

**Рациональные методы гашения колебаний груза,
возникающих при работе кранов**

А.О. Немчук

к.т.н., доцент, доцент кафедры «Подъемно-транспортные машины
и инжиниринг портового технологического оборудования»

П.М. Стрельцов

к.т.н., доцент, доцент кафедры «Подъемно-транспортные машины
и инжиниринг портового технологического оборудования»

Одесский национальный морской университет

Аннотация. Рассмотрены методы расчета некоторых видов управления тележкой перегружателя, переносящей груз на подвесе переменной длины, которое обеспечивает гашение колебаний груза и содержит минимальное число переключений управляющего параметра. Автоматическая реализация управлений подобных видов должна обеспечить достаточно высокую производительность машины при уменьшении интенсивности ее усталостного износа и сохранении расчетной долговечности.

Ключевые слова: перегружатель, подвес переменной длины, гашение колебаний груза, долговечность машины.

**Рациональні методи гасіння коливань вантажу,
що виникають при роботі кранів**

О.О. Немчук

к.т.н., доцент, доцент кафедри «Підйомно-транспортні машини
та інжиніринг портового технологічного обладнання»

П.М. Стрельцов

к.т.н., доцент, доцент кафедри «Підйомно-транспортні машини
та інжиніринг портового технологічного обладнання»

Одеський національний морський університет

Анотация. Розглянуто методи розрахунку деяких видів управління візком перевантажувача, що переміщує вантаж на підвісі змінної довжини, яке забезпечує гасіння коливань вантажу та має мінімальну кількість перемикачів параметру управління. Автоматична реалізація управління подібного виду має забезпечити достатньо високу продуктивність машини при зменшенні швидкості її втомленісного зношування та збереженні розрахункової довговічності.

Ключові слова: перевантажувач, підвіс змінної довжини, гасіння коливань вантажу, довговічність машини.

© Немчук А.О., Стрельцов П.М., 2018

UDC 621.873.254

**Rational methods of load swing damping,
arising from the operation of cranes**

A.O. Nemchuk

Ph.D., associate Professor of the Department «Lifting and Transporting Machines
and Engineering of Port technological Equipment»

P.M. Streltsov

Ph.D., associate Professor of the Department «Lifting and Transporting Machines
and Engineering of Port technological Equipment»

Odessa National Maritime University

Abstract. *Methods of calculation of some kinds of control of trolley transported cargo on the rope with varying length which provide dampening of cargo sway and contain minimal quantity of switching of the control parameter are regarded.*

Automatic realization of such kinds of control must provide high enough productivity, diminish fatigue and preserve rated working time of the loader.

Keywords: *loader, rope with varying length, cargo sway damping, rated working time.*

Введение. Одним из наиболее эффективных средств разгрузки судов с навалочными грузами являются грейферно-конвейерные перегружатели с прямолинейными рабочими движениями. Такие перегружатели состоят из высокого портала с расположенной на нем перпендикулярно причалу ездовой балкой, вдоль которой перемещается тележка с подвешенным к ней на гибком подвесе грузозахватным устройством – грейфером. Груз, зачерпнутый грейфером в трюме судна, переносится к установленному под порталом бункеру, откуда он пересыпается на конвейер, направляющий груз к месту следующего этапа обработки (складированию, дроблению или погрузке на сухопутные виды транспорта).

Сравнительно простая конструктивная схема перегружателя позволяет обеспечить высокие скорости его рабочих движений [1]. Так, скорость перемещения тележки может достигать 300 м/мин (5 м/с) при ускорении в периоды разгонов и торможений до $1,5 \text{ м/с}^2$, а скорость подъема заполненного грейфера – 120 м/с. При таких скоростях длительность рабочего цикла может составлять всего 45 с, а производительность перегружателей в зависимости от грузоподъемности (20-60 т) может достигать от 2 до 6 тыс. тонн/час [1].

