводится в построение, эту задачу можно решить только с заданной точностью.

Ниже представлен оригинальный метод синтеза наблюдателя состояния пониженного порядка с сигмоидальным корректирующим воздействием. Данный наблюдатель строится на основе подсистемы $\dot{q}_{11} = q_{21}$, где переменная $q_{21}(t)$ трактуется как внешнее ограниченное возмущение с ограниченной производной $|q_{21}(t)| \leq \bar{q}_{21}$, $|\dot{q}_{21}(t)| \leq \bar{q}_{31} \forall t \geq 0$, и имеет вид

$$\dot{z}_{11} = v, \quad (9)$$

где $z_{11} \in \mathbb{R}$ — переменная состояния, $v = U\sigma(k\varepsilon)$ — сигмоидальное корректирующее воздействие наблюдателя; $\varepsilon = q_{11} - z_{11} \in \mathbb{R}$ — ошибка наблюдения. Задача наблюдения сводится к стабилизации систем относительно ошибки наблюдения и ее производной

$$\dot{\varepsilon} = q_{21} - v = q_{21} - U\sigma(k\varepsilon), \quad \ddot{\varepsilon} = \dot{q}_{21} - U\sigma'(k\varepsilon)\dot{\varepsilon} \quad (10)$$

с заданной точностью:

$$|\varepsilon(t)| \leq \Delta, \quad |\dot{\varepsilon}(t)| \leq \Delta \quad \forall t > t^*, \quad 0 \leq t^* < T. \quad (11)$$

При выполнении (11) из уравнения статики имеем: $|\dot{\varepsilon}(t)| \leq \Delta \Rightarrow |q_{21}(t) - v(t)| \leq \Delta \quad \forall t > t^*$. Следовательно, корректирующее воздействие служит искомой оценкой обобщенной скорости: $v(t) \approx q_{21}(t) \quad \forall t > t^*$.

Желаемая точность стабилизации (11) достигается за счет выбора параметров k , $U > 0$ в сигмоидальном корректирующем воздействии. Для данного выбора при анализе систем (10) используются свойства сигма-функции (3), (4). При $|\varepsilon| > 3/k$ имеем:

$$\begin{aligned} \varepsilon \dot{\varepsilon} &= \varepsilon(q_{21} - U\sigma(k\varepsilon)) \leq \\ &\leq |\varepsilon|(\bar{q}_{21} - 0,9U) < 0 \Rightarrow U > 1,1\bar{q}_{21}, \end{aligned} \quad (12)$$

что обеспечивает выполнение $|\varepsilon(t)| \leq 3/k$ за конечное время. При $t > t^*$ из достаточных условий получим нижнюю оценку для выбора второго параметра сигмоидальной функции:

$$\begin{aligned} \varepsilon \dot{\varepsilon} &\leq |\varepsilon|(\bar{q}_{21} - 0,3Uk|\varepsilon|) < 0 \Rightarrow k > 3,3\bar{q}_{21}/(U|\varepsilon|); \\ \dot{\varepsilon} \ddot{\varepsilon} &\leq |\dot{\varepsilon}|(\bar{q}_{31} - 0,1Uk|\dot{\varepsilon}|) < 0 \Rightarrow k > 10\bar{q}_{31}/(U|\dot{\varepsilon}|) \Rightarrow \\ &\Rightarrow k > \max\{3,3\bar{q}_{21}; 10\bar{q}_{31}\}/(U\Delta). \end{aligned} \quad (13)$$

В замкнутой системе (1) с наблюдателем состояния (9) закон управления (5) реализуется в виде

$$u = -k_1 e_{11} - M_2 \sigma(\alpha v), \quad (14)$$

и обеспечивает решение поставленной задачи (2).

Для иллюстрации эффективности описанного подхода было проведено моделирование в среде MATLAB-Simulink. В ходе моделирования приняты следующие параметры системы: $M = 10$ [кг] — масса тележки-крана; $l = 2,5$ [м] — длина стержня; $m = 50$ [кг] — масса груза. Внешние возмущения описывались кусочно-гладкой периодической функцией $\eta(t) = 0,2t$ с главным периодом $T = 1$ [с].

Требовалось стабилизировать заданное положение тележки $q_{11d} = 10$ [м] с точностью 0,07 [м].

На основе условий (7), (8) обеспечения заданной точности (2) приняты параметры $k_1 = 2$, $\alpha = 300$, $M_2 = 5$ в комбинированном законе управления (5).

