

УДК 62-83

**В. В. Бушер**, д-р техн. наук,  
**Л. В. Мельникова**, канд. техн. наук,  
**А. И. Шестака**

### ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ КОНТЕЙНЕРНОГО ПЕРЕГРУЖАТЕЛЯ ПРИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ МЕХАНИЗМОВ

*Аннотация.* Для оптимизации работы контейнерного перегружателя рассмотрено применение оптимального по быстродействию закона управления механизмом горизонтального перемещения в сочетании с работой электроприводов подтягивающих тросов для подавления колебаний груза. Применен наблюдатель механизма передвижения с подтягивающими тросами и управления скоростями идеального холостого хода электроприводов этого механизма. В результате исследований доказано, что сочетание этих законов управления позволяет эффективно подавлять колебания груза, возникающие в результате действия задающих и возмущающих воздействий, а также из-за погрешностей определения параметров механизма.

**Ключевые слова:** механизм горизонтального перемещения груза, оптимальный по быстродействию закон управления, демпфирование колебаний, электропривод подтягивающих тросов, формирователь управляющих сигналов, наблюдатель механизма передвижения

**V. Busher**, ScD.,  
**L. Melnikova**, PhD.,  
**A. Shestaka**

### OPTIMIZATION CONTROL OF CONTAINER CRANES ELECTRIC DRIVES AT COORDINATED OPERATION OF THE MECHANISMS

*Abstract.* To optimize the container cranes were considered the application of time-optimal control law mechanism for horizontal movement in conjunction with the operation of the drive pull-up rope to suppress the oscillation of the load. Was applied to the movement of the observer mechanism tightens the rope and control the speed of the ideal no-load electric drives this mechanism. The studies demonstrated that the combination of these control laws effectively suppress fluctuations cargo arising as a result of defining and disturbances, as well as due to errors in determining the parameters of the mechanism.

**Keywords:** mechanism for horizontal movement of cargo-optimal control law, vibration damping, electric pull-up cables, generator control signals, the observer mechanism of movement with ropes

**В. В. Бушер**, д-р техн. наук,  
**Л. В. Мельникова**, канд. техн. наук,  
**А. И. Шестака**

### ОПТИМІЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ КОНТЕЙНЕРНОГО ПЕРЕВАНТАЖУВАЧА ПІД ЧАС СПІЛЬНОЇ РОБОТИ МЕХАНІЗМІВ

*Анотація.* Для оптимізації роботи контейнерного перевантажувача розглянуто застосування оптимального за швидкодією закону управління механізмом горизонтального переміщення в поєднанні з роботою електроприводів підтягуючих тросів для демпфування коливань вантажу. Був застосований спостерігач механізму пересування з підтягуючими тросами та управління швидкостями ідеального холостого ходу електроприводів цього механізму. В результаті досліджень доведено, що поєднання цих законів управління дозволяє ефективно гасити коливання вантажу, що виникають в результаті збурюючих впливів, а також через похибки визначення параметрів механізму.

**Ключові слова:** механізм горизонтального переміщення вантажу, оптимальний за швидкодією закон управління, демпфування коливань, електропривод підтягуючих тросів, формувач керуючих сигналів, спостерігач механізму пересування

**Введение.** Механизмы горизонтального перемещения причальных и тыловых контейнерных перегружателей характеризуются относительно продолжительными переходными процессами из-за раскачивания, подвешенного на канате груза.

