Технический журнал «Вестник машиностроения»

Журнал входит в перечень утверждённых ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

Текущий номер: 2013 / 05

УДК 620.178

В.Г. Атапин, д-р техн. наук, А.И. Родионов, канд.физ.-мат. наук,
А.А. РЫКОВ, канд.техн. наук, Г.С. Юрьев, д-р техн. наук (Новосибирский ГТУ), e-mail: teormech@ngs.ru

ИСПЫТАНИЯ ИЗДЕЛИЙ БОЛЬШИХ РАЗМЕРОВ НА ИНЕРЦИОННО - ИМПУЛЬСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

Для испытаний малогабаритных изделий на ударное воздействие высокой интенсивности широкое распространение нашли стенды, использующие волноводный тракт для формирования плоской ударной волны, которая нагружает испытуемое изделие [1]. Приведём в качестве примера технические характеристики испытательных стендов Рус.1, К8-77, ИЦ-30000/0.01, разработанных на кафедре теоретической механики и сопротивления материалов Новосибирского Государственного Технического Университета.

Технические характеристики стенда Рус.1.:

Пиковое значение, до $7*10^4$g, Длительность импульса - 50-100 мкс.
Форма нагрузки – полусинус. Масса испытуