

# Необычный динамический эффект тележки с инерционным дебалансным движителем

## Unusual dynamic effect of the cart with inertial unbalanced propulsor

**Самонов С.А.**

канд. техн. наук, начальник технического отдела  
e-mail: samonsergey@mail.ru

**Samonov S.A.**

Candidate of Technical Sciences, Head of Technical Department  
e-mail: samonsergey@mail.ru

### Аннотация

В статье рассмотрены условия, при которых возможно однонаправленное движение тележки с дебалансным инерционным движителем, представляющим собой вращающийся в горизонтальной плоскости рычаг – кривошип с грузом. Одним из способов является пуск тележки из заторможенного состояния с определенным углом трогания. Составлены уравнения движения, из которых следует, что тележка будет неограниченно удаляться от места пуска в бесконечно повторяющихся циклах асимметричных прямых и обратных ходов. Под действием сопротивления со стороны опорной поверхности движение тележки, начавшееся с произвольным углом трогания в режиме асимметричных ходов, постепенно трансформируется в режим симметричных, на некотором удалении от места пуска, с углом начала движения, не совпадающим с исходным. Обнаружен необычный динамический эффект углового дрейфа, когда корпус тележки совершает короткий поворот в сторону вращения рычага с дебалансом, при пересечении им продольной оси тележки. Если принудительно заставить тележку двигаться вперед, когда дебаланс совершает половину оборота справа от поперечной оси, а назад, когда половину оборота слева, направление углового дрейфа меняется, и корпус тележки начинает совершать повороты в сторону, противоположную направлению вращения.

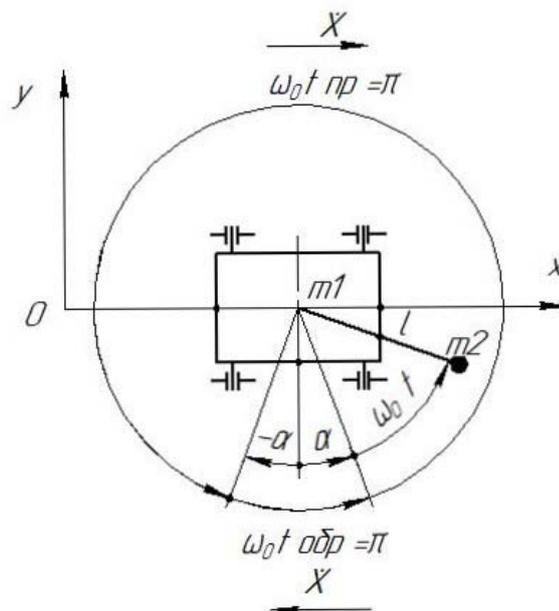
**Ключевые слова:** движитель, дебаланс, рычаг – кривошип, угол трогания, прямой ход, обратный ход, удаление, динамический эффект, угловой дрейф.

### Abstract

The article considers the conditions under which unidirectional drive of a cart with unbalanced inertial propulsion is possible. The inertial propulsion includes lever – crank with a load, rotating in horizontal plane. One way of unidirectional drive is to start the cart from a locked state with starting angle. The equations of motions are compiled, from which it follows that the cart will be unlimitedly removed from the launch site in infinitely repeating cycles of asymmetric forward and reverse move. Under the action of resistance to drive from the side of the supporting surface, the asymmetric moves gradually transforms into the symmetric mode, at some distance from the launch site. It detected unusual dynamic effect – the angular drift, when the cart body makes a short turn in the direction of rotation of the lever–crank, when it to cross over of their longitudinal cart axis. If the cart is forced move forward, when the unbalance makes half a revolution on the right of transverse axis and back when–half the revolution to the left, the direction of angular drift changes and cart body begins to make turn in direction opposite to the direction of rotation.

**Keywords:** propulsion, unbalance, lever–crank, starting angle, forward move, reverse move, removal, dynamic effect, angular drift.

Известен подход, согласно которому замкнутую механическую систему можно привести в действие силами инерции, возникающими при перемещении ее внутренних элементов [1]. Устройства, генерирующие такие силы, получили название инерционных движителей. Простейшим движителем такого рода является дебалансный, представляющий собой вращающийся в горизонтальной плоскости рычаг – кривошип с грузом. Однонаправленное перемещение транспортного средства с таким движителем можно обеспечить, в том числе, пуском из заторможенного состояния при раскрученном до постоянной скорости вращения дебалансе. Растормаживание, например, колесной тележки в момент, когда угловая координата вращающегося рычага равна  $\alpha$  (рис. 1) приведет к тому, что под действием горизонтальной составляющей центробежной силы дебаланса тележка начнет свое движение вдоль оси  $x$ .



**Рис. 1.** Расчетная схема тележки с инерционным дебалансным приводом

Запишем уравнение движения тележки:

$$(m_1 + m_2)\ddot{x} = m_2\omega_0^2 l \sin(\omega_0 t + \alpha),$$

где:  $m_1$  – масса тележки,  $m_2$  – масса дебаланса,  $\ddot{x}$  – ускорение тележки,  $\omega_0$  – частота вращения рычага с грузом,  $l$  – длина рычага,  $t$  – текущее время,  $\alpha$  – угол трогания,  $\omega_0 t$  – текущий угол поворота.

После интегрирования, с учетом начальных условий, при  $t = 0, \dot{x} = 0, x = 0$ , найдем уравнения скорости и перемещения тележки:

$$\begin{aligned} (m_1 + m_2)\dot{x} &= m_2\omega_0 l [\cos \alpha - \cos(\omega_0 t + \alpha)], \\ (m_1 + m_2)x &= m_2 l [\cos \alpha \cdot \omega_0 t + \sin \alpha - \sin(\omega_0 t + \alpha)] \end{aligned} \quad (1).$$

После поворота рычага на угол  $\omega_0 t_{\text{пр}} = 2\pi - 2\alpha$ , тележка остановится ( $\dot{x} = 0$ ), совершив прямой ход по уравнению (1). Следующий цикл – обратный ход при начальных условиях:

$$t = 0, \dot{x} = 0, (m_1 + m_2)x = 2m_2 l [(\pi - \alpha) \cos \alpha + \sin \alpha],$$

описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} (m_1 + m_2)\ddot{x} &= m_2\omega_0^2 l \sin(\omega_0 t - \alpha), \\ (m_1 + m_2)\dot{x} &= -m_2\omega_0 l [\cos(\omega_0 t - \alpha) - \cos \alpha], \end{aligned}$$

$$(m_1 + m_2)x = m_2l[\cos \alpha \cdot \omega_0 t + 2(\pi - \alpha) \cos \alpha + \sin \alpha - \sin(\omega_0 t - \alpha)] \quad (2).$$

После поворота рычага на угол  $\omega_0 t_{\text{обр}} = 2\alpha$  тележка остановится ( $\dot{x} = 0$ ), совершив обратный ход по уравнению (2). Величина пути, пройденного тележкой за один цикл прямого и обратного ходов, определяет ее удаление от исходного положения и вычисляется из (2):

$$x = 2\pi l \cos \alpha \cdot m_2 / (m_1 + m_2).$$

Из уравнения следует, что при  $0 \leq \alpha < \pi/2$  тележка неограниченно удаляется в положительном направлении в бесконечно повторяющихся циклах асимметричных прямых и обратных ходов. При  $\pi/2 < \alpha \leq \pi$  тележка удаляется в противоположном направлении. При  $\alpha = \pi/2$  прямой ход равен обратному, тележка от исходного положения не удаляется, а совершает симметричные возвратно-поступательные перемещения. В реальных условиях тележка испытывает сопротивление движению со стороны опорной поверхности, зависящее от нагрузки на колеса, коэффициента трения качения, рельефа и уклона опорной плоскости, погрешностей формы и расположения колес. Полагая, что сопротивление пропорционально весу тележки, уточним уравнения движения, как происходящее под влиянием сухого трения [2]:

$$(m_1 + m_2)\ddot{x} = m_2\omega_0^2 l \sin(\omega_0 t + \alpha) - (m_1 + m_2)gk_c \cdot \text{sign } \dot{x},$$

$$(m_1 + m_2)\dot{x} = m_2\omega_0 l [\cos \alpha - \cos(\omega_0 t + \alpha)] - (m_1 + m_2)g t k_c \cdot \text{sign } \dot{x}, \quad (3)$$

