

*Запропоновано метод демпфування коливань підвішеного на канаті вантажу при суміщенні операцій горизонтального переміщення по двох координатах і підйому/спуску вантажу. Спостерігач механізму переміщення і підтягуючих тросів та динамічна корекція довжини підвісу забезпечують інваріантність до співвідношення мас і компенсацію похибок визначення параметрів вантажу без використання датчиків положення*

*Ключові слова: демпфування коливань, спостерігач механізму переміщення з підтягуючими тросами, корекція довжини підвісу*

*Предложен метод демпфирования колебаний подвешенного на канате груза при совмещении операций горизонтального перемещения по двум координатам и подъема/спуска груза. Наблюдатель механизма передвижения с приводами подтягивающих тросов и динамическая коррекция длины подвеса обеспечивают инвариантность к соотношению масс и компенсацию погрешностей определения параметров груза без использования датчиков положения груза*

*Ключевые слова: демпфирование колебаний, наблюдатель механизма передвижения с подтягивающими тросами, коррекция длины подвеса*

УДК 62-83

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.43405

# МЕТОД ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА С ДИНАМИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИЕЙ ДЛИНЫ ПОДВЕСА ДЛЯ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПЕРЕГРУЖАТЕЛЕЙ

**В. В. Бушер**

Доктор технических наук, доцент  
Кафедра электромеханических систем  
с компьютерным управлением  
Одесский национальный политехнический университет  
пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044  
E-mail: victor.v.bousher@gmail.com

**Н. И. Муха**

Кандидат технических наук, доцент\*  
E-mail: mykola\_mukha@hotmail.com

**А. И. Шестака**

Старший преподаватель\*  
E-mail: a.shestaka@gmail.com

\*Кафедра судовой электромеханики и электротехники  
Одесская национальная морская академия  
ул. Дидрихсона, 8, г. Одесса, Украина, 65029

## 1. Введение

С каждым годом увеличиваются объемы контейнерных перевозок. Одну из ключевых позиций в транспортной цепи составляют контейнерные терминалы, связывающие судовые, железнодорожные и автомобильные маршруты. В причальных и тыловых контейнерных перегружателях при регламентированной длительности цикла погрузки/разгрузки 2...2,5 мин операции перемещения занимают основную часть времени и поэтому определяют производительность работ. При длине подвеса 20...50 м механизмы горизонтального перемещения характеризуются относительно продолжительными переходными процессами из-за колебаний подвешенного на канате груза – на успокоение колебаний может затрачиваться 20...30 с. В связи с этим задача демпфирования колебаний груза является весьма важной.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Оптимальное по быстродействию решение задачи обеспечивает использование принципа максимума

Понтрягина с учетом ограничений на управляющие воздействия, подводимые к объекту управления. Но получаемые решения с 3-, 5-кратным переключением между максимальным и минимальным значениями действующей на точку подвеса силы [1, 2] требуют точного измерения соотношения масс груза и механизма, постоянства расстояния от точки подвеса до центра тяжести груза в течение переходного процесса. При этом для расчета длительностей временных интервалов формируемого закона управления требуется учет масс каната, грузозахватного устройства. 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 достигать 15...30 % от максимального отклонения каната от вертикали во время пуска/торможения [3]. А требование постоянства длины подвеса в промышленных условиях налагает дополнительные требования не только к оборудованию, но и ограничивает свободу действий оператора. Для получения менее чувствительных систем используют принципы нечеткой логики, искусственные нейронные сети [4, 5]. Но для работы последних необходимы сигналы обратных связей по отклоне-

нию каната от вертикали и скорости его изменения [6], измерение которых на практике затруднительно.

Также при работе контейнерного терминала необходимо совмещать операции горизонтального перемещения и подъема груза для перемещения груза в трехмерном пространстве терминала с учетом размещения контейнеров и препятствий [7, 8]. Успешное решение этой задачи требует применения таких законов управления, которые допускают одновременную работу нескольких механизмов (горизонтального перемещения и подъема груза), а также наименее чувствительны к ошибкам измерения параметров груза и воздействию случайных возмущений [9, 10].

