

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМАМИ ПРИ КАНТОВАНИИ КОНТЕЙНЕРОВ НА ОСНОВЕ ПОКАЗАНИЙ ДАТЧИКА ВЕРТИКАЛИ

Формирование модели расчета

Для кантования длинноразмерных тяжелых контейнеров на АЭС используется система из двух электроприводных механизмов – перемещающаяся горизонтальная грузовая тележка и неподвижный полярный кран, разматывающий и сматывающий канат в вертикальном направлении (рис. 1). При переводе контейнера из вертикального положения в горизонтальное тележка располагается под полярным краном. Контейнер вывешивается вертикально с помощью каната, намотанного на барабан *A* крана, и траверсы вертикальной, крепящейся к верху контейнера шарниром *B*. Дно контейнера крепится к тележке цапфой *C*, допускающей поворот контейнера относительно тележки в вертикальной плоскости, проходящей через канат и продольную горизонтальную ось тележки. После указанной стадии установки в исходное положение начинается процесс кантования. Тележка отъезжает от исходной точки, а полярный кран выпускает (удлиняет) канат. Совместная работа механизмов продолжается до перевода контейнера в горизонтальное положение. Перевод контейнера из горизонтального положения в вертикальное производится в обратном порядке. В исходном состоянии контейнер расположен горизонтально на тележке и прикреплен к ее дну с помощью цапфы *C*. Полярный кран останавливается против верха контейнера. Крюк крана через траверсу соединяется с верхом *B* контейнера. Из этого исходного положения тележка перемещается по направлению к полярному крану, а последний укорачивает канат (наматывает на барабан *A*). Совместная работа продолжается до перевода контейнера в вертикальное положение.

Скорости перемещения тележки и удлинения (укорочения) каната при кантовании должны быть согласованы таким образом, чтобы канат и траверса были натянуты преимущественно вертикально. Значительные отклонения от вертикальности усложняют работу механизмов – нагружают электропривод тележки, тянут (сдергивают) канат. Основные структурные элементы кинематиче-

ской цепи кантования контейнера можно установить с помощью рис. 1, а возможные расчетные схемы движения представлены на рис. 2, где положениям контейнера соответствует отрезок BC и совокупности элементов канат-траверса (под нагрузкой) соответствует отрезок AB .

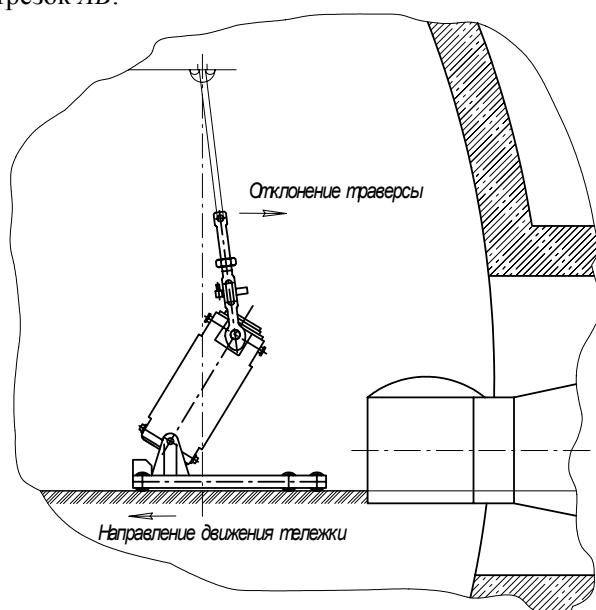


Рис. 1. Схема работы:
 1 – крюк полярного крана; 2 – канат; 3 – траверса вертикальная; 4 – контейнер; 5 – грузовая тележка

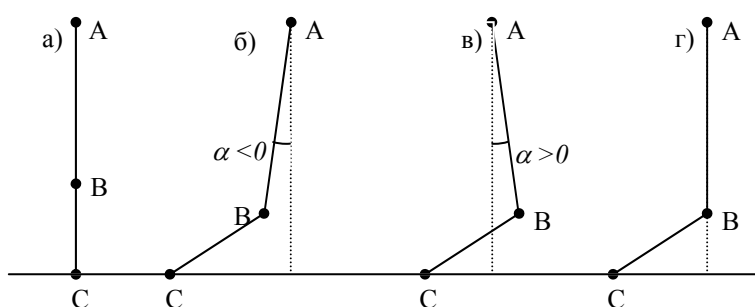


Рис. 2. Возможные варианты движения

При кантовании контейнера канат удлиняется при сохранении положения точки подвеса A , а C – нижняя точка контейнера перемещается вместе с тележкой влево. В результате этого канат и траверса располагаются на одном отрезке AB , а контейнер – на отрезке BC . Верхняя точка контейнера B опускается вертикально при идеальных условиях (при согласованных скоростях удлинения каната и перемещения тележки, рис. 2,г). При неидеальных условиях точка B опускается вниз и смещается вправо (при заниженной скорости тележки, рис. 2,в) или влево (при завышенной скорости тележки, рис. 2,б). Исходное положение системы представлено на рис. 2,а.

Обозначим через $h(t)$ удлинение каната (изменение его длины по сравнению с исходным - вертикальным положением контейнера) и через $S(t)$ зависимость перемещения тележки от времени t . Основная задача формулируется следующим образом. При заданной постоянной скорости удлинения каната $\dot{h}(t) = const$ необходимо выбрать зависимость $S(t)$ перемещения тележки таким образом, чтобы угол отклонения отрезка AB – канат-траверса от вертикали не превышал допустимого значения $\alpha_{доп}$. При идеальном перемещении контейнера (l – длина контейнера) S и h связаны простым соотношением

$$S = \sqrt{l^2 - (l - h)^2} = \sqrt{2lh - h^2}. \quad (1)$$

Скорость перемещения тележки \dot{S} и скорость удлинения каната \dot{h} связаны соотношениями:

$$\dot{S} = \frac{l - h}{\sqrt{2lh - h^2}} \dot{h}, \quad \dot{S} = \dot{h} \cdot \sqrt{(l/S)^2 - 1}. \quad (2)$$

В дальнейшем скорость перемещения тележки будет измеряться в относительных единицах, как отношение к постоянной скорости удлинения каната (\dot{S}/\dot{h} при $\dot{h} = const$), обозначаться через v_s и вычисляться по формулам:

$$v_s = \frac{l - h}{\sqrt{2lh - h^2}}, \quad v_s = \sqrt{(l/S)^2 - 1}. \quad (3)$$

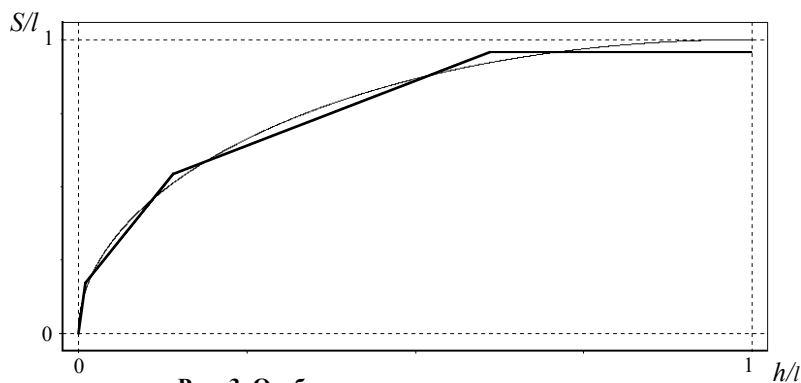
Из формул видно, что при идеальном перемещении тележки в начальный момент времени ($t=0, h=0, S=0$) скорость тележки должна быть бесконечной, а в конце перемещения ($h=l, S=l$) скорость тележки должна быть нулевой.

Создать привод тележки, удовлетворяющий таким требованиям, нельзя. В этих условиях естественно оптимальным способом использовать допуск на угловое отклонение траверсы от вертикали равный $\alpha_{доп}$. Ставится задача выбора такого правила перемещения тележки, при котором отношение максимальной скорости тележки v_{max} в начале движения, которую назовём начальной $v_{нач}$, к ее ми-

нимальной скорости v_{min} в конце движения (перед остановкой), которую назовём конечной $v_{кон}$, было бы низким – приемлемым, реализуемым существующими приводами. Более того, для упрощения системы управления желательно найти ряд дискретных скоростей перемещения тележки, поочерёдным включением которых можно реализовать процесс кантования контейнера, обеспечивая угол отклонения от вертикали в пределах $\pm\alpha_{доп}$.

Для решения задачи используется следующее свойство, вытекающее из кинематики движения контейнера при кантовании. Снижение скорости тележки по сравнению с требуемой для идеального перемещения (или отставание перемещения тележки от идеального движения согласно (1) – (3)) приводит к отклонению траверсы вправо от вертикали. Превышение идеальной скорости (или опережение идеального перемещения тележки согласно (1) – (3)) приводит к отклонению траверсы от вертикали влево. Возможность поочерёдного манипулирования отклонениями траверсы вправо или влево от вертикали в пределах допуска на угол отклонения позволяет подобрать дискретные скорости перемещения тележки таким образом, что максимальная скорость тележки в начале кантования контейнера $v_{нач}$ была бы пониженной, а минимальная скорость тележки в конце её перемещения $v_{кон}$ была бы повышенной. При этом на конечном этапе кантования контейнер переводится из некоторого промежуточного положения в горизонтальное положение только за счёт удлинения каната при заторможенной тележке.

Характерные особенности перемещения тележки удобно наблюдать на графике с осями координат: t – время и S – перемещение тележки, приведённом на рис. 3. При постоянной скорости удлинения каната t и S можно измерять в пропорциональных им относительных величинах h/l и S/l соответственно.



Здесь плавная кривая соответствует идеальному перемещению с нулевым отклонением от вертикали. Ломаная кривая соответствует перемещению тележки, при котором при переключении в определённые моменты времени h_i $i=\overline{1, n}$ ($h_1=0$) происходит изменение ее скорости по некоторой последовательности убывающих дискретных скоростей $v_1 > v_2 > \dots > v_n=0$ (рис. 3).

Для вывода формул удобно ввести систему координат на плоскости XOY (рис. 4), в которой начало координат $(0,0)$ совмещено с первоначальным положением основания контейнера C на горизонтальной плоскости. Ось X совпадает с направлением перемещения (влево), ось Y совпадает с вертикалью, направленной вверх.

Будем рассматривать случай, когда в исходном – вертикальном положении контейнера – точки A и B имеют координаты $A(0; 2,9l)$ и $B(0; 1,9l)$, где l – длина контейнера. Это не уменьшает общности решения. Начальное положение точки относительно A может быть другим, процедура не изменится. В общем случае (при неидеальном движении) рассматриваемая механическая система является системой с двумя степенями свободы, положение которой определяется двумя обобщенными координатами.

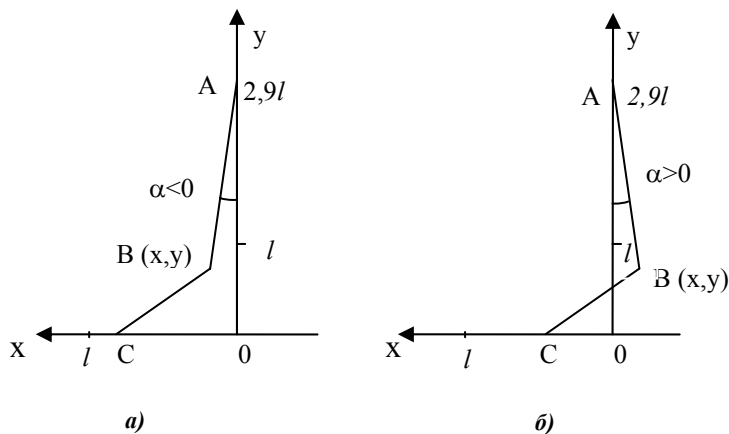


Рис. 4. Манипулирование отклонениями траверсы от вертикали: а – опережение теоретического расположения; б – запаздывание по сравнению с теоретическим расположением

Первоначально в качестве обобщённых координат выберем две координаты: S – перемещение тележки (положение точек C на оси X); h – удлинение каната (увеличение отрезка AB по сравнению с первоначальной величиной, равной $1,9l$). Действительно, значение S позволяет нанести на рисунок точку C . Далее проводятся две ок-

ружности: первая из точки C радиусом l (равным высоте контейнера), вторая из точки A (с фиксированным положением $x=0, y=2,9l$) радиусом $(1,9l+h)$, равным сумме длины каната и траверсы. Пересечение окружностей определяет положение точки B и положение системы. При этом можно определить координаты x, y точки B , а также отклонение от вертикали – угол α . Указанным условиям соответствует следующая система двух уравнений – координат B :

$$y^2 + (S - x)^2 = l^2, \quad (2,9l - y)^2 + x^2 = (1,9l + h)^2.$$

Тангенс и синус угла отклонения от вертикали определяются по формулам:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{x}{2,9l - y}, \quad \sin \alpha = \frac{x}{1,9l + h}.$$

В зависимости от конкретной решаемой задачи положение рассматриваемой системы, как системы с двумя степенями свободы, удобно определять с помощью различных пар обобщённых координат. Это пара (S, h) , выбранная выше, а также пары координат (x, y) , (h, α) , (S, α) , (x, α) и другие. При этом по значениям одной пары координат всегда можно определить соответствующее значение координат любой другой пары.

Если взять в качестве обобщённых координат h – удлинение каната и α – угол отклонения от вертикали (со знаком плюс при отклонении от вертикали вправо и со знаком минус при отклонении от вертикали влево), то координата S определится по формуле:

$$S(h, l) = \sqrt{l^2 - [2,9l - (1,9l + h)\cos \alpha]^2} - (1,9l + h)\sin \alpha. \quad (4)$$

А координаты (x, y) точки B определяются по формулам:

$$x = -(1,9l + h)\sin \alpha, \quad y = 2,9l - (1,9l + h)\cos \alpha. \quad (5)$$

Вследствие того, что рассматриваемая система имеет две степени свободы, при решении конкретных задач по определению координат точек, удовлетворяющих определённым условиям, необходимо иметь систему из двух уравнений, в которую входят эти координаты.

Расчётные зависимости для определения количества, величины и последовательности использования дискретных скоростей тележки определяются с применением принципов решения задачи и математических зависимостей, изложенных выше. Для упрощения изложения выводы расчётных формул обосновываются графически, чтобы не заслонять математическими формулами существо вопроса. При этом приводятся необходимые иллюстрации в виде рисунков и соответствующие пояснения.

Рассматриваются возможные траектории кантования на введён-

ной выше плоскости (S, h) . Каждая точка плоскости полностью определяет положение контейнера и в том числе угол α – отклонение траверсы от вертикали. Различные непрерывные кривые соответствуют определённым траекториям кантования. Зависимость (1) соответствует идеальной траектории с нулевым отклонением от вертикали. Ломаные кривые из отрезков прямых соответствуют траекториям, имеющим постоянные скорости на отдельных отрезках. Число отрезков определяет число дискретных скоростей, обеспечивающих реализацию траектории. Наклоны отрезков (dS/dh) определяют скорости.

Подстановка предельных значений α - угла отклонения траверсы от вертикали $\alpha = -\alpha_{\text{дон}}$ и $\alpha = \alpha_{\text{дон}}$ в уравнение (4) позволяет получить уравнение для верхней и нижней границ траекторий кантования :

$$S = S(h, -\alpha_{\text{дон}}), \quad S = S(h, +\alpha_{\text{дон}}), \quad (6)$$

где $0 < h < (2,9l / \cos\alpha_{\text{дон}}) - 1,9l$. Границы для $|\alpha_{\text{дон}}| = 3^\circ$ представлены на рис. 5, на котором масштабы по осям различны.

S/l

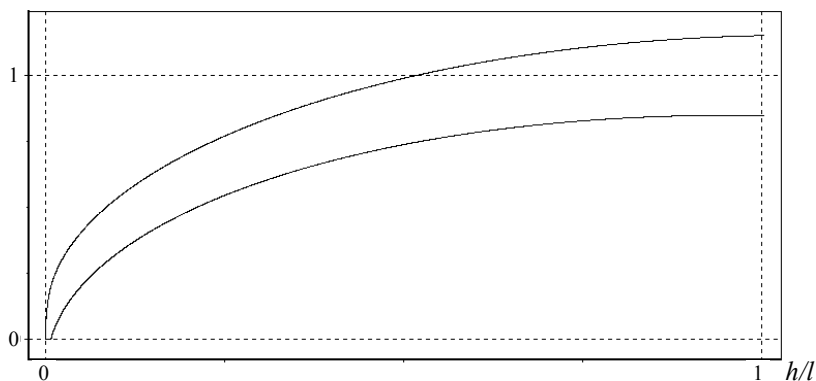


Рис. 5. Границы траекторий

Границы являются выпуклыми вверх функциями, причем максимум нижней границы достигается при ординате $S < l$, а верхней границы - при $S > l$.

Выход за эти границы означает, что угол отклонения от вертикали превысил допустимое значение. Уравнения (5) и (6) действительно являются границами допустимых траекторий кантования, так как функция (6) при каждом фиксированном h является соответственно монотонно возрастающей и убывающей функцией $\alpha_{\text{дон}}$, по крайней мере, в области рассматриваемых значений α . При возрастании $\alpha_{\text{дон}}$ от нуля $S(h, \alpha_{\text{дон}})$ и $S(h, -\alpha_{\text{дон}})$ монотонно смещаются

от идеальной траектории вниз и вверх соответственно. Таким образом для координат точек внутри области, очерченной границами, угол отклонения от вертикали действительно не превышает допустимого значения:

$$-\alpha_{\text{доп}} \leq \alpha(h, S) \leq \alpha_{\text{доп}}.$$

Здесь $\alpha(h, S)$ зависимость α от h и S , выраженная неявно через уравнение (4).

Обращает на себя внимание “несимметрия” границ относительно идеальной траектории. Это вызвано односторонней направленностью перемещения тележки (влево при опускании контейнера) и смещением центра тяжести контейнера относительно шарнира C вправо. Последнее приводит к тому, что при удлинении каната без перемещения тележки траверса отклоняется вправо от вертикали и часть нижней границы составляет отрезок прямой $S=0$.

Определение начальной, промежуточной и конечной скорости перемещения тележки

Рассматривается случай перевода контейнера из вертикального положения в горизонтальное. На плоскости (h, S) траектория кантования начинается в начале координат $(0, 0)$. Для того, чтобы движение тележки на достаточно большом участке происходило с постоянной и минимально возможной скоростью, траектория кантования должна находиться на прямой, проходящей через начало координат, и быть касательной к нижней границе возможных траекторий (рис. 6).

S/l

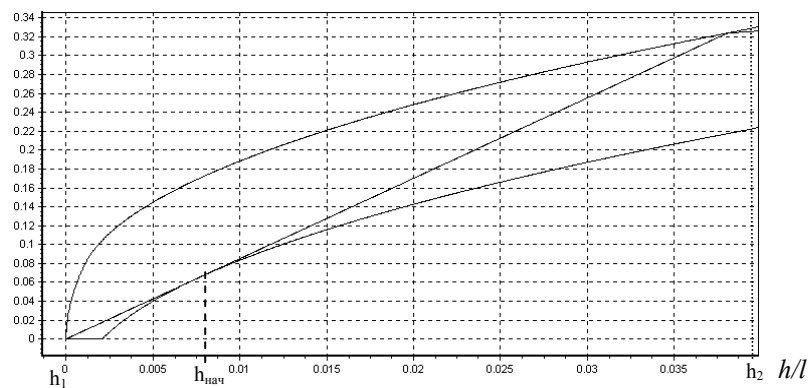


Рис. 6. Начальный участок траектории

Прямые траектории с меньшим углом наклона (с меньшей скоростью тележки) пересекают нижнюю границу и вызывают отклонение от вертикали большее, чем $\alpha_{дон}$. Траектории с большим углом наклона, чем у касательной, не соответствуют требованию минимизации начальной скорости. Наряду с другими положениями предшествующий вывод основывается на том, что нижняя граница траекторий (6) является выпуклой функцией h при рассматриваемых значениях $\alpha_{дон}$.

Рассмотрим траекторию в виде отрезка прямой, проходящей через начало координат $(0, 0)$ и произвольную точку нижней границы допустимых траекторий (h, S) . При движении с постоянными скоростями удлинения каната и перемещения тележки, этой прямой соответствует скорость перемещения тележки равная:

$$v_s = \frac{S}{h} = \frac{\sqrt{l^2 - [2,9l - (1,9l + h) \cdot \cos \alpha_{дон}]^2} - (1,9l + h) \sin \alpha_{дон}}{h}. \quad (7)$$

Максимум из скоростей, удовлетворяющих уравнению (7), позволяет выделить траекторию, касательную к нижней границе, и определить искомую начальную скорость перемещения тележки. Таким образом, задача сводится к отысканию удлинения h , при котором выражение (7) достигает максимума. Значение h позволяет определить соответствующее ему перемещение S по формуле (6), а далее найти значение начальной скорости. Вывод расчётных формул для отыскания экстремума и определения начальной скорости сводится к определению корня производной выражения (7) по h , т.е. решению уравнения:

$$\frac{dv}{dh} = \frac{hS' - S}{h^2} = 0, \quad (8)$$

в котором $\alpha = \alpha_{дон}$. Значения h и S , полученные в результате решения, определяют точку касания $(h_{нач}, S_{нач})$ выбранной траектории с нижней границей траекторий и величину начальной скорости:

$$v_{нач} = \frac{S_{нач}}{h_{нач}}. \quad (9)$$

Линейной траектории с постоянной скоростью тележки равной $v_{нач}$ в системе координат (h, S) соответствует криволинейная экстремальная траектория в системе координат (h, α) . Эта траектория начинается в точке $(h=0, \alpha=0)$, монотонно возрастает, касается верхней границы допустимых траекторий (прямой $\alpha(h) = \alpha_{дон}$) в точке $h_{нач}, \alpha_{дон}$ затем монотонно убывает к нижней границе допустимых траекторий (прямой $\alpha(h) = -\alpha_{дон}$). Это показано на рис. 7.