Учитывая, что операции перемещения занимают основную часть времени перегрузки контейнера и поэтому определяют производительность погрузочно-разгрузочных работ, то основным критерием оптимизации динамической системы механизма передвижения крана с подвешенным грузом рассматривается быстродействие. Критерий

© Бушер В.В., Мельникова Л.В.,  
Шестака А.И., 2015

оптимальности реализуется путем воздействия на точку подвеса каната силой  $F(t)$ , закон изменения которой формируется, исходя из основной цели управления – обеспечить к концу переходного процесса успокоение груза и вертикальное расположение каната. Но учитываются также естественные и условные ограничения. Естественные ограничения отражают допустимые по технологическим соображениям ограничения управляемых координат (ускорений, скоростей) и управляющего воздействия (силы) по модулю, вытекающие собственно из свойств системы и её элементов. Условные ограничения вводятся в систему сознательно с целью выполнения задачи управления – скорости точки подвеса и груза по окончании переходного процесса должны быть равны, ускорения и отклонение каната от вертикали должны быть равны нулю.

Одним из возможных путей оптимизации переходного процесса, механизма передвижения крана и решения, таким образом, поставленной задачи является использование принципа максимума Понтрягина [1]. Он позволяет учесть ограничения на управляющие воздействия, подводимые к объекту управления, и наиболее эффективен при синтезе систем, оптимальных по быстродействию.

В приведенном в конце работы списке литературы представлены основные направления решения поставленной задачи – с 3-, 5-кратным переключением управляющего воздействия между максимальным и минимальными значениями [3 – 5; 7 – 9], с управлением скоростью точки подвеса в соответствии с желаемым законом отклонения каната от вертикали [6; 10]. Пример при 3-х кратном переключении движущего усилия приведен на рис. 1. Теоретически при оптимальном управлении механизмом без подтягивающих тросов в соответствии с принципом максимума Понтрягина получаем переходные процессы, при которых колебания груза по окончании разгона механизма отсутствуют, а реальные скорости точки подвеса и груза  $v_{1r}, v_{2r}$  совпадают с расчетными  $v_1, v_2$ .

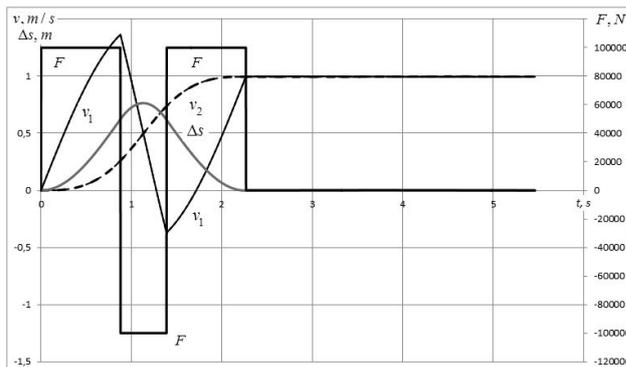


Рис. 1. Графики переходных процессов пуска при оптимальном управлении

Однако при использовании получаемых законов управления механизмами возникают сложности: необходимо с высокой точностью измерять соотношение масс груза и механизма передвижения и расстояние от точки подвеса до центра тяжести груза с учетом масс каната, грузозахватного устройства. Эти величины определяют формируемый закон управления. Кроме того, на механизмы горизонтального перемещения действуют различные возмущающие воздействия – ветер, трение. Сочетание ошибок определения параметров и возмущающих воздействий приводит к возникновению остаточных колебаний груза, амплитуда которых может быть весьма существенной (рис. 2).

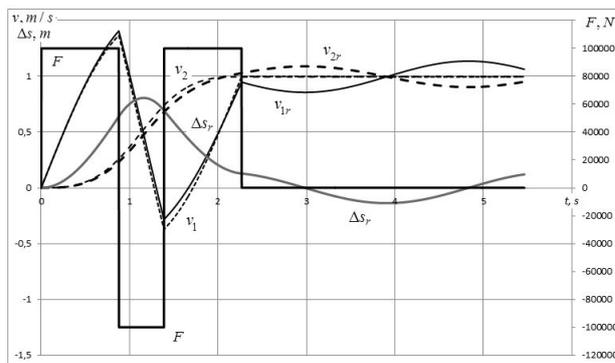


Рис. 2. Графики переходных процессов пуска при использовании принципа максимума, но наличии ошибки определения параметров

Для получения менее чувствительных систем используют принципы нечеткой логики [11]. Но для работы последних необходимы сигналы обратных связей по отклонению каната от вертикали и скорости его изменения, измерение которых на практике затруднительно.