Одним из таких способов является управление скоростью точки подвеса груза по определенному закону, что исключает влияние на поведение груза соотношения масс подвижной части крана и груза [3]. Этот способ основан на изменении угла  $\alpha$  в течение трех временных интервалов по закону, описываемому непрерывной периодической функцией, характеризующейся нулевыми начальными и конечными условиями, включая и первую производную:

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_m \left( 1 - \cos \left( \frac{t}{T_G} \right) \right) \forall t \leq t_1, \\ 2\alpha_m \forall t_1 < t \leq t_1 + t_2, \\ \alpha_m \left( 1 - \cos \left( \frac{t - t_2}{T_G} \right) \right) \forall t_1 + t_2 < t \leq 2t_1 + t_2, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\alpha_m$  – половина угла максимального отклонения каната от вертикали,  $T_G \geq \sqrt{\frac{lm_1}{2g(m_1 + m_2)}}$  – постоянная времени, обратная заданной угловой частоте колебаний груза,  $t_1 = \pi T_G$  – длительность первого и третьего интервалов,  $t_2 = \frac{V_E - V_0}{2a} - \pi T_G$  – длительность второго

интервала, полученная исходя из максимально допустимых усилий, развиваемых приводом перемещения

$$F_{\max}, a = \alpha_m g = \frac{F_{\max}}{2(m_1 + m_2)}$$

ускорения на первом и третьем интервалах,  $m_1, m_2$  – массы механизма и груза,  $V_E, V_0$  – заданные конечная и начальная скорости механизма,  $l$  – длина подвеса.

Тогда ускорение груза при малых углах отклонения ( $\sin \alpha \approx \alpha, \cos \alpha \approx 1$ ) составит  $a_2 = g \sin \alpha \approx g\alpha$ , скорость груза от начального значения  $V_0$  к конечному  $V_E$  будет изменяться по закону:

$$V_2 = \begin{cases} V_0 + at - aT_G \sin \left( \frac{t}{T_G} \right) \forall t \leq t_1, \\ V_0 - at_1 + 2at \forall t_1 < t \leq t_1 + t_2, \\ V_0 + a(t + t_2) - aT_G \sin \left( \frac{t - t_2}{T_G} \right) \forall t_1 + t_2 < t \leq 2t_1 + t_2. \end{cases} \quad (2)$$

Учитывая, что  $\alpha = \frac{s_1 - s_2}{l}$ , для получения требуе-

мого закона изменения  $\alpha(t)$  скорость точки подвеса в общем случае должна удовлетворять условию:

$$V_1 = \frac{ds_1}{dt} = \frac{ds_2}{dt} + \frac{d(\alpha l)}{dt} = V_2 + \alpha \frac{d(l)}{dt} + \frac{d(\alpha)}{dt} l, \quad (3)$$

где  $\frac{d(l)}{dt} = v_L$  – скорость подъема/спуска груза.

$$\frac{d(\alpha)}{dt} = \begin{cases} \frac{1}{T_G} \sin \left( \frac{t}{T_G} \right) \forall t \leq t_1, \\ 0 \forall t_1 < t \leq t_1 + t_2, \\ \frac{1}{T_G} \sin \left( \frac{t - t_2}{T_G} \right) \forall t_1 + t_2 < t \leq 2t_1 + t_2. \end{cases} \quad (4)$$

Этот закон управления скоростью точки подвеса обладает возможностью совмещения операций горизонтального перемещения по координатам  $x, y$  и подъема груза, не требует точного измерения массы груза, величина  $T_G$  может быть выбрана, исходя из некоторых предельных (паспортных) значений масс и моментов (сил) приводов перемещения.

Отклонения величин масс от расчетных приводят только к изменению усилий в ходе переходного процесса. Теоретически колебания груза по окончании разгона механизма отсутствуют, а реальные скорости точки подвеса и груза совпадают с расчетными.