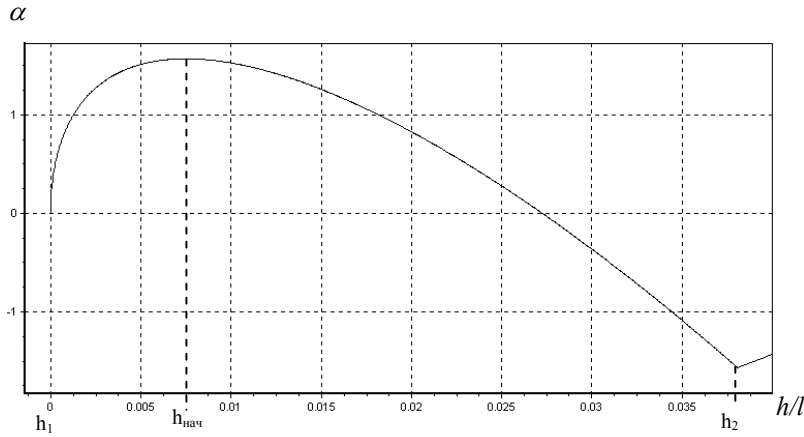


Рис. 7. Начальный участок траектории

Таким образом, экстремальную траекторию $\alpha(h)$ в координатах (h, α) выделяет наличие максимума или равенство нулю производной $\alpha'(h)$ по h в точке $h=h_{нач}$:

$$\alpha'(h) = 0.$$

Для того, чтобы доказать предположение о соответствии траекторий в системах координат (h, S) и (h, α) достаточно показать, что выполнение равенства (9), определяющего $v_{нач}$ в системе координат (h, S) , влечёт за собой выполнение равенства, определяющего экстремальную траекторию в системе координат (h, α) .

Траектория с постоянной скоростью тележки v , проходящая через начало координат $(h=0, \alpha=0)$, в системе координат (h, α) определяется уравнением связи:

$$F(h, \alpha, v) = v - \frac{S}{h} = v - \frac{1}{h} \left(\sqrt{l^2 - [2,9l - (1,9l + h)\cos\alpha]^2} - (1,9l + h)\sin\alpha \right) = 0.$$

Эта зависимость выражается неявной функцией $F(h, \alpha, v) = 0$. Использование методов теории неявных функций¹ позволяет выразить производную от α по h . Эта производная равна отношению частных производных функций $F(h, \alpha, v)$ по h и по α соответственно:

$$\alpha'(h, v) = - \left(\frac{\partial F}{\partial h} \right) / \left(\frac{\partial F}{\partial \alpha} \right). \quad (10)$$

¹ Г.М.Фихтенгольц. Курс дифференциального и интегрального исчисления. М.: Наука. 1969.

Для того, чтобы эта производная равнялась нулю в точке с координатами $\alpha=\alpha_{дон}$, необходимо, чтобы равнялся нулю числитель в (10):

$$\frac{\partial F(h, \alpha, v)}{\partial h} = \frac{S'h - S}{h^2} = 0. \quad (11)$$

Условие (11) совпадает с условием (8) определения начальной скорости для линейной траектории в системе координат (h, S) .

Итак, на первом участке кантования (рис. 6, 7) тележка перемещается с постоянной начальной скоростью. Траектория в системе координат (h, α) имеет вид гладкой кривой (рис. 7), проходящей через точки $(0, 0)$, $(h_{нач}, \alpha_{дон})$ и $(h_2, -\alpha_{дон})$. В системе координат (S, h) траектория имеет вид отрезка прямой (рис. 6). Характерные особенности траекторий указаны выше. Время движения по траектории от начальной точки $h_1=0$ до конечной точки – величина удлинения каната h_2 определяется как решение уравнения:

$$v_{нач} h_2 = S(h_2, -\alpha_{дон}).$$

На последнем (n -м) участке кантования тележка заторможена, и контейнер опускается за счёт удлинения каната. Эта операция позволяет исключить из процесса кантования перемещение тележки на малых скоростях (близких к нулевой) и этим повысить конечную скорость, которая должна реализоваться на предшествующем, $n-1$ -м (предпоследнем), участке. Для того, чтобы конечная скорость перемещения тележки была более высокой, кантование за счёт удлинения каната при заторможенной тележке должно начинаться как можно раньше. Траектория такого кантования на плоскости (h, S) представляет собой горизонтальную прямую, лежащую в области допустимых траекторий. Эта прямая должна касаться нижней границы допустимых траекторий (8) (выше указывалось, что эта граница является выпуклой вверх функцией с ординатой S точки максимума меньшей l). Указанное иллюстрирует рис. 8.

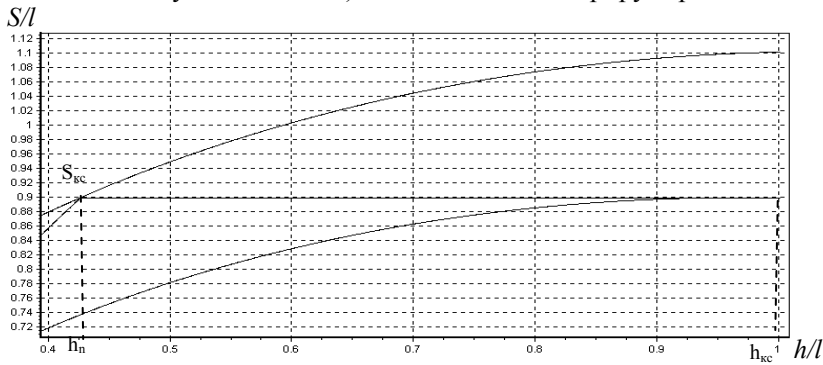


Рис. 8. Последний n -й участок кантования

Координата h точки касания является решением уравнения относительно h_{kc} :

$$S'(h_{kc}, \alpha_{доп}) = 0.$$

Известное значение h_{kc} позволяет определить координату S точки касания:

$$S_{kc} = S(h_{kc}, \alpha_{доп}).$$

Координата h_n – начало последнего участка траектории является решением уравнения:

$$S_{kc} = S(h_n, -\alpha_{доп}).$$

Угол отклонения траверсы от вертикали α_{n+1} в момент h_{n+1} (когда контейнер примет горизонтальное положение и завершится процесс кантования) равен решению уравнения:

$$l - S_{kc} = 2,9l \cdot \operatorname{tg} \alpha_{n+1}.$$

Момент завершения процесса кантования (удлинение каната h_{n+1}) определяется по формуле:

$$h_{n+1} = (2,9l / \cos \alpha_{n+1}) - 1,9l.$$

В рассматриваемом случае отрезок канат – траверса в момент завершения кантования не располагается строго вертикально. Если необходимо, чтобы в конце кантования канат и траверса были строго вертикальны, последний участок кантования (при заторможенной тележке) должен начинаться позже, чем на рис. 8. На этом рисунке такому последнему участку кантования должна соответствовать горизонтальная прямая, проходящая через ординату $S_{kc} = l$, в момент завершения кантования $h_{kc} = l$. Из последующего видно, что это достигается некоторым понижением скорости на предпоследнем участке кантования.