Работа операторов таких машин является весьма напряженной. Несмотря на тщательный учет требований эргономики при проектировании кабины и органов управления и максимальную «гуманизацию» условий труда, операторы быстро утомляются, в их работе появляются многочисленные ошибки, приводящие к существенному снижению производительности.

Значительное негативное воздействие на работу перегружателей оказывает возникающее при горизонтальном перемещении раскачивание груза на канатах. При ручном управлении на гашение колебаний, необходимое для точного наведения грейфера на бункер, оператор вынужден затрачивать до 40 % длительности рабочего цикла.

Для поддержания высокой производительности, независимой от квалификации оператора, внешних воздействий и др., на современных грейферных перегружателях (а также на контейнерных перегружателях, имеющих аналогичную с грейферными конструкцию и часто используемых в грейферном режиме) устанавливаются «электронные» системы автоматического гашения колебаний груза. Основным элементом таких систем являются бортовые ЭВМ, реализующие заранее рассчитанные законы управления механизмами крана, при которых точка подвеса груза перемещается таким образом, что колебания груза при подходе к бункеру оказываются полностью погашенными [2].

Постановка задачи. К настоящему времени достаточно полно разработаны методы расчета управлений, обеспечивающих гашение колебаний при переносе груза на подвесе неизменной длины. При этом наибольшее внимание уделялось поиску управлений, при которых перенос груза в требуемое положение осуществлялся бы за возможно меньшее время [3]. Такие управления обычно содержат большое число переключений управляющего параметра (момента двигателя, ускорения и т.п.), что, во-первых, значительно усложняет их реализацию, и во-вторых, вызывает увеличение числа нагружений деталей и металлоконструкции машины и быстро делает их непригодными к использованию из-за усталостного износа.

В настоящей работе предлагаются методы поиска управлений движением точки подвеса груза, имеющих наименьшее (всего одно или два) число переключений управляющего параметра. Использование таких управлений должно способствовать минимизации скорости усталостного изнашивания, повышению долговечности узлов машины и существенному снижению расходов на их обслуживание и ремонт при обеспечении достаточно высокой производительности перегрузочных работ.

Содержание и результаты исследования. Различные виды желаемых управлений могут быть определены при помощи математических моделей движения тележки и груза [4].

В качестве расчетной схемы, используемой при построении математической модели (набора уравнений движения) грузовой тележки принимается двухмассовая система (рис. 1).

Масса m_t , представляющая тележку, перемещается горизонтально под воздействием параметра управления. В качестве параметра управления удобно использовать ускорение $a(t)$ точки подвеса, поскольку современный электропривод позволяет произвольно менять эту величину и реализовывать практически любой заданный закон изменения ускорения в

пределах, определяемых мощностью привода. Ограничение на параметр управления записывается в виде

$$|a(t)| \leq a_{\max}. \quad (1)$$

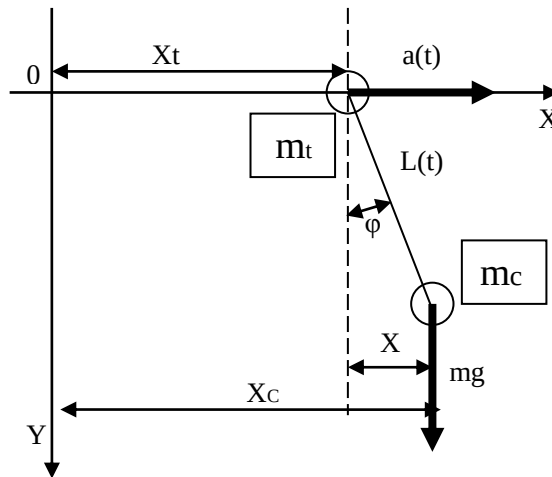


Рис. 1. Расчетная схема системы тележка-груз

Вторая масса m_c представляет массу груза в виде материальной точки, расположенной в центре тяжести груза. Масса m_c соединяется с m_t невесомой нерастяжимой нитью (подвесом). Для сокращения времени цикла горизонтальное перемещение тележки часто совмещают с вертикальным перемещением груза, изменяя длину подвеса. Учитывая возможности современного электропривода, длину подвеса можно считать некоторой заданной (в соответствии с геометрическими параметрами цикла) функцией времени $L(t)$.