Однако, на механизмы горизонтального перемещения и груз действуют различные возмущающие воздействия. Наиболее существенные отклонения движения груза от заданной траектории возникают при ошибке измерения длины подвеса. Даже при использовании прецизионных датчиков такая ошибка неизбежна как из-за различного растяжения каната при различной массе груза, так и из-за изменения положения центра тяжести груза в зависимости от его характеристик. В частности, положение центра тяжести контейнера может изменяться более чем на половину его высоты. Сочетание этих факторов приводит к возникновению остаточных колебаний груза.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка закона управления механизмами горизонтального перемещения подвешенного груза с системой подтягивающих тросов, обеспечивающего эффективное подавление колебаний за счет согласованной работы всех приводов и динамической коррекции расчетной длины подвеса.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- создать математическую модель крана с учетом работы приводов подтягивающих тросов;
- получить закон взаимодействия всех крановых механизмов и метод коррекции расчетной длины подвеса, обеспечивающий эффективное подавления раскачивания груза к окончанию процессов разгона/торможения крана.

### 4. Математическая модель механизма передвижения с подтягивающими тросами

Для получения менее чувствительных к характеристикам груза систем во многих кранах используют

дополнительные подтягивающие тросы, размещенные по углам прямоугольной тележки [3, 6]. Тросы, закрепленные на грузозахватном устройстве, подтягивают его в сторону, противоположную отклонению от положения равновесия. Механические характеристики приводов подтягивающих тросов обычно характеризуются некоторой жесткостью  $\beta$  и ограничением усилия  $F_{L,max}$ . 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.

Необходимо обеспечить взаимодействие приводов горизонтального перемещения и подтягивающих тросов так, чтобы подтягивающие тросы влияли на груз только при отклонении траектории движения груза от расчетной.

Рассмотрим работу приводов при одновременном движении тележки в двух направлениях. Учтем, что подтягивающие тросы закреплены по углам тележки в точках 1...4, а канат с грузом  $G$  – в ее центре  $O$  (рис. 1).

Тогда, рассматривая пирамиды с общей высотой  $OO_xO_yG$  и  $11_g1_yG$  для точки 1 и аналогичные для точек 2...4, получим:

$$h = \frac{l}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha_x + \tan^2 \alpha_y}}, \tag{5}$$

$$\Delta x = h \tan \alpha_x = \frac{l \tan \alpha_x}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha_x + \tan^2 \alpha_y}},$$

$$\Delta y = h \tan \alpha_y = \frac{l \tan \alpha_y}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha_x + \tan^2 \alpha_y}}, \tag{6}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \beta_{ix} &= \arctan \frac{\text{base}_x \sqrt{1 + \tan^2 \alpha_x + \tan^2 \alpha_y} \begin{pmatrix} + \forall i=1,2 \\ - \forall i=3,4 \end{pmatrix} l \tan \alpha_x}{l}, \\ \beta_{iy} &= \arctan \frac{\text{base}_y \sqrt{1 + \tan^2 \alpha_x + \tan^2 \alpha_y} \begin{pmatrix} - \forall i=1,3 \\ + \forall i=2,4 \end{pmatrix} l \tan \alpha_y}{l}. \end{aligned} \right. \tag{7}$$

Скорости подтягивающих тросов

$$\left\{ \begin{aligned} v_{L1} &= \Delta v_x \cos \beta_{1x} + \Delta v_y \cos \beta_{1y}, \\ v_{L2} &= \Delta v_x \cos \beta_{2x} - \Delta v_y \cos \beta_{2y}, \\ v_{L3} &= -\Delta v_x \cos \beta_{3x} + \Delta v_y \cos \beta_{3y}, \\ v_{L4} &= -\Delta v_x \cos \beta_{4x} - \Delta v_y \cos \beta_{4y}. \end{aligned} \right. \tag{8}$$

В сочетании с моделью поведения подвешенного груза

$$\frac{ds_{1x}}{dt} = v_{1x}(t), a_{2x} = g \alpha_x, \frac{dv_{2x}}{dt} = a_{2x}, \frac{ds_{2x}}{dt} = v_{2x},$$

$$\alpha_x = \frac{s_{1x} - s_{2x}}{l}, \Delta v_x = v_{1x} - v_{2x}, \Delta x = s_{1x} - s_{2x},$$

$$\frac{ds_{1y}}{dt} = v_{1y}(t), a_{2y} = g \alpha_y, \frac{dv_{2y}}{dt} = a_{2y}, \frac{ds_{2y}}{dt} = v_{2y},$$

$$\alpha_y = \frac{s_{1y} - s_{2y}}{l}, \Delta v_y = v_{1y} - v_{2y}, \Delta y = s_{1y} - s_{2y}, \tag{9}$$