С другой стороны, для демпфирования колебаний во многих кранах используют дополнительные подтягивающие тросы. Механические характеристики приводов подтягивающих тросов обычно характеризуются некоторой жесткостью  $\beta$  и ограничением усилия  $F_{\max}$ . Во время работы задаваемая скорость идеального холостого хода всех подтягивающих приводов незначительно отличается от скорости подъема груза, чтобы не допустить провисания подтягивающих тросов. С точки зрения груза подтягивающие приводы работают в режиме динамического торможения, воздействуя на груз дополнительными горизонтальными составляющими сил, практически пропорциональными разности заданной скорости подъема/спуска и скорости движения тросов. Такое воздействие эквивалентно гибкой обратной связи по отклонению груза от вертикали и эффективно подавляет остаточные колебания, обусловленные как намеренными (пуск, торможение), так и случайными возмущающими внешними воздействиями. Однако время подавления раскачивания таким способом сопоставимо с одним-двумя периодами колебаний физического маятника и оказывается существенно дольше, чем при оптимальных законах управления механизмами с подвешенным грузом.

Возникает желание объединить оптимальные законы управления и использование подтягивающих тросов. Проблема заключается в том, что действие тросов препятствует реализации оптимальных законов.

**Целью исследования** является разработка закона согласованного управления механизмами горизонтального перемещения подвешенного груза с реализацией принципа максимума и системой подавления колебаний с подтягивающими тросами.

**Материалы исследований.** Проанализируем расчетную схему механизма перемещения груза  $G$  на канате длиной  $l$  с подвесом груза на тележке в точке  $O$  и точками крепления подтягивающих тросов 1, 2 на расстоянии  $base$  от центра  $O$  (рис. 3).

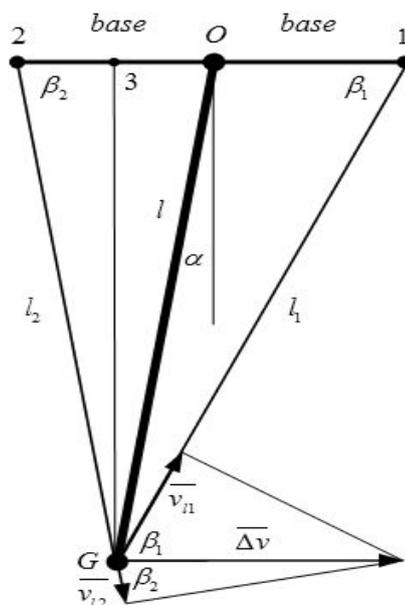


Рис. 3. Расчетная схема механизма горизонтального перемещения

При движении тележки со скоростью  $v_1$  и груза со скоростью  $v_2$  и при отклонении каната от вертикали на угол  $\alpha$  длины подтягивающих тросов  $l_1, l_2$  изменяются со скоростями  $\overline{v_{11}}, \overline{v_{12}}$ :

$$\begin{aligned} v_{11} &= (v_1 - v_2) \cos \arctg \frac{l \cos \alpha}{base + l \sin \alpha}, \\ v_{12} &= -(v_1 - v_2) \cos \arctg \frac{l \cos \alpha}{base - l \sin \alpha}. \end{aligned} \quad (1)$$

Однако при оптимальном управлении процессами пуска/торможения из-за действия подтягивающих тросов также получим неудовлетворительный результат, так как подтягивающие тросы искажают траекторию движения груза. На рис. 4 показаны графики изменения усилий, развиваемых приводами подтягивающих тросов

$$\begin{cases} F_{d1} = -v_{11} \beta, \\ F_{d2} = -v_{12} \beta, \end{cases} \quad \forall 0 \leq F_{d1,2} \leq F_{\max},$$

расчетная и фактическая скорости груза и остаточные колебания  $\Delta s_r$ , которые затухают вдвое дольше длительности процесса пуска. Видно, что усилия в подтягивающих тросах большую часть переходного процесса велики и ограничены максимально допустимыми значениями даже при правильном определении параметров механизма.