Горизонтальное перемещение груза вызывается горизонтальной составляющей усилия в подвесе. Это усилие может меняться при раскачивании и изменении длины подвеса, однако эти изменения влияния на характер движения груза практически не оказывают, в связи с чем при составлении математической модели усилие в подвесе принималось постоянным, равным весу груза.

Уравнения математической модели описывают связь между параметрами управления и параметрами, характеризующими состояние системы (их называют фазовыми координатами) [5].

К параметрам состояния относятся:

$X_1 = X_t$ – координата точки подвеса;

X_2 – скорость точки подвеса;

$X_3 = X_c$ – горизонтальная координата груза;

X_4 – горизонтальная скорость груза;

$X = (X_1 - X_3) = (X_t - X_C)$ – отклонение груза от вертикали.

На некоторые параметры состояния условиями работы или свойствами привода могут быть наложены ограничения. Например, ограничение на скорость тележки имеет вид

$$X_2 \leq X_2^{\max}. \quad (2)$$

При этом математическая модель может быть представлена в виде системы из четырех обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, разрешенных относительно производных:

$$\begin{aligned} X_1' &= X_2; \\ X_2' &= a(t); \\ X_3' &= X_4; \\ X_4' &= g(X_1 - X_3)/L(t). \end{aligned} \quad (3)$$

Из системы (3) можно получить уравнение движения груза относительно точки подвеса

$$(X_1 - X_3)'' + g(X_1 - X_3)/L(t) = a(t). \quad (4)$$

Если разгон тележки вести с постоянным ускорением ($a = \text{const}$), а длину подвеса сохранять неизменной ($L = \text{const}$), то уравнение (4) колебаний груза можно записать в виде обыкновенного дифференциального линейного неоднородного уравнения 2-го порядка

$$X'' + k^2 X = a, \quad (5)$$

где

$$X = (X_1 - X_3) \text{ – отклонение груза от вертикали; } k = \sqrt{g/L}.$$

Решив это уравнение стандартным способом при нулевых начальных условиях (т.е. считая, что движение системы начинается из состояния покоя, когда груз висит без колебаний) будем иметь

$$X(t) = a(1 - \cos kt)/k^2 \quad (6)$$

$$X'(t) = a \sin kt/k.$$

Как видно из уравнений (6), при указанных условиях во время разгона тележки груз совершает гармонические колебания относительно

равновесного положения a/k^2 с периодом $\tau = 2\pi\sqrt{L/g} \approx 2\sqrt{L}$. К концу каждого периода груз возвращается на вертикаль, проходящую через точку подвеса (т.е. при этом $X(\tau) = 0$), а его скорость достигает скорости тележки ($X_2(\tau) = X_4(\tau)$).

Используя эту особенность раскачивания груза, можно предложить следующий способ поиска нужного управления тележкой:

- определяют период колебаний груза $\tau = 2\sqrt{L}$.
- задаваясь предельной скоростью $X_2^{\max}$ тележки, определяют ускорение $a = X_2^{\max} / \tau$, при котором разгон тележки заканчивается в момент $t_1 = \tau$, в этот момент груз будет висеть вертикально, а тележка и груз будут двигаться с одинаковой скоростью;
- современный электропривод тележки обладает определенным свойством автоматичности, благодаря которому тележка без необходимости в каких-то дополнительных переключениях управляющего воздействия по достижении предельной скорости, заданной системой управления, начинает двигаться равномерно, синхронно с грузом;
- задаваясь величиной S пути тележки, определяют момент t_2 окончания равномерного движения и перехода к торможению по формуле

$$t_2 = S / X_2^{\max} \quad (7)$$

- если в этот момент переключить управление на « $-a$ », то движение тележки и груза будет симметрично их движению при разгоне, и к концу торможения груз окажется неподвижно висящим под неподвижной точкой подвеса.