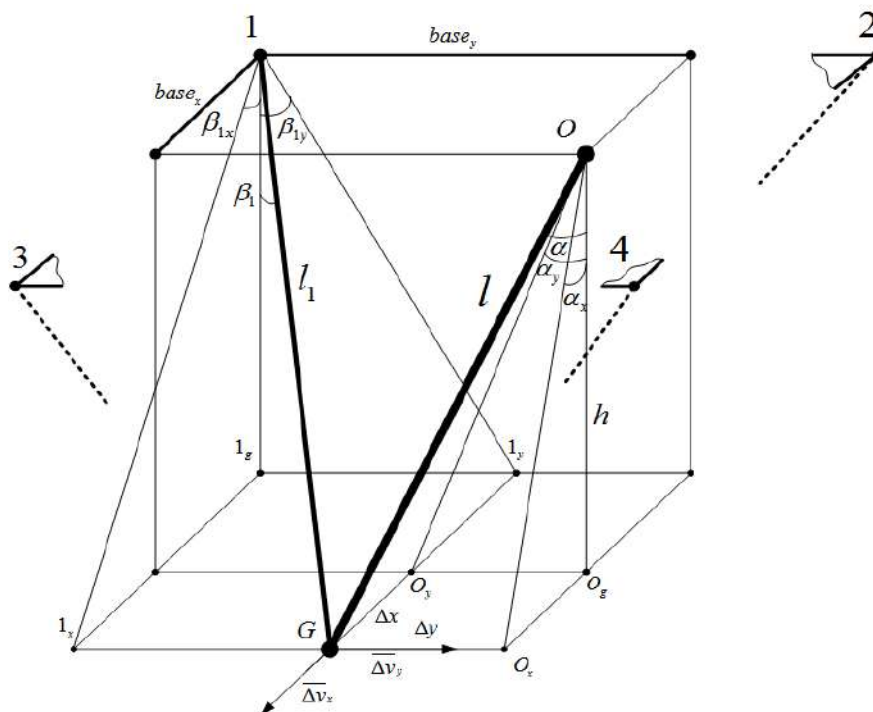


Рис. 1. Расчетная схема механизма горизонтального передвижения

и используя полученные выражения (8) в качестве задания скоростей идеального холостого хода приводов подтягивающих тросов  $v_{L0i}$ , можно сформировать встроенный в систему управления наблюдатель для механизма с горизонтальным движением по двум координатам, реализация которого позволяет исключить воздействие подтягивающих тросов в переходном процессе и подавить остаточные колебания в установившихся режимах [3].

Тогда движение груза при точном соответствии расчетных и реальных параметров по каждой координате будет соответствовать формулам (2).

Однако при ошибке измерения длины подвеса груза подтягивающие тросы при работе наблюдателя позволяют уменьшить амплитуду остаточных колебаний до допустимого уровня за счет дополнительных усилий, изменяющих ускорение груза:

$$a_{2x} = g \sin(\alpha_x) - \frac{F_1 \sin(\beta_{1x}) + F_2 \sin(\beta_{2x}) - F_3 \sin(\beta_{3x}) - F_4 \sin(\beta_{4x})}{m_2},$$

$$a_{2y} = g \sin(\alpha_y) - \frac{F_1 \sin(\beta_{1y}) - F_2 \sin(\beta_{2y}) + F_3 \sin(\beta_{3y}) - F_4 \sin(\beta_{4y})}{m_2}. \quad (10)$$

где  $F_i = F_0 + \text{beta}(v_{L0i} - v_{Li}), 0 \leq F_i \leq F_{Lmax}$ , но длительность процесса гашения колебаний может оказаться весьма существенной [1, 3, 10].