В целях сравнения был также построен классический закон управления в виде ПД регулятора [3]:

$$u = -k_{p1}e_{11} - k_{p2}q_{21}, \quad (15)$$

где параметры $k_{p1} = 10$, $k_{p2} = 20$ были приняты из аналогичных условиям (7), (8) условий обеспечения заданной точности (2).

Для оценки скорости q_{21} и реализации законов управления строился наблюдатель состояния пониженного порядка с сигмоидальным корректирующим воздействием. Из условий (12), (13) выбраны его параметры: $k = 250$, $U = 1$.

В замкнутой системе (1) с наблюдателем (9) закон управления (15) реализуется следующим образом:

$$u = -k_{p1}e_{11} - k_{p2}v. \quad (16)$$

На рис. 2, 3 для законов управления (14), (16) представлены графики ошибок регулирования заданного положения $e_{11}(t) = q_{11}(t) - q_{11d}$ и угла отклонения стержня от вертикальной оси $q_{12}(t)$ соответственно (сверху — для комбинированного закона, снизу — для ПД регулятора). На рис. 4 приведены графики ошибок оценивания скорости $q_{21}(t)$ с помощью корректирующего воздействия наблюдателя $v(t)$. На рис. 5 отражены графики управляющих воздействий $u(t)$.

Таким образом, результаты моделирования подтвердили эффективность разработанного подхода. Построенный комбинированный закон управления (5) стабилизировал заданное положение с требуемой точностью, а наблюдатель состояния (9) в течение 30 с обеспечил его реализацию. Из рис. 3, 5 следует, что благодаря

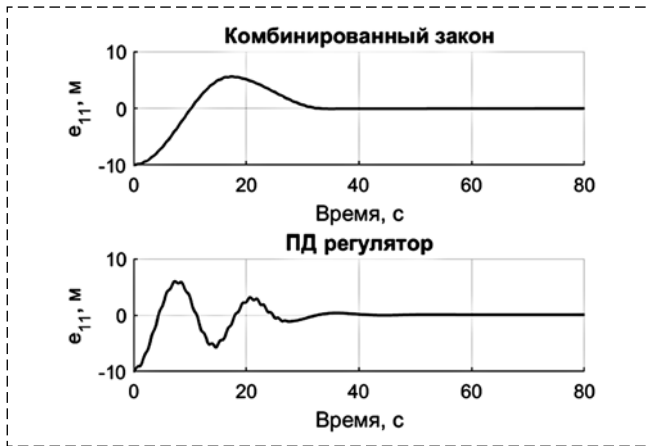


Рис. 2. График ошибки регулирования $e_{11}(t)$

Fig. 2. The graph of regulation error $e_{11}(t)$

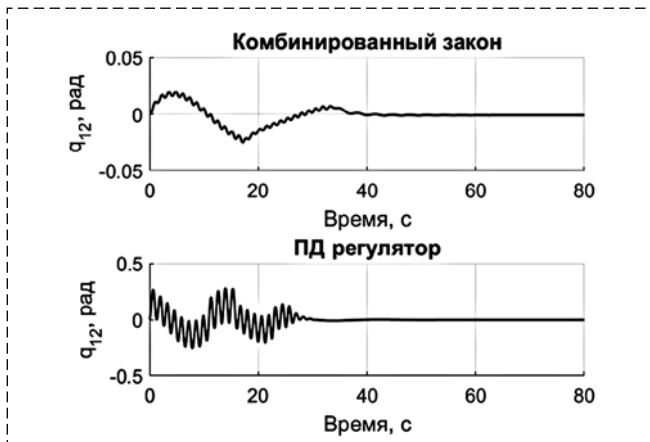


Рис. 3. График угла отклонения стержня от вертикальной оси $q_{12}(t)$

Fig. 3. The graph of sway angle $q_{12}(t)$

использованию ограниченной сигмоидальной функции комбинированный закон управления по сравнению с ПД регулятором обеспечивает примерно в 10 раз меньшее перерегулирование $q_{12}(t)$ и позволяет расходовать меньшие ресурсы управления $u(t)$

Заключение

Тележка-кран представляет собой сложную механическую систему с двумя степенями свободы и одним управляющим воздействием. В работе предложен комбинированный закон управления с линейной и сигмоидальной частями, решающий задачу стабилизации заданного положения в условиях параметрической неопределенности. Для реализации закона управления построен наблюдатель с сигмоидальным корректирующим воздействием. Разработанный подход к решению задачи стабилизации подтверждается результатами моделирования.