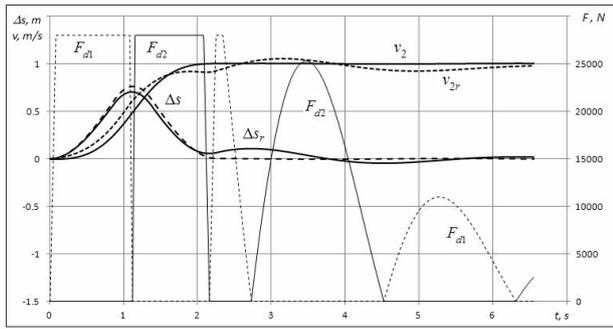


Рис. 4. Графики переходных процессов при реализации оптимального управления и независимой работе подтягивающих электроприводов

Пусть в соответствии с выбранным способом подавления колебаний груза известен закон изменения усилия, скоростей механизма перемещения и груза:

$$a_1 = \frac{F(t)}{m_1} - g \frac{m_2}{m_1} \alpha, \quad \frac{dv_1}{dt} = a_1, \quad \frac{ds_1}{dt} = v_1, \quad (2)$$

$$a_2 = g \alpha, \quad \frac{dv_2}{dt} = a_2, \quad \frac{ds_2}{dt} = v_2.$$

Тогда можно рассчитать как изменение угла отклонения каната от вертикали  $\alpha$ , так и углы отклонения  $\beta_1, \beta_2$  и скорости  $v_{11}, v_{12}$  подтягивающих тросов:

$$\alpha = \frac{s_1 - s_2}{l},$$

$$\beta_1 = \arctg \frac{l \cos \alpha}{base + l \sin \alpha},$$

$$\beta_2 = \arctg \frac{l \cos \alpha}{base - l \sin \alpha}, \quad (3)$$

$$\Delta v = v_2 - v_1,$$

$$v_{11} = \Delta v \cos \beta_1,$$

$$v_{12} = -\Delta v \cos \beta_2.$$

Зададим скорости идеального холостого хода электроприводов подтягивающих тросов  $v_{10}, v_{20}$ , равными расчетным скоростям тросов,

$$v_{10} = v_{11}, \quad (4)$$

$$v_{20} = v_{12}.$$

Полученная система уравнений (2)–(4) представляет собой наблюдатель механизма передвижения, параметры которого

$m_1, m_2, l, base$  заданы, а сила  $F$  изменяется по выбранному закону.

Такая модель механизма встраивается в систему управления в качестве формирователя управляющих сигналов  $F(t)$  для электропривода механизма передвижения и сигналов  $v_{10}, v_{20}$  для электроприводов подтягивающих тросов. Функциональная схема системы приведена на рис. 5.

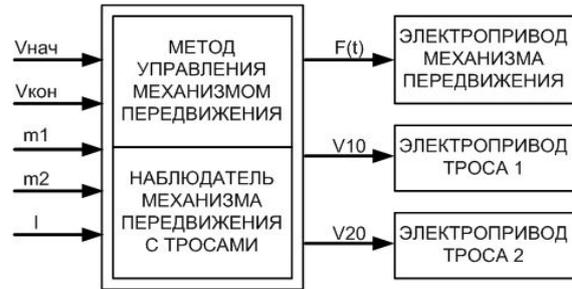


Рис. 5. Функциональная схема системы управления механизмом горизонтального перемещения

Тогда при совпадении реальных параметров механизма с расчетными получим переходные процессы, эквивалентные теоретическим (рис. 1).