### 5. Метод динамической коррекции длины подвеса

Рассмотрим изменения в поведении приводов при ошибке определения длины каната. Пусть расчетное значение  $l_r$  отличается от фактического  $l$ . Тогда закон изменения скорости точки подвеса (4) также отличается от требуемого. Разница на первом этапе составит:

$$\Delta V_1 = (l_r - l) \frac{a}{gT_G} \sin\left(\frac{t}{T_G}\right). \quad (11)$$

Тогда, например, при  $l_r > l, a_x > 0, a_y = 0$  и  $t < \pi T_G$  из (7)...(9) получим расчетные значения  $v_{L01}, v_{L02}$  больше требуемых, а  $v_{L03}, v_{L04}$  меньше требуемых. Усилия, развиваемые приводами подтягивающих тросов, изменятся аналогично. Используя современные электроприводы «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель», которые позволяют получать информацию о развиваемом двигателем моменте на основании встроенных моделей, можно рассчитать разность  $(F_3 + F_4) - (F_1 + F_2)$ . В рассматриваемом случае она будет отрицательной, что свидетельствует о необходимости уменьшения расчетной длины.

Проведя аналогичный анализ при одновременном движении по двум координатам  $x$  и  $y$ , можно сформировать условия ступенчатой коррекции длины подвеса в общем случае с шагом  $\Delta l$ :

$$l_r = l_r + \text{sign} \times \left( a_x (F_3 + F_4 - F_1 - F_2) + a_y (F_2 + F_4 - F_1 - F_3) \right) \Delta l. \quad (12)$$

Величину  $\Delta l$  можно выбрать таким образом, чтобы при известном периоде квантования цифровой системы управления  $T_0$  в течение  $0,1...0,2\pi T_G$  могла быть скорректирована предельно возможная погрешность определения длины (например, для контейнерного перегружателя – высота контейнера).

Другой вариант коррекции основывается на том, что в начале переходного процесса скорость груза близка к начальному значению, изменяется медленно и поэтому не влияет на процесс коррекции. Тогда ступенчатое изменение длины можно заменить плавным в соответствии с выражением:

$$l_r = l_r + \Delta l \times \left( a_x \sin\left(\frac{t}{T_{Gx}}\right) \left( \frac{F_3 + F_4 - F_1 - F_2}{\text{beta}} \right) + a_y \sin\left(\frac{t}{T_{Gy}}\right) \left( \frac{F_2 + F_4 - F_1 - F_3}{\text{beta}} \right) \right). \quad (13)$$

Такой вариант коррекции расчетной длины эквивалентен интегрирующему звену, охваченному отрицательной обратной связью (чем меньше отклонение расчетной длины от фактической, тем меньше разность усилий). Поэтому теоретически погрешность будет равна нулю, увеличение  $\Delta l$  будет приводить к повышению быстродействия корректирующего блока. Но в дискретных системах управления даже инерционное звено может стать неустойчивым. Поэтому  $\Delta l$  целесообразно выбрать так, чтобы обеспечить коррекцию в течение  $0,1...0,2\pi T_G$ . Сопоставление вариантов (12) и (13) показало, что второй предпочтительнее, обеспечивает более плавную и точную коррекцию. Поэтому далее при моделировании использован метод (13).

Модуль коррекции длины позволяет также определить скорость подъема или спуска груза, как производную от расчетной длины, вычисляемую по истечении

$$\text{времени } 0,1...0,2\pi T_G: v_L = \frac{l_n - l_{n-1}}{T_0}.$$

### 6. Результаты моделирования динамических процессов при перемещении груза

На основании предложенных моделей и метода коррекции длины подвеса проведены исследования динамических режимов в контейнерном перегружателе при одновременной согласованной работе всех механизмов.

На рис. 2 показаны графики переходных процессов при спуске груза со скоростью 1 м/с формированием задания скоростей горизонтального перемещения крана и тележки по закону (4) и начальной ошибкой измерения длины подвеса 3 м.

По полученным графикам видно, что процесс коррекции длины занял 0,1 с, что обеспечивает дальнейшее движение груза по координатам  $x, y$  в соответствии с расчетными траекториями. Остаточные колебания груза практически отсутствуют, их амплитуда составляет менее 0,1 % от максимального отклонения каната от вертикали. Усилия в подтягивающих тросах не превышают  $4...5 F_0$ , что в десятки раз меньше, чем при отсутствии коррекции длины подвеса.