На основании описанного плана составлена программа для ЭВМ расчета текущих параметров движения механической системы тележка-груз.

Один из разделов программы используется для расчета параметров управляющего воздействия $a(t)$. Основная часть программы предназначена для численного интегрирования дифференциальных уравнений (3) движения исследуемой материальной системы (из начального состояния покоя до конечной точки пути тележки) при рассчитанном управлении.

При помощи указанной программы выполнен расчет параметров движения грейферного перегружателя. Расчет проводился с учетом геометрических и кинематических характеристик причального грейферного перегружателя фирмы «Крупп», установленного в Днепро-Бугском порту (г. Николаев): максимальная скорость тележки – 3 м/с, максимальное ускорение тележки – 1,4 м/с, скорость подъема – 2 м/с, ускорение подъ-

ема – 1 м/с. Наиболее характерными значениями геометрических параметров рабочего цикла перегружателя являются: длина пути тележки (от места захвата в трюме до центра бункера) – 32 м, длина подвеса над бункером – 16 м.

По результатам расчета построены графики (рис. 2) изменения параметров движения системы тележка-груз при ее перемещении на заданное расстояние.

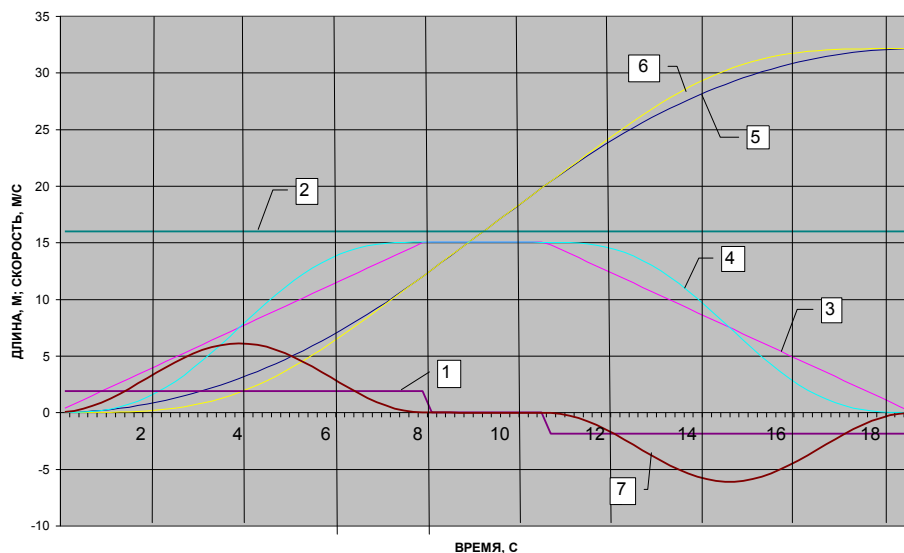


Рис. 2. Графики параметров движения системы тележка-груз в случае равенства времени разгона периоду колебаний

На рисунке графики пронумерованы в следующем порядке: 1 – ускорение точки подвеса (управление); 2 – длина подвеса; 3 – скорость точки подвеса; 4 – абсолютная горизонтальная скорость груза; 5 – перемещение тележки; 6 – горизонтальное перемещение груза; 7 – отклонение груза от вертикали. Для удобства пользования рисунком графики 1, 3, 4, 7 даны в увеличенном (в 5 раз) масштабе.

Как видно из рисунка, рассчитанное управление обеспечивает полное гашение колебаний груза к моменту подхода к конечной точке пути. Колебания оказываются также погашенными к концу разгона, что позволяет пройти значительную часть пути без раскачивания груза. При этом ускорение тележки составляет 0,375 м/с, время разгона – 8 с, скорость равномерного движения – 3 м/с, максимальное отклонение груза от вертикали равно 1.22 м, время переноса груза – 18,6 с.