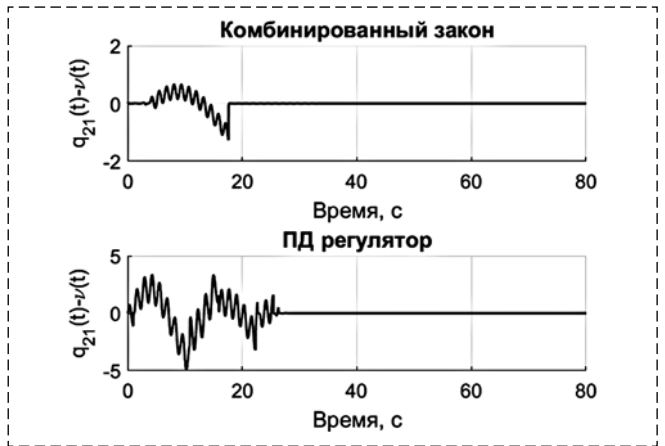


Рис. 4. График ошибки оценивания скорости $q_{21}(t) - v(t)$

Fig. 4. The graph of velocity estimation error $q_{21}(t) - v(t)$

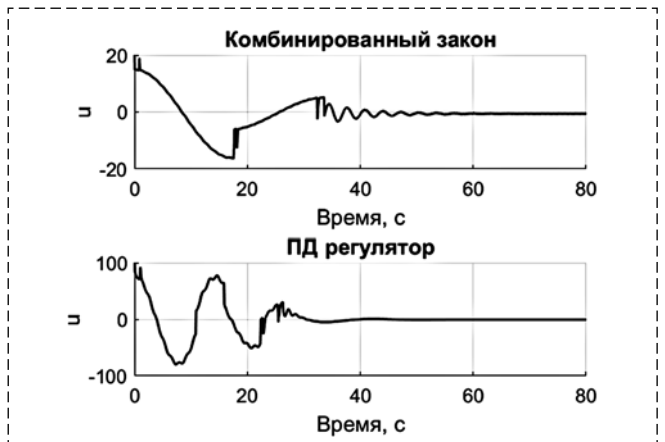


Рис. 5. График управления $u(t)$

Fig. 5. The graph of control $u(t)$

Показано, что использование сигмоидальных функций обеспечивает инвариантность с заданной точностью по отношению к имеющимся неопределенностям и позволяет снизить возможное значение перерегулирования.

Список литературы

1. Le Tuan Anh, Gook-Hwan Kim, Min Young Kim, Soon-Geul Lee. Partial Feedback Linearization Control of Overhead Cranes with Varying Cable Lengths // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2012. Vol. 13, N. 4. P. 501–507.
2. Bálint K., Na W. Robust exact linearization of a 2D overhead crane // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51, N. 22. P. 354–359.
3. Ананьевский И. М. Управление трехзвенным перевернутым маятником в окрестности положения равновесия // Прикладная математика и механика. 2018. Т. 82, № 2. С. 149–155.
4. Fantoni I., Lozano R. Non-linear control for underactuated mechanical systems. London: Springer Verlag. 2002. P. 43–51.
5. Diantong Liu, Weiping Guo, Jianqiang Yi, Dongbin Zhao. Passivity-based-control for a class of underactuated mechanical systems // Proceedings of 2004 International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation. 2004. P. 50–54.

6. Romero J. G., Donaire A., Borja P. Global Stabilisation of Underactuated Mechanical Systems via PID Passivity-Based Control // *IFAC-PapersOnLine*. 2017. Vol. 50, N. 1. P. 9577–9582.
7. Papadopoulos A. D., Rompokos A. A., Alexandridis A. T. Nonlinear and observer-based PD position and sway control of convey-crane systems // 2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). 2016. P. 696–700.
8. Slotine J. E. Sliding controller design for non-linear systems // *International Journal of Control*. 1984. Vol. 40, N. 2. P. 421–434.
9. Utkin V. I., Guldner J., Shi J. Sliding mode control in electromechanical systems. NewYork: CRC Press, 2009. 503 p.

10. Qian D., Yi J., Zhao D., Hao Y. Hierarchical Sliding Mode Control for Series Double Inverted Pendulums System // 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2006. P. 4977–4982.
11. Yi-Jen Mon, Chih-Min Lin. Hierarchical fuzzy sliding-mode control // 2002 IEEE World Congress on Computational Intelligence. 2002 IEEE International Conference on Fuzzy Systems. FUZZ-IEEE'02. Proceedings (Cat. No.02CH37291). 2002. Vol. 1. P. 656–661.
12. Krasnova S. A., Utkin A. V. Sigma function in observer design for states and perturbations // *Automation and Remote Control*. 2016. Vol. 77, N. 9. P. 1676–1688.