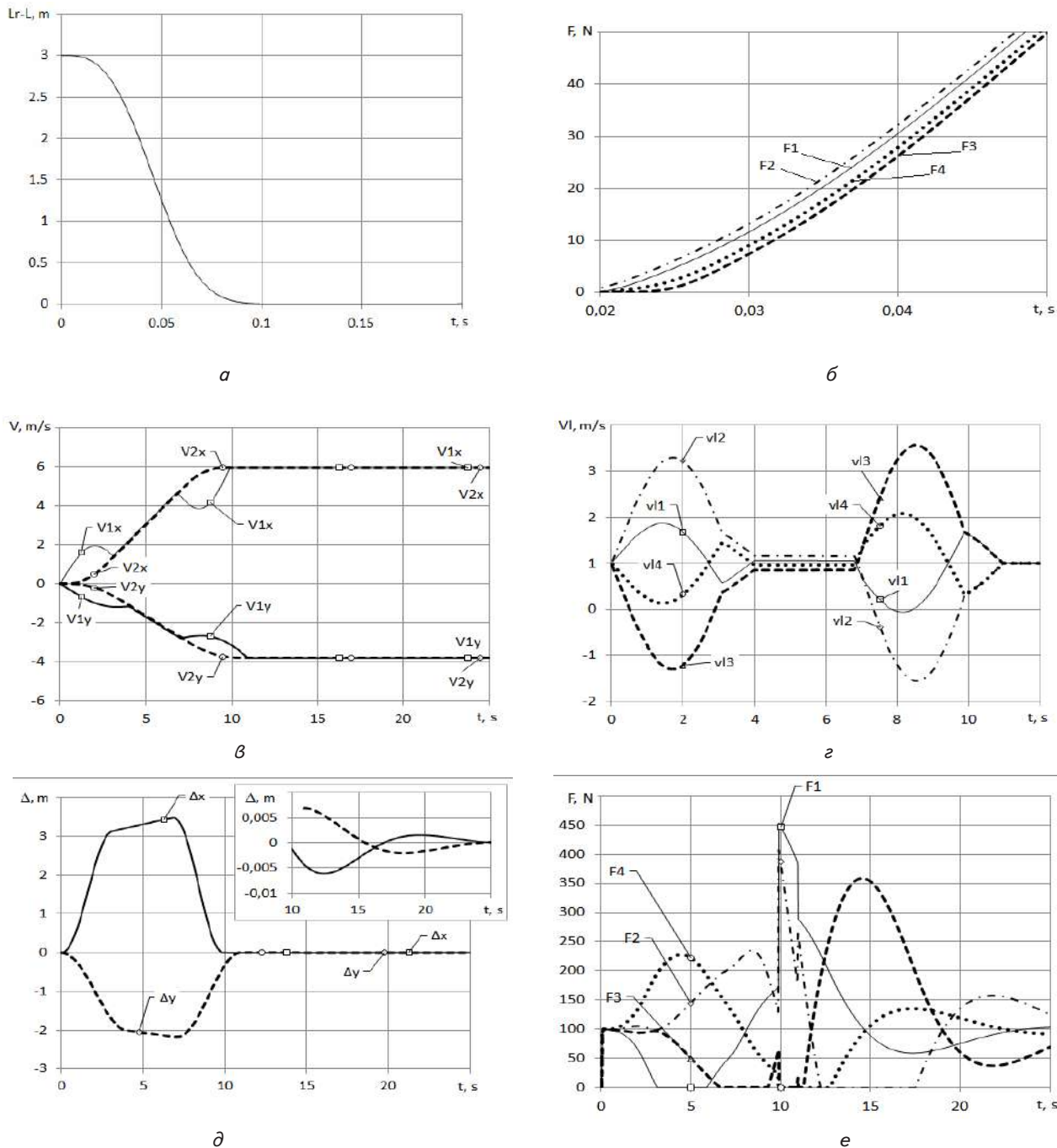


Рис. 2. Графики переходных процессов в механизмах горизонтального перемещения при согласованном управлении: а – процесс коррекции длины подвеса; б – усилия в подтягивающих тросах в начале процесса коррекции; в – скорости механизмов горизонтального перемещения; г – скорости подтягивающих тросов; д – отклонение груза от вертикали; е – изменение усилий в подтягивающих тросах

### 7. Выводы

1. Разработана математическая модель динамических процессов в контейнерном перегружателе при горизонтальном перемещении груза по двум координатам, одновременном спуске/подъеме и воздействии на груз подтягивающих тросов.