Предпоследний участок кантования на плоскости (h, S) завершается в точке (h_n, S_{kc}) , находящейся на верхней границе допустимых значимых траекторий. Для того, чтобы линейная траектория этого участка имела более высокую скорость тележки, эта траектория должна быть касательной к нижней границе допустимых траекторий (рис.9).

Точка касания (h_{kk}, S_{kk}) является решением системы двух уравнений:

$$(S_{kc} - S_{kk}) / (h_n - h_{kk}) = S'_h(h_{kk}, \alpha_{доп}), \quad S_{kk} = S(h_{kk}, \alpha_{доп}).$$

Конечная скорость тележки $v_{кон}$ равна:

$$v_{кон} = S'_h(h_{kk}, \alpha_{доп}).$$

При трёх участках кантования ($n = 3$) начало предпоследнего (второго) участка (момент переключения с начальной скорости перемещения тележки $v_{нач}$ на конечную скорость $v_{кон}$) на плоскости

(h, S) , т.е. точка (h_{n-1}, S_{n-1}) лежит в пересечении линейных траекторий первого и второго участков кантования, т.е. является решением системы уравнений:

$$S_{n-1} = v_{нач} h_{n-1}; \quad S_{n-1} = S_{кк} - v_{кон} (h_{кк} - h_{n-1});$$

относительно h_{n-1} и S_{n-1} . В этой системе величины $v_{нач}$, $v_{кон}$, $S_{кк}$ и $h_{кк}$ определены выше.

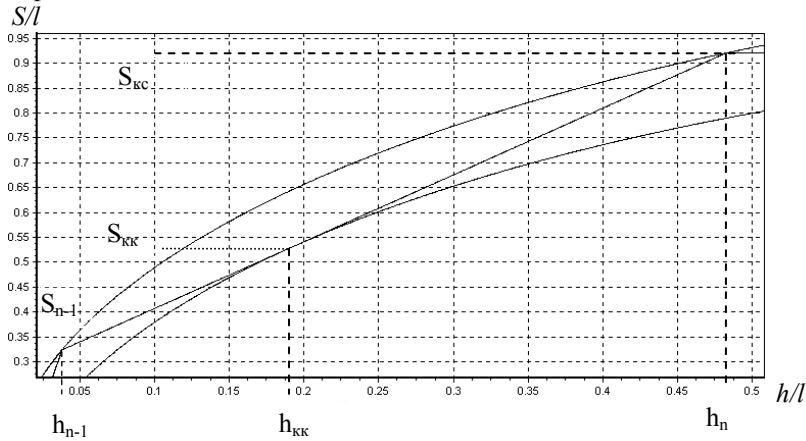


Рис. 9. Предпоследний участок кантования

В том случае, когда число участков больше трёх, скорость перемещения тележки на каждом участке (кроме предпоследнего) может определяться по следующему алгоритму на плоскости (h, S) . Из конца предшествующего участка, который находится на верхней границе допустимых траекторий, проводится касательная к нижней границе допустимых траекторий. Эта траектория продлевается до верхней границы допустимых траекторий, определяются координаты конечной точки участка и скорость перемещения тележки на этом участке. Скорость перемещения тележки на предпоследнем участке определяется по алгоритму, указанному в начале этого раздела.

Точка (h_{n-1}, S_{n-1}) лежит внутри области допустимых траекторий, а в предельном случае на верхней границе допустимых траекторий, как на рис. 9. Такое расположение является более предпочтительным. В этом случае для переключения скоростей тележки достаточно иметь один датчик угла, настроенный на один уровень срабатывания, и переключать скорости в определенном порядке при каждом очередном срабатывании датчика. Указанное предпочтительное расположение угловых точек на линейных траекториях всегда

можно достичь, несколько изменив значение $\alpha_{дон}$. При большем числе линейных участков траектории процесс построения повторяется.

Силовые воздействия на тележку

Кантование контейнера сопровождается силовым воздействием контейнера на тележку через шарнир C . Величину и направление силы, возникающей в шарнире и приложенной к тележке при различных значениях удлинения каната и перемещения тележки, можно определить с применением расчётной схемы, представленной на рис. 10.

К контейнеру приложены следующие силы: вес контейнера G , натяжение каната B и реакция в шарнире C . Контейнер осуществляет плоскопараллельное движение – поступательное движение с постоянной скоростью шарнира C и вращения вокруг шарнира C . В связи с малыми скоростями динамическими нагрузками можно пренебречь и для расчётов использовать уравнение равновесия, в частности равенство нулю суммы моментов всех сил относительно шарнира C :

$$\sum M_c = G \frac{l}{2} \cos \beta - B_y l \cos \beta - B_x l \sin \beta = 0 ,$$

где G – вес контейнера; B_x и B_y – проекции силы действия каната (приложена к контейнеру); β - угол наклона контейнера. Значения $\alpha(h)$ для каждой траектории определены выше, угол β определяется геометрическим расчётом:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{2,9l - (1,9l + h) \cos \alpha}{(1,9l + h) \sin \alpha + S} ,$$

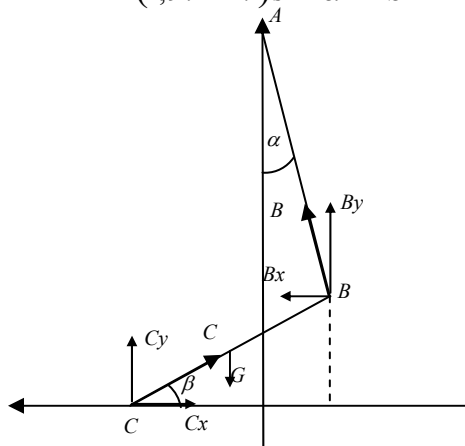


Рис. 10. Схема силовых воздействий

проекция B_x и B_y связаны зависимостью:

$$\operatorname{tg} \alpha = B_x / B_y .$$

Всё это вместе позволяет вычислить для каждой траектории значения сил B_x , B_y , B . Значения C_x и C_y проекций силы C на оси координат равны:

$$C_x = -B_x, \quad C_y = G - B_y.$$

Эти силы могут разгонять и тормозить тележку. При отклонении каната с траверсой от вертикали эти силы направлены таким образом, чтобы перемещение тележки под их действием вызвало уменьшение этого отклонения.

Моделирование процесса кантования и результаты

В соответствии с проведенным анализом и полученными расчетными зависимостями составлена программа моделирования процесса кантования. Программа позволяет по заданному значению допустимого отклонения траверсы от вертикали $\alpha_{дон}$ выбирать траекторию кантования (в виде дискретного набора скоростей тележки и моментов их переключения), которая обеспечивает кантование контейнера при угле отклонения от вертикали α , не превышающем допустимые значения $\pm\alpha_{дон}$.