Необходимо иметь в виду, что геометрические параметры цикла позволяют начинать горизонтальное перемещение груза при длине подвеса 24 м.

Для безопасного подвода грейфера к бункеру длина подвеса должна сократиться на 8 м (до 16 м), на что потребуется 5 с, т.е. общее время перемещения груза с учетом его подъема до уровня бункера составит 23,6 с.

Достоинством рассмотренного метода является возможность погасить колебания груза только при одном переключении параметра управления и сравнительно небольшом скачке нагрузки и тем существенно уменьшить интенсивность усталостного износа машины.

Недостатком является ограничение ускорения при разгоне и торможении ($a = 0,375$ м/с при допускаемом приводе $a = 1,4$ м/с), что приводит к затягиванию переходных процессов, чрезмерному увеличению длительности цикла и уменьшению производительности.

Можно предложить еще один метод, обеспечивающий гашение колебаний только при одном переключении управления, который состоит в том, что разгон тележки совершается с максимальным ускорением, допускаемым мощностью двигателя. Затем следует этап равномерного движения тележки и, наконец, этап торможения также с максимальным (по модулю) ускорением и симметричным по отношению к разгону движением груза. При таком способе длительности переходных периодов будут минимальными. Однако скорость $X_2^{p\partial}$ равномерного движения тележки необходимо подбирать такой, чтоб обеспечивалось гашение колебаний груза в конечной точке. Эта скорость может оказаться значительно ниже возможной максимальной скорости $X_2^{\max}$.

Подбор нужной скорости можно осуществить при помощи специального итерационного (повторяющегося) процесса. После каждой итерации оценивается пригодность полученного результата по критерию оптимальности, в качестве которого можно использовать энергию остаточных колебаний груза в конечной точке. Целевая функция, соответствующая этому критерию, имеет вид

$$E = g(X_1 - X_3)^2 / L + (X_4)^2, \quad (8)$$

где первое слагаемое пропорционально потенциальной, а второе – кинетической энергии остаточных колебаний.

Поиск необходимой скорости ведут в соответствии со следующим алгоритмом.

1. Задают исходные параметры для расчета: путь тележки S , длину подвеса L , ускорение « a »;
2. Задаются значением скорости $X_2^{p\partial}$ (начиная с максимального допускаемого приводе);
3. Определяют моменты времени t_1 (окончание разгона) и t_2 (начало торможения) переключений управляющего воздействия $a(t)$ при заданной скорости;

4. Задаются начальными условиями движения;
5. Выполняют численное интегрирование системы (3) при вычисленном законе изменения управления $a(t)$ от начального положения до конечной точки пути тележки;
6. Определяют значение целевой функции E . Если оно близко к 0, счет прекращают, а результат выводят в файл результатов;
7. В противном случае уменьшают на шаг значение скорости X_2^{po} и повторяют вычисления, начиная с пункта 3.

В соответствии с описанным алгоритмом составлена программа для ЭВМ, с помощью которой рассчитаны параметры движения тележки и груза при тех же геометрических условиях, что и в предыдущем случае.

По результатам счета построены графики (рис. 3) параметров движения исследуемой системы при новом виде управления.