Stabilization System of Convey-Crane Position Via Sigmoidal Function

A. S. Antipov, scholess18@mail.ru, S. A. Krasnova, skrasnova@list.ru,

V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997, Russian Federation

Corresponding author: Antipov Aleksey S., Mathematician, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997, Russia, e-mail: scholess18@mail.ru

Accepted on June 23, 2019

Abstract

In this paper, we consider the convey-crane system, which can transport loads for industrial purposes. The mathematical model, describing the motion of convey-crane, is presented by a Lagrangian mechanical system of nonlinear equations with two degrees of freedom and one control action. It is supposed that the rope has no mass, its stiffness is not taken into account, and there is no friction in the joints. The stabilization problem of the desired convey-crane position is posed under uncertain mass inertia characteristics, an action of non-smooth bounded disturbances and incomplete measurements. Based on the passivity property, the control law with linear and sigmoidal parts is constructed for the solution of the problem. The only measurement of the convey-crane position is available without a noise in the measurements. We use the low order observer with sigmoidal corrective action to obtain the needed velocity estimates for the control law. It is shown that the using of sigmoidal function as a prelimit realization of sign-function provides disturbances invariance with the given accuracy. With respect to the smoothness and boundness, sigmoidal function helps to avoid overshoot in the transient responses and excessive consumption of control resources. Moreover, unlike the sign-function, a sigmoidal function is realized in the electromechanical systems with actuator dynamics, in which the physical restrictions on the forces and general moments are posed. The constructed control law with linear and sigmoidal parts is simulated for the convey-crane system in MATLAB- Simulink. The classical PD-controller is simulated too for the purpose of comparison. The results of modeling are proved the effectiveness of the proposed approach.

Keywords: mechanical system, underactuated system, convey-crane, passivity, sigmoidal function, invariance, reduced order state observer, stabilization, disturbance, parametric uncertainties

Acknowledgements: This article was prepared with the financial support of Russian Foundation for Basic Research (18-01-00846A).

For citation:

Antipov A. S., Krasnova S. A. Stabilization System of Convey-crane Position Via Sigmoidal Function, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 10, pp. 609–614.

DOI: 10.17587/mau.20.609-614

References

1. Le Tuan Anh, Gook-Hwan Kim, Min Young Kim, Soon-Geul Lee. Partial Feedback Linearization Control of Overhead Cranes with Varying Cable Lengths, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, vol. 13, no. 4, pp. 501–507.
2. Bálint K., Na W. Robust exact linearization of a 2D overhead crane, *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51, no. 22, pp. 354–359.
3. Anan'evskii I. M. The Control of a Three-Link Inverted Pendulum Near the Equilibrium Point, *Mechanics of Solids*, 2018, vol. 53, pp. 16–21.
4. Fantoni I., Lozano R. Non-linear control for underactuated mechanical systems, London: Springer Verlag, 2002, pp. 43–51.
5. Diantong Liu, Weiping Guo, Jianqiang Yi, Dongbin Zhao. Passivity-based-control for a class of underactuated mechanical

systems // *Proceedings of 2004 International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation*, 2004, pp. 50–54.

6. Romero J. G., Donaire A., Borja P. Global Stabilisation of Underactuated Mechanical Systems via PID Passivity-Based Control, *IFAC-PapersOnLine*, 2017, vol. 50, no. 1, pp. 9577–9582.
7. Papadopoulos A. D., Rompokos A. A., Alexandridis A. T. Nonlinear and observer-based PD position and sway control of convey-crane systems, *2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, 2016, pp. 696–700.
8. Slotine J. E. Sliding controller design for non-linear systems, *International Journal of Control*, 1984, vol. 40, no. 2, pp. 421–434.
9. Utkin V. I., Guldner J., Shi J. Sliding mode control in electromechanical systems, NewYork, CRC Press, 2009, 503 p.
10. Qian D., Yi J., Zhao D., Hao Y. Hierarchical Sliding Mode Control for Series Double Inverted Pendulums System, *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006, pp. 4977–4982.
11. Yi-Jen Mon, Chih-Min Lin. Hierarchical fuzzy sliding-mode control, *2002 IEEE World Congress on Computational Intelligence. 2002 IEEE International Conference on Fuzzy Systems. FUZZ-IEEE'02. Proceedings (Cat. No.02CH37291)*, 2002, vol. 1, pp. 656–661.
12. Krasnova S. A., Utkin A. V. Sigma function in observer design for states and perturbations, *Automation and Remote Control*, 2016, vol. 77, no. 9, pp. 1676–1688.