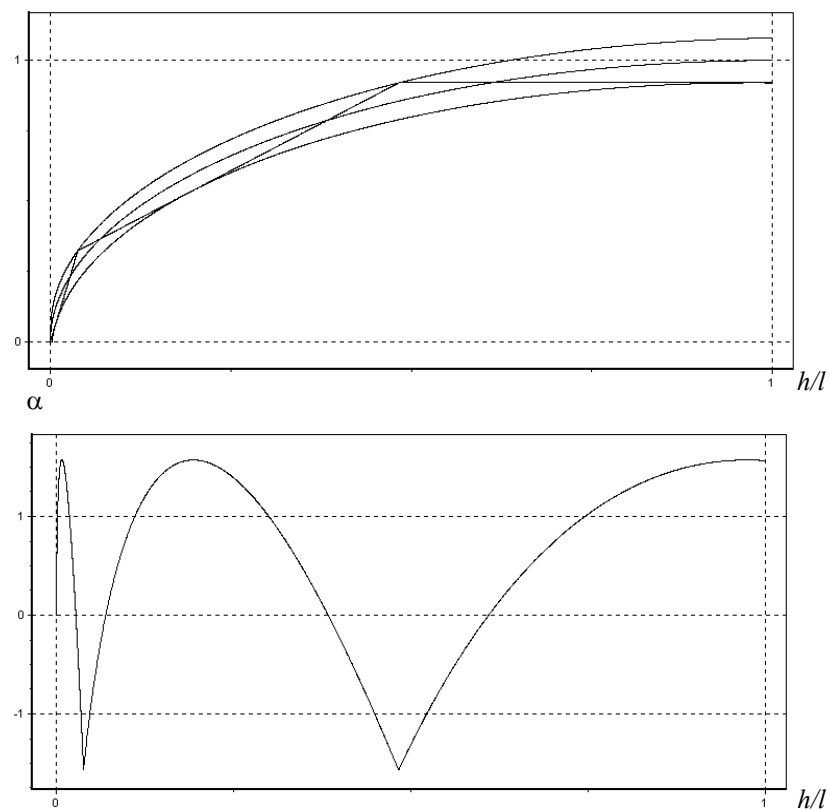
Траектории, соответствующие значениям $\alpha_{дон}$, равным 1,575; 3; 3,98° приведены ниже на рис. 11 - 13. Траектории кантования приведены в двух системах координат:

- h, S (удлинение каната h , перемещение тележки S); здесь реальные траектории имеют вид ломаной линии, идеальные - гладкие линии, предельные – гладкие линии;
- h, α (удлинение каната h , угол отклонения от вертикали α); здесь реальные траектории имеют вид гладких линий; идеальные и предельные – параллельны оси h (на графиках не нанесены).

Графики траекторий для $\alpha_{дон}=1,575^\circ$ и $\alpha_{дон}=3,98^\circ$ дополнены графиками зависимости горизонтальной силы $C_x(h)$, приложенной к тележке со стороны контейнера, и зависимости натяжения каната $B(h)$ от величины удлинения каната h , выраженной в процентах от веса контейнера (рис. 14 и 15). Все графики дополнены таблицами, в которых указаны основные характеристики режима:

- $\alpha_{дон}$ – предельный угол отклонения от вертикали; число скоростей, необходимых для реализации траектории;
- значения скоростей в относительных единицах к скорости удлинения (разматывания) каната;
- моменты достижения траверсой предельного отклонения;
- моменты переключения скоростей при предельных отклонениях траверсы влево (в виде координат h и S);

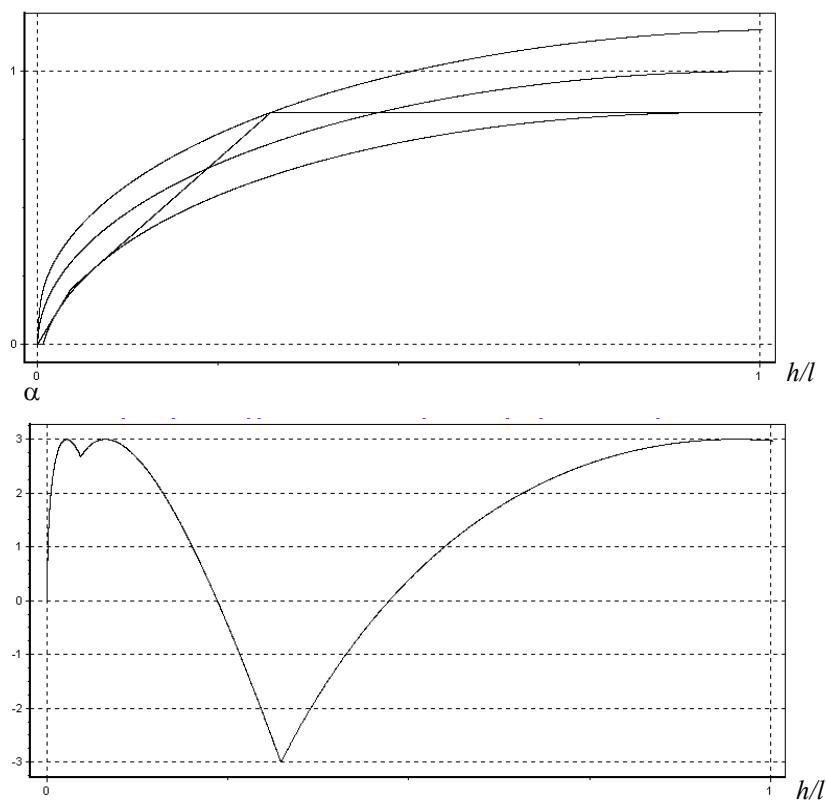
- значения горизонтальных сил, приложенных к тележке со стороны контейнера в указанных выше предельных точках траекторий.
S/l



Исходные данные варианта		Скорости	Момент достижения предельного отклонения вправо		Момент времени переключения скоростей	
			Удлинение каната	Перемещение тележки	Удлинение каната	Перемещение тележки
$\alpha_{доп}, ^\circ$	1,575	8,51	0,007	0,064	0,038	0,324
Количество скоростей	2	1,34	0,193	0,531	0,483	0,921
		0	1,001	0,921		

Рис. 11. Траектории кантования в различных системах координат при $\alpha_{доп} = 1,575^\circ$