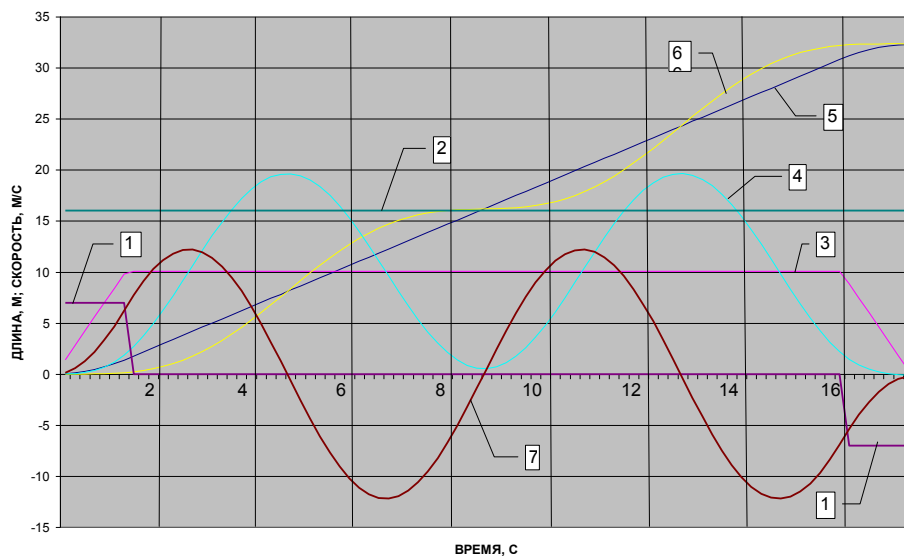


Рис. 3. Графики параметров движения системы тележка-груз при разгоне с максимальным ускорением

Графики свидетельствуют об эффективности использования программы при поиске управлений желаемого вида.

Как видно из графиков, ускорение при таком виде управления максимально и равно $1,4 \text{ м/с}^2$, время разгона уменьшилось до $1,43 \text{ с}$, скорость равномерного движения (при которой обеспечивается гашение) сравнительно невелика – 2 м/с , колебания груза продолжают в течение всего времени движения, максимальное отклонение составляет $2,4 \text{ м}$, длительность перемещения (при данных параметрах цикла) заметно сократилась и составляет $17,4 \text{ с}$.

Описанные методы гашения колебаний могут быть использованы лишь в тех случаях, когда *длина подвеса при переносе груза остается неизменной*. Т.е. груз предварительно нужно поднять на высоту, необходимую для подвода его к бункеру (с соответствующими затратами времени и снижением производительности).

При выполнении грузовых работ для сокращения времени цикла подъем грейфера практически всегда совмещают с его горизонтальным перемещением. В таких случаях при автоматизации кранов для расчета необходимых управлений пользуются более сложными математическими моделями, учитывающими изменения длины подвеса груза.

При выводе уравнений таких моделей многие исследователи в качестве параметра (обобщенной координаты), определяющего характер колебаний груза, выбирают угол φ отклонения подвеса от вертикали [5; 6; 7]. В этом случае колебания груза на подвесе переменной длины описываются уравнением

$$\varphi'' = -\frac{X_2'}{L(t)} - \frac{g}{L(t)} - 2\frac{L'\varphi'}{L(t)}, \quad (9)$$

показывающим, что угловое ускорение φ'' подвеса зависит от линейного ускорения X_2' точки подвеса, веса груза и Кориолисова ускорения $2L'(t)\varphi'$, пропорционального скорости изменения длины подвеса.

В настоящей работе в качестве обобщенной координаты при выводе уравнений движения выбрано линейное отклонение $X = (X_1 - X_3)$ груза от вертикали. Такой выбор позволяет, как показано в работе [7], сохранить математическую модель в виде системы (3). При использовании этой моделью следует помнить, что длина подвеса задается функцией времени $L(t)$.

Для гашения колебаний груза *при его перемещении на подвесе переменной длины* можно искать управление, имеющее ту же структуру, что и в предыдущем случае. Такое управление определяется четырьмя следующими параметрами: ускорение «а» (постоянное) при переходных периодах, скорость X_2^{p0} тележки при ее равномерном движении, момент t_1 окончания разгона и момент t_2 начала торможения.

Неизвестные значения этих *четырёх параметров* могут быть найдены с помощью *четырёх уравнений* математической модели (3) в результате простого перебора значений этих параметров из области допустимых возможностями машины на основании следующего алгоритма.