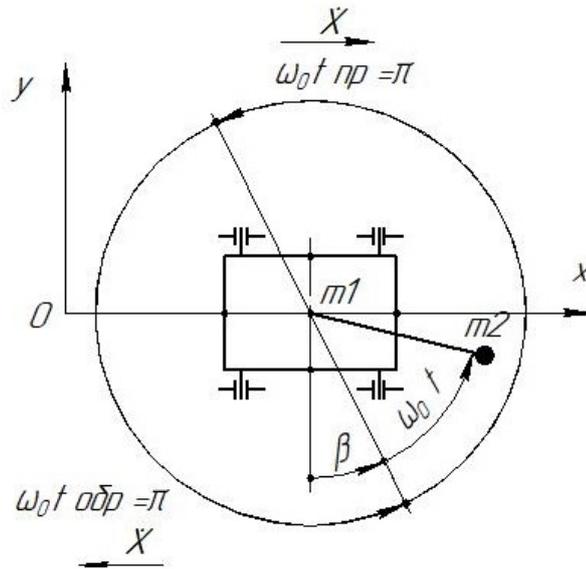
$$(m_1 + m_2)x = m_2l[\cos \alpha \cdot \omega_0 t + \sin \alpha - \sin(\omega_0 t + \alpha)] - (m_1 + m_2)g \left( \frac{t^2}{2} \right) k_c \cdot \text{sign } \dot{x}, \quad (4)$$

где  $k_c$  – эквивалентный коэффициент сопротивления,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{sign } \dot{x}$  – знак скорости (+, -).

Для расчёта движения тележки за известное количество циклов прямых и обратных ходов необходимо решить последовательные цепи уравнения (3), определяя момент  $t$ , когда происходит остановка ( $\dot{x} = 0$ ). Это дает возможность найти угол трогания ( $\alpha$ ) следующего хода и, по уравнению 3, время и угол поворота до остановки ( $t, \omega_0 t$ ). Таким образом, значения, полученные на предыдущем ходе, определяют начальные условия последующего. Установлено, что при достаточно большом количестве ходов время и углы поворота до остановок на прямых и обратных ходах асимптотически уравниваются и занимают половину оборота дебаланса. Угол трогания  $\beta$ , при движении с трением, определяется из (3) подстановкой  $\omega_0 t = \pi$ . Перемещение тележки на прямом и обратных ходах в симметричном режиме из (3) и (4):

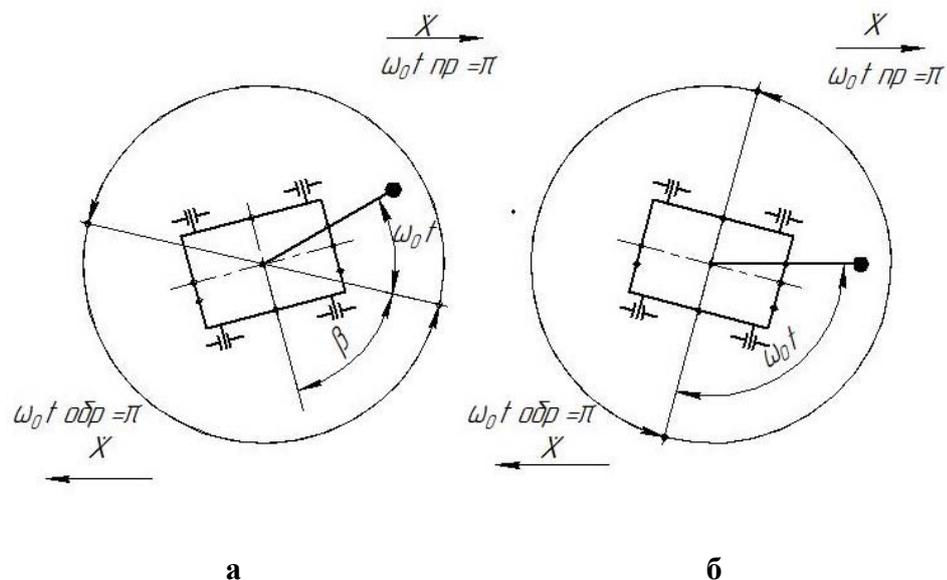
$$x = 2l \sin \beta \cdot m_2 / (m_1 + m_2).$$

Таким образом, при пуске тележки с произвольным углом трогания  $\alpha$ , ее движение в режиме асимметричных ходов постепенно трансформируется в режим симметричных на некотором удалении от места пуска с углом начала движения  $\beta$  (рис. 2).