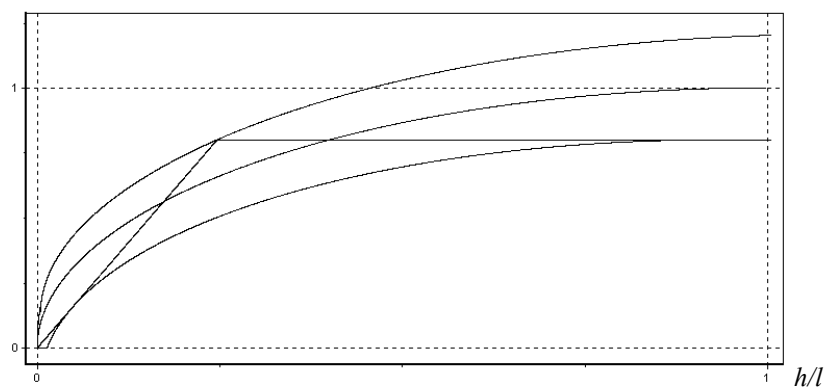
S/l



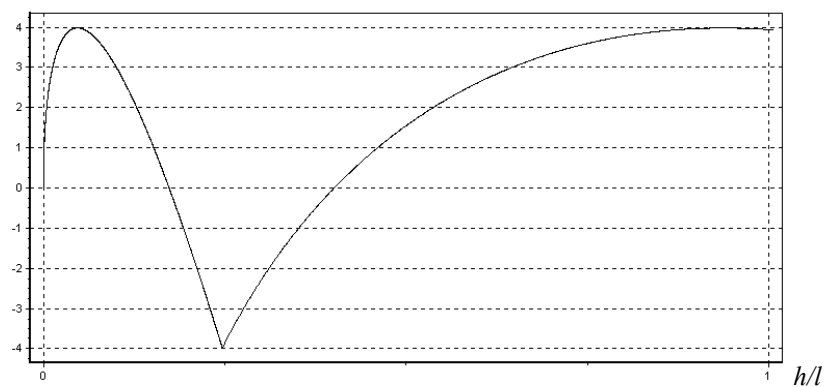
Исходные данные варианта		Скорости	Момент достижения предельного отклонения вправо		Момент времени переключения скоростей	
			Удлинение каната	Перемещение тележки	Удлинение каната	Перемещение тележки
$\alpha_{доп}, ^\circ$	3	4,39	0,027	0,119	0,046	0,203
Количество скоростей	2	2,34	0,080	0,282	0,323	0,849
		0	1,004	0,849		

Рис. 12. Траектории кантования в различных системах координат при $\alpha_{доп} = 3^\circ$

S/l



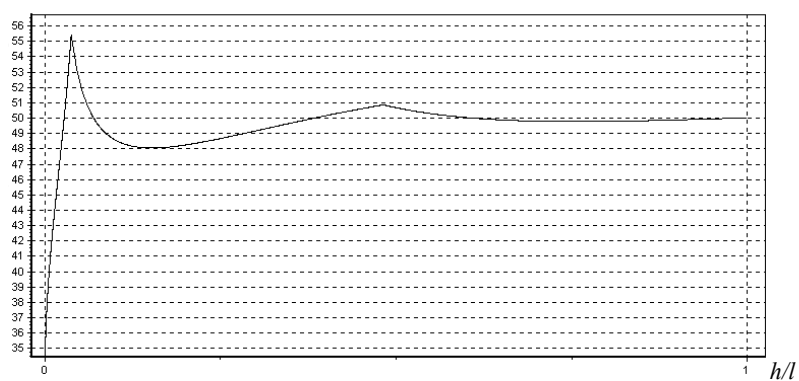
α



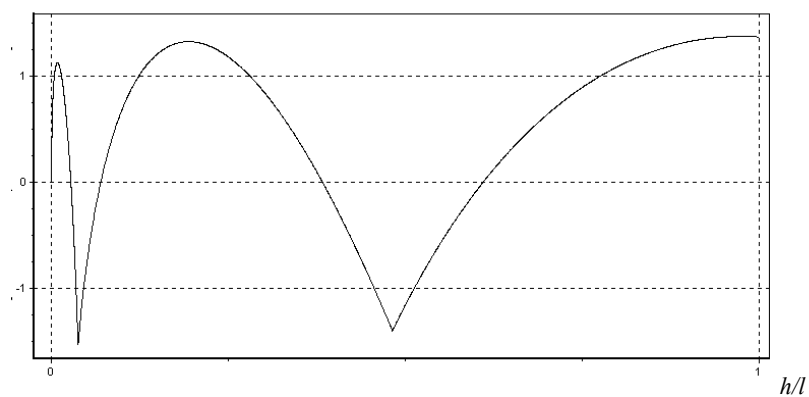
Исходные данные варианта		Скорости	Момент достижения предельного отклонения вправо		Момент времени переключения скоростей	
			Удлинение каната	Перемещение тележки	Удлинение каната	Перемещение тележки
$\alpha_{\text{доп}}, ^\circ$	3,98	3,25	0,047	0,153	0,247	0,801
Количество скоростей	1	0	1,0075	0,801		

Рис. 13. Траектории кантования в различных системах координат при $\alpha_{\text{доп}} = 3,98^\circ$

$B(h)$



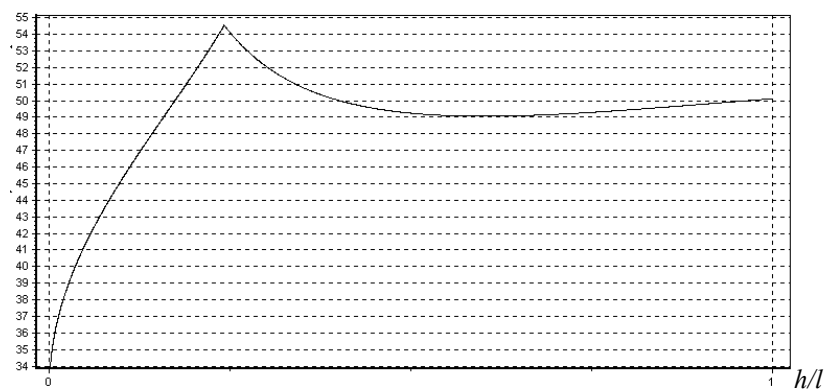
$C_x(h)$



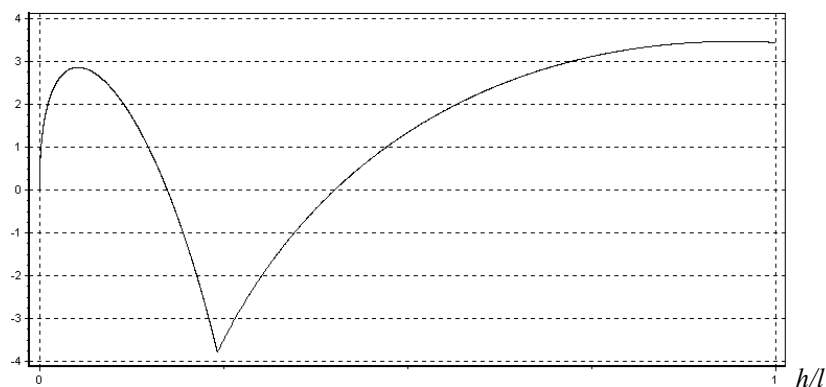
Исходные данные варианта		Скорости	Момент достижения предельного отклонения вправо		Момент времени переключения скоростей	
			Удлинение каната	Горизонтальная сила, %	Удлинение каната	Горизонтальная сила, %
$\alpha_{доп}, ^\circ$	1,575	8,501	0,008	1,122	0,038	-1,523
Количество скоростей	2	1,342	0,193	1,325	0,483	-1,398
		0	1,001	1,374		

Рис. 14. Сила натяжения каната $B(h)$ и горизонтальная составляющая $C_x(h)$, приложенная к тележке при кантовании, для $\alpha_{доп} = 1,575^\circ$

$B(h)$



$C_x(h)$



Исходные данные варианта		Скорости	Момент достижения предельного отклонения вправо		Момент времени переключения скоростей	
			Удлинение каната	Горизонтальная сила, %	Удлинение каната	Горизонтальная сила, %
$\alpha_{доп}, ^\circ$	3,98	3,25	0,247	2,849	0,047	-3,787
Количество скоростей	1	0	1,007	3,465		

Рис. 15. Сила натяжения каната $B(h)$ и горизонтальная составляющая $C_x(h)$, приложенная к тележке при кантовании, для $\alpha_{доп} = 3,98^\circ$

Анализ графиков показывает, что при допустимом угле отклонения $\alpha_{дон}=1,575^\circ$ и постоянной скорости удлинения (разматывания) каната процесс кантования может быть реализован при трех скоростях тележки $v_1=8,51$, $v_2=1,34$, $v_3=0$. При этом в начальный момент при вертикальном положении траверсы с контейнером ($h_1=0$, $S_1=0$) тележка начинает перемещаться влево со скоростью v_1 . Переключение скоростей v_1 на v_2 и v_2 на v_3 происходит при достижении траверсой одного и того же крайнего левого отклонения от вертикали $\alpha=\alpha_{дон}$ в моменты, которые характеризуются координатами $(h_2=0,038, S_2=0,32)$ и $(h_3=0,483, S_3=0,921)$ соответственно.

Отметим, что при $\alpha_{дон}=3^\circ$ на траектории кантования имеется два момента переключения скоростей и два различных предельных угловых отклонения траверсы влево от вертикали, при которых должны переключаться скорости. Это неудобно, так как требует установки датчика вертикали с двумя уровнями срабатывания.

В рассматриваемом случае возможны два варианта, связанные с некоторой корректировкой границ. В одном варианте первые два отрезка можно заменить одним, соединив начало первого и конец второго. При этом будет иметь место некоторое нарушение предельного отклонения вправо. В другом варианте - увеличить $\alpha_{дон}$ до $3,98^\circ$.

При допустимом угле отклонения от вертикали $\alpha_{дон}=3,98^\circ$ кантование можно реализовать с использованием только двух скоростей перемещения тележки $v_1=3,25$, $v_2=0$. Скорость перемещения тележки v_1 нужно включить при вертикальном положении траверсы ($h_1=0$, $S_1=0$) и переключить скорость v_1 на $v_2=0$ при $(h_2=0,247, S_2=0,801)$.

Из приведенных таблиц и графиков видно, что увеличение допустимого угла отклонения от вертикали $\alpha_{дон}$ снижает число скоростей, необходимых для реализации процесса кантования, снижает отношение максимальной скорости к минимальной (не нулевой), при этом повышает горизонтальную силу, приложенную к тележке (которая может тормозить или разгонять тележку, т.е. нагружать привод тележки при движении и при остановках).

На основании сопоставления приведенных материалов и опыта разработчиков электропривода тележки для реализации был выбран вариант кантования с тремя скоростями тележки (включая нулевую) при допустимом угле отклонения траверсы от вертикали, равном $\alpha_{дон}=1,575^\circ$.

Для реализации процесса кантования по изложенному алгоритму был разработан сигнализатор отклонения от вертикали. В качестве чувствительного элемента были использованы два инклинометра ДК-1, выходные сигналы каждого из которых поступали на

два пороговых устройства, настроенных на предельные отклонения.

Выходы пороговых устройств первого инклинометра использовались для поочередного переключения скоростей при достижении верхней границы $\alpha_{доп}$ и сигнализации наблюдения о достижении нижней границы $\alpha_{доп}$. Выходы пороговых устройств второго инклинометра использовались для сигнализации об аварийных отклонениях, превосходящих $\alpha_{доп}$ на градус. Разница в настройках рабочего и аварийного инклинометров, равная 1° , при отсутствии отказов обеспечивала первоочередное срабатывание рабочих пороговых устройств с учетом возможных погрешностей измерений. Предусмотрена возможность перенастройки пороговых устройств ступенями с шагом $0,5^\circ$.

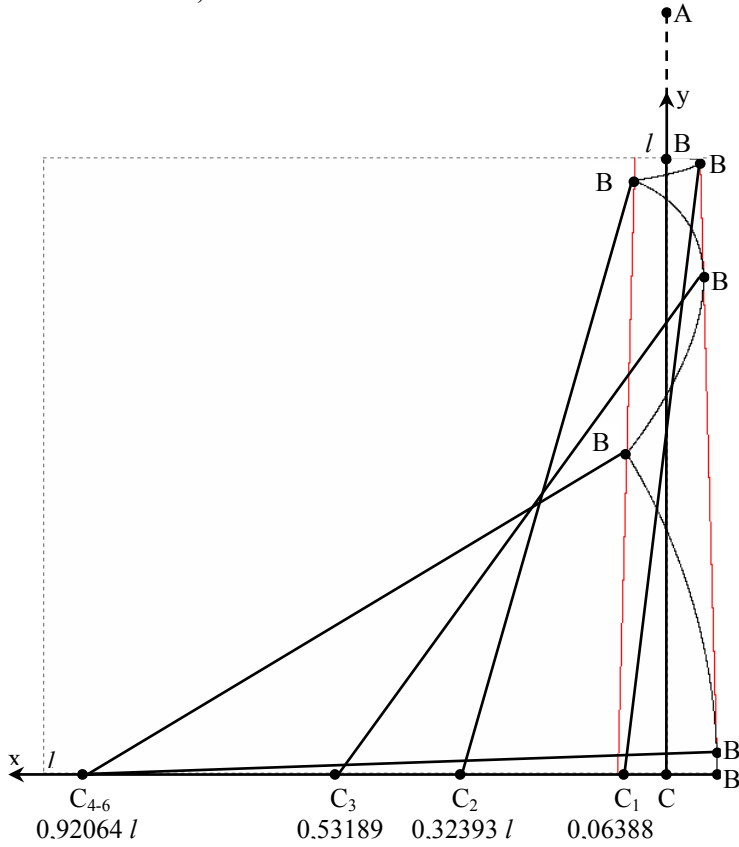


Рис. 16. Траектория контейнера при его переводе из вертикального положения в горизонтальное

Траектория перемещения контейнера при переводе его из вертикального положения в горизонтальное для $\alpha_{дон}=1,575^\circ$ представлена на рис. 16, где последовательные положения контейнера BC различаются по индексам у B и C . Программа моделирования кроме выбора оптимальной траектории способна воспроизводить движение системы в режиме имитации реального времени. Программа автоматически создает 3D-анимационное моделирование движения системы.

Изложенное относится к ситуации, когда при кантовании задача минимизации отношения максимальной скорости тележки к минимальной и минимизация числа дискретных скоростей имеют первостепенное значение. В том же случае, когда эти требования можно ослабить и более важными являются другие ограничения, изложенные процедуры частично могут также использоваться. Например можно использовать построенные выше верхнюю и нижнюю границы допустимых траекторий в системе координат (h, S) , наносить на полученном чертеже приемлемые линейные траектории и выбирать среди них более полно отвечающие поставленной задаче. В этом случае точки пересечения линейных траекторий и с верхней, и с нижней границей могут использоваться для переключения скоростей тележки.

В разработке сигнализатора и комплексных испытаниях сигнализатора и всей системы принимали участие М.А.Смирнитский, А.Н.Казачков, С.П.Квасников, Х.А.Аляутдинов, И.В.Шафрановская. Процедура кантования прошла опытную проверку.