1. Указывают требуемый путь S тележки и закон изменения длины подвеса $L(t)$;

2. Задаются возможными значениями ускорения и скорости тележки;
3. Определяют моменты t_1 и t_2 переключений управляющего воздействия;
4. Задают начальные условия движения;
5. Выполняют численное интегрирование системы (3) при выбранных значениях ускорения и скорости;
6. Вычисляют значение целевой функции E . Если функция E достаточно близка к 0, счет прекращают, а его результаты (найденные «а», $X_2^{p\partial}$ и другие параметры) выводят в файл результатов, в противном случае переходят к п. 7.
7. Проверяют значение скорости $X_2^{p\partial}$, Если оно далеко от минимального (принятого равным 0,5 м/с), скорость уменьшают на шаг и возвращаются к пункту 3, в противном случае выполняют п. 8.
8. Проверяют значение ускорения, Если оно далеко от минимального, уменьшают его на шаг, значение скорости делают максимальным и возвращаются к пункту 3. В ином случае счет заканчивают с выходом в файл результатов с соответствующим сообщением.

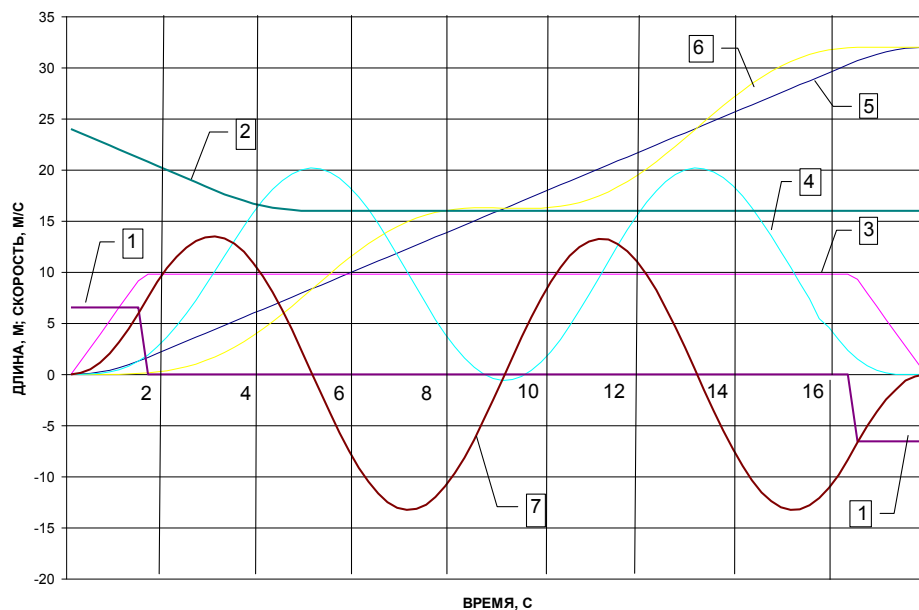


Рис. 4. Графики параметров движения системы тележка-груз при совмещении горизонтального перемещения с подъемом груза

В соответствии с описанным алгоритмом составлена программа расчета *управления тележкой перегружателя, перемещающей груз на подвесе переменной длины*.

При помощи программы рассчитаны параметры движения при следующих геометрических и кинематических характеристиках цикла:

длина пути тележки – 32 м;

длина подвеса сокращается от 24 до 16 м;

максимальная скорость подъема – 2 м/с;

время торможения лебедки – 2 с;

общее время подъема – 5 с;

максимальное ускорение тележки – $1,4 \text{ м/с}^2$;

максимальная скорость – 3 м/с.

Благодаря высокому быстродействию современных ЭВМ не смотря на относительную сложность уравнений математической модели и большое число итераций, поиск желаемого управления продолжается доли секунды. Т.е. требуемое управление может быть определено и подготовлено к реализации (в режиме текущего времени) на самом раннем этапе цикла.

По результатам расчета построены (при помощи вычислительной программы Excel) представленные на рис. 4 графики параметров движения тележки и груза. Графики пронумерованы так же, как и в предыдущем случае.