**Рис. 2.** Углы поворота до остановок и углы трогания в установившемся режиме движения тележки с трением

Предполагалось, что установившийся режим симметричных ходов с трением стабилен и может продолжаться сколь угодно долго, на одном месте. Однако, практически, он реализуется с трудом, по крайней мере, при малом сопротивлении движению. Наблюдаются внезапные срывы тележки с места, ее «сносит» в ту или иную сторону до временного «успокоения» в новом положении. Причиной этого, видимо, является внезапная помеха, изменяющая значение  $k_c$ , например, подклинивание колес или силовое воздействие на элементы тележки с двигателем. В пользу воздействия свидетельствует так называемый угловой дрейф – отклонение тележки по курсу, наблюдаемое в режиме симметричных ходов. Для изучения дрейфа был изготовлен макет трехколесной тележки, у которой два колеса располагаются вдоль поперечной оси, а одно, среднее – вдоль продольной (рис. 3а). При нахождении рычага с грузом напротив среднего колеса продольной оси колеса поперечной оси максимально разгружаются и почти не препятствуют повороту на них корпуса тележки относительно ее центра. При этом груз подобран таким образом, что при его вращении среднее колесо от опорной поверхности не отрывается.



**Рис. 3.** Угловым дрейф тележки: (а) – в сторону вращения рычага с дебалансом, (б) – в противоположную сторону

При вращении рычага, например против часовой стрелки, он пересекает линию продольной оси, разгружая поперечные колеса движущейся тележки, повышая чувствительность ее корпуса к внешнему воздействию. В момент пересечения оси становится заметно, как корпус совершает короткий поворот в сторону вращения. Накопление малых угловых поворотов воспринимается наблюдателем, как очень медленное вращение (угловой дрейф) в возвратно-поступательном движении тележки. Предположение о том, что повороты тележки обусловлены повышенным трением в подшипнике, радиальным биением, конструктивными факторами корпуса или колес, не подтвердилось, так как их перестановка никак не повлияла на направление вращения. Другая, наиболее вероятная, причина поворотов – действие переносной силы инерции на дебаланс в фазе разгона тележки, когда он проходит сектор между продольной и поперечной осью, также оказалась несостоятельной. Попытка уравновесить эту силу инерцией дополнительного груза (многократно превосходящего по массе дебаланс), установленного над осью колеса, расположенного с противоположной стороны сектора вращения, ни к чему не привела. Еще более необычный эффект наблюдается, когда тележку принудительно – подталкиванием – заставляют двигаться с углами трогания 0 и минус  $\pi$  радиан, как показано на рис. 3б. Другими словами, тележка движется вперед, когда дебаланс совершает половину оборота справа от поперечной оси, а назад, когда – половину оборота слева. В этом случае направление углового дрейфа меняется, и корпус тележки начинает совершать повороты в сторону, противоположную направлению вращения.

В качестве основных выводов необходимо указать на следующее:

- транспортные средства с инерционным дебалансным приводом практического интереса не представляют, так как не могут двигаться с отличным от нуля средним ускорением и преодолевать сопротивление движению;
- эффект углового дрейфа тележки с дебалансным приводом заслуживает более внимательного изучения, как вероятное проявление ранее неизвестного силового фактора.

**Литература:**

1. *Толчин В.Н.* Инерцоид. Силы инерции, как источник поступательного движения. – Пермь: Пермское книжное издательство, 1977. – 100 с.
2. *Лойцянский Л.Г.* Курс теоретической механики: в двух томах. Т. 2. Динамика.– М.: Наука, 1983. – 640 с.