При ошибке определения параметров получим переходные процессы, графики которых изображены на рис. 6. По сравнению с рис. 4 амплитуда остаточных колебаний уменьшена в четыре раза. Также уменьшена нагрузка приводов подтягивающих тросов как в процессе разгона тележки, так и при демпфировании остаточных колебаний – усилия не попадают в область ограничения, что при правильном выборе жесткости характеристик  $beta$  способствует эффективно подавлению колебаний [5].

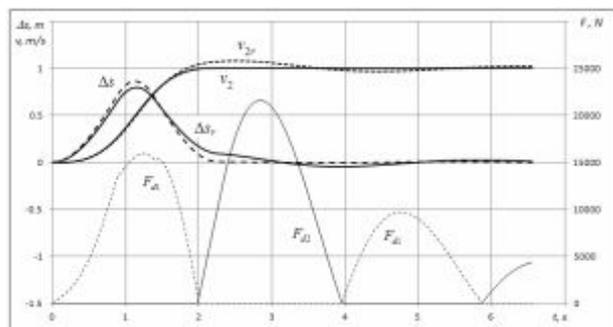


Рис. 6. Графики переходных процессов при согласованном управлении механизмами перемещения и подтягивания

**Выводы.** Таким образом, путем включения в систему управления наблюдателя механизма передвижения с электроприводами подтягивающих тросов и управлением скоростями идеального холостого хода этих приводов получена возможность эффективного сочетания оптимальных по быстродействию законов управления механизмом горизонтального передвижения груза и подавления колебаний, обусловленных возмущающими факторами и погрешностями определения параметров механизма.

#### Список используемой литературы

1. Понтрягин Л. С. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. – М. : Наука, 1969. – 344 с.
2. Ключев В. И. Ограничение динамических нагрузок электропривода / В. И. Ключев. – М. : Энергия, 1971 – 320 с.
3. Масандилов Л. Б. Электропривод подъёмных кранов / Л. Б. Масандилов. – М. : Изд-во МЭИ, 1998. – 72 с.
4. Герасимьяк Р. П. Динамика асинхронных электроприводов крановых механизмов / Р. П. Герасимьяк. – М. : Энергоатомиздат, 1986 – 168 с.
5. Герасимьяк Р. П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем / Р. П. Герасимьяк, В. А. Лещев. – Одесса : СМІЛ, 2008. – 192 с.
6. Бушер В. В. Анализ и сравнение различных способов демпфирования колебаний подвешенного на канате груза [Текст] / В. В. Бушер, Л. В. Мельникова // Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды КГПИ. – Кременчуг : – 2000. – КГПИ. – Вып. 1/ 2000 (8). – С. 236 – 240.
7. Герасимьяк Р. П. Математическая модель электромеханической системы механизма передвижения крана с подвешенным грузом при оптимальном управлении [Текст] / Р. П. Герасимьяк, В. В. Бушер, Л. В. Мельникова // Вестник Херсонского государственного технического университета. – Херсон : – 2000. – ХГТУ. – Вып. 2(8). – С. 74 – 76.
8. Gerasymyak R., Melnikova L.V., Shestaka A.I., (2005), Optimal Control of Electric Drive Rotational Mechanisms Accounting for the Mechanical Components, *5-th Conf. on*

*Technology and Automation 2005*, Thessaloniki, pp. 264 – 266.

9. Kurt Reinschke, (2005), *Lineare Regelungs- und Steuerungstheorie*, Dresden, Springer, 450 p.

10. Thomsen S., Fuchs F.W., (2009), *Speed Control of Tensional Drive Systems with Backlash*, *13th European Conference on Power Electronics and Application*, pp. 1 – 10.

11. Heinz Unbehauen. *Regelungstechnik I. Klassische Verfahren zur Analyse und Synthese Linearer Kontinuierlicher Regelsysteme Fuzzy-Regelsysteme*, 20 p.