Как видно из графиков, программа позволяет выполнить успешный поиск управления тележкой, обеспечивающего полное гашение колебаний груза в конечной точке пути (над бункером) и содержащего всего два переключения управления. Для такого гашения ускорение должно составлять $1,30 \text{ м/с}^2$, скорость тележки – 1,96 м/с. При указанном наборе геометрических параметров время горизонтального перемещения будет равным 17,8 с, что несколько больше, чем в предшествующем случае. Однако, если при управлениях первых двух видов включить в расчет длительности переноса груза и время, затрачиваемое на подъем, то общая длительность перемещения груза от места захвата до бункера в последнем случае окажется меньше на 5-6 с (или на 20 %). Т.е. автоматическая реализация управления, обеспечивающего перенос груза с совмещением рабочих движений (и гашением колебаний), может привести к заметному (на 10-15 %) увеличению производительности перегружателя (по сравнению с двумя ранее рассмотренными видами управления).

Выводы

1. Предложены методы расчета трех видов управления тележкой перегружателя при переносе ею груза на гибком подвесе. Управления предусматривают гашение колебаний груза при минимальном числе переключений управляющего воздействия, в качестве которого выбрано ускорение тележки.

Такие управления при сохранении удовлетворительной производительности перегружателя способствуют существенному снижению интенсивности износа его узлов и поддерживают их долговечность на необходимом уровне.

2. При одном из видов управления тележка разгоняется до заданной скорости за время равное периоду колебаний груза, что обеспечивает их гашение. Поскольку период колебаний велик, большими оказываются как время разгона, так и длительность всего цикла, что приводит к снижению производительности.

3. При втором способе управления разгон тележки ведут с максимальным возможным ускорением, однако для обеспечения гашения колебаний скорость тележки приходится делать ниже предельно возможной. В большинстве случаев такое управление позволяет получить большую производительность, чем при управлении первого вида.

4. Оба описанных вида управления могут быть использованы только при переносе груза *на подвесе постоянной длины*. Поэтому перед началом перемещения груз необходимо поднять (с соответствующими затратами времени) на высоту, требуемую для его подвода к бункеру.

5. Третий предлагаемый вид управления обеспечивает перемещение тележки *с одновременным подъемом груза* на заданную высоту. При таком управлении для обеспечения гашения колебаний скорость и ускорение должны быть несколько ниже их номинальных значений. Однако, несмотря на это, общее время переноса груза от места зачерпывания к бункеру оказывается заметно меньше (на 5-8 с) общего времени переноса при первых двух видах управления, что во многих случаях делает такое управление предпочтительным для использования.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Christerson M. Meeting the demands of larger vessels with larger and faster cranes // *Port Technology International*. – 2008. – Vol. 40. – P. 59-62.
2. Bao Qifan. Research and development of automatic bulk cargo equipment in modern ports // *Port Technology International*. – 2009. – Vol 41. – P. 88-93.
3. Смехов А.А. Оптимальное управление подъемно-транспортными машинами / А.А.Смехов, Н.И.Ерофеев – М.: Машиностроение, 1975. – 240 с.
4. Черноусько Ф.Л. Управление колебаниями / Ф.Л. Черноусько, Л.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 380 с.
5. Erofeev N.I. Grundlagen zur Berechnung der Bewegungsparameter von Kranen // *Hebezeugen und Fordermittel. Wissenschaft. Zeitschrift (DDR)*. – 1971. – № 7.

6. *Verschoof I. Cranes – Design, Practice and Maintenance (Chapter 6. Sway and Swing; Automation the trolley travelling mechanism) // Professional Engeeniring Publishing. – 2002. – P.167-173.*
7. *Стрельцов П.М. Гашение колебаний груза при его перемещении на подвесе переменной длины // Вісник ОНМУ. – 2012. – № 35. – С.179-189.*

Стаття надійшла до редакції 20.04.2018