2. Получен закон согласованного управления всеми перечисленными механизмами крана, обеспечивающий демпфирование колебаний подвешенного на канате груза и инвариантный к соотношению масс

и скорости подъема. Закон основан на управлении скоростью точки подвеса так, чтобы угол отклонения каната от положения равновесия изменялся по непрерывной гармонической функции.

3. Синтезирован наблюдатель, формирующий скорости идеального холостого хода приводов подтягивающих тросов так, чтобы не препятствовать движению груза по заданной траектории в переходных и установившихся режимах.

4. На основании анализа асимметрии усилий в подтягивающих тросах и заданных ускорений меха-

низмов горизонтального перемещения синтезирован закон коррекции расчетной длины подвеса, не требующий использования датчиков положения груза. В результате обеспечивается инвариантность к погрешностям измерения длины подвеса.

5. Коррекция расчетной длины подвеса позволяет уточнить траекторию движения груза, обеспечить

демпфирование колебаний груза в течение процессов пуска/торможения и уменьшить в десятки раз нагрузки в подтягивающих тросах.

6. Сочетание предложенных методов позволяет обеспечить позиционирование груза в заданных точках, что в свою очередь дает возможность включать кран в состав автоматизированных контейнерных терминалов.

---

#### Литература

1. 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. – 2000. – Вып. 1/2000 (8). – С. 236–240. – Режим доступа: <http://aep.at.ua/load/1-1-0-353>
2. 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. – 2000. – Вып. 2 (8). – С. 74–76.
3. Бушер, В. В. Оптимизация управления электроприводами контейнерного перегружателя при совместной работе механизмов [Текст] / Бушер В. В., Мельникова Л. В., Шестака А. И. // Электротехнические и компьютерные системы. – 2015. – № 17 (93). – С. 23–28. – Режим доступа: <http://etks.opu.ua/?fetch=articles&with=info&id=627>
4. Unbehauen, H. Klassische Verfahren zur Analyse und Synthese Linearer Kontinuierlicher Regelsysteme [Text] / H. Unbehauen, I. Regelungstechnik. – Fuzzy-Regelsysteme, 2007. – 20 p.
5. Akira, A. Anti-Sway control for overhead cranes using neural networks [Text] / A. Akira // International Journal of Innovative Computing, Information and Control. – 2011. – Vol. 7, Issue 7(B) – P. 4251–4262.
6. Kim, Y. Anti-Sway Control of Container Cranes: Inclinator, Observer, and State Feedback [Text] / Y. Kim, K. Hong, S. Sul // International Journal of Control, Automation, and Systems. – 2004 – Vol. 2, Issue 4. – P. 435–449.
7. Miyata, N. Development of Feedforward Anti-Sway Control for Highly efficient and Safety Crane Operation [Text] / N. Miyata, M. Nishioka // Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review. – 2001. – Vol. 38, Issue 2. – P. 73–77.
8. Suh, J. Anti-Sway Position Control of an Automated Transfer Crane Based on Neural Network Predictive PID Controller [Text] / J. Suh, J. Lee, Y. Lee, K. Lee // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2005. – Vol. 19, Issue 2. – P. 505–519. doi: 10.1007/bf02916173
9. Ngoa, Q. Anti-Sway Control of Container Cranes in the Presence of Friction [Text] / Q. Ngoa, T. Tranb, K. Hongc // International Journal of Innovative Management, Information & Production. – 2012 – Vol. 3, Issue 4. – P. 7–14.
10. Raubar, E. Anti-Sway System for Ship-to-Shore Cranes [Text] / E. Raubar, D. Vrancic // Journal of Mechanical Engineering. – 2012. – Vol. 58, Issue 5. – P. 338–344. doi: 10.5545/sv-jme.2010.127