Получено 18.02.2015

#### References

1. Pontryagin L.S., Boltyanskiy V.G., Gamkrelidze R.V., and Mischenko E.F. *Matematicheskaya teoriya optimalnykh protsessov* [Mathematical theory of Optimal Processes], (1969). Moscow, Russian Federation, *Nauka*, 344 p. (In Russian)
2. Klyuchev V.I. *Ogranichenie dinamicheskikh nagruzok elektroprivoda* [Restricting the Dynamic Loads of the Electric Drive], (1971), Moscow, Russian Federation, *Energy*, 320 p. (In Russian).
3. Masandilov L.B. *Elektroprivod podionnuy kranov* [Electric Drive of Crane], (1998), *MEI*, 72 p. (In Russian).
4. Gerasymyak R.P. *Dinamika asinkhronnykh elektroprivodov kranovykh mekhanizmov* [Dynamics of Asynchronous Electric Drive of Crane Mechanisms], (1986), Moscow, Russian Federation, *Energiatompublish*, 168 p. (In Russian).
5. Gerasymyak R.P., and Leshchev V. A. *Analiz i sintez kranovykh elektromekhanicheskikh system*, [Analysis and Synthesis Electromechanical Systems of Cranes], (2008), Odessa, Ukraine, *SMIL*, 192 p. (In Russian).
6. Buser V.V., and Melnikova L.V. *Analiz i sravnenie razlichnyih sposobov dempfirovaniya kolebaniy podveshennogo na kanate gruzu* [Analysis and Comparison of Different Methods of Damping Suspended on a Rope Cargo], (2000), *Problemyi Sozdaniya Novyih Mashin i Tehnologiy. Nauchnyie Trudyi KGPI*, Kremenchug, Ukraine, *KGPI*. Vyip. 1 /

2000 (8), pp. 236 – 240 <http://aep.at.ua/load/1-1-0-353> (In Russian)

7. Gerasimyak R.P., Buser V.V., and Melnikova L.V. Matematicheskaya model elektromehanicheskoy sistemy mehanizma peredvizheniya krana s podveshennym gruzom pri optimalnom upravlenii [Mathematical Model of the Crane Electromechanical System with a Suspended Load in the Optimal Control], (2000), *Vestnik Hersonskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Univesiteta*, Herson, Ukraine, *HGTU*, Vol. 2(8), pp. 74 – 76. (In Russian)

8. Gerasymiak R., Melnikova L. V., and Shestaka A. I., (2005), Optimal Control of Electric Drive Rotational Mechanisms Accounting for the Mechanical Components, *5th Conf. on Technology and Automation*, Thessaloniki, pp. 264 – 266 (In English).

9. Kurt Reinschke, (2005), *Lineare Regelungs- und Steuerungstheorie*, Springer, Dresden, 450 p. (In German).

10. Thomsen S., and Fuchs F.W., (2009), Speed Control of Torsional Drive Systems with Backlash, *13-th European Conference on Power Electronics and Application*, pp. 1 – 10 (In English).

11. Heinz Unbehauen. Regelungstechnik I. Klassische Verfahren zur Analyse und Synthese Linearer Kontinuierlicher Regelsysteme, *Fuzzy-Regelsysteme*, 20 p. (In German).



Бушер  
Виктор Владимирович,  
д-р техн. наук, проф. каф.  
электромеханических  
систем с компьютерным  
управлением Одесского  
нац. политехн. ун-та,  
т.+38(050)3908809.  
E-mail:  
victor.v.bousher@gmail.com



Мельникова  
Любовь Васильевна,  
канд. техн. наук, доц. каф.  
электромеханических  
систем с компьютерным  
управлением Одесского  
нац. политехн. ун-та,  
т.+38(067)9494290.  
E-mail:  
lubam@meta.ua



Шестака  
Анатолий Иванович,  
ст. преподаватель каф.  
судовой электромеханики  
и электротехники  
Одесской нац. морской  
академии;  
т.+38(050)3368216.  
E-mail:  
a.shestaka@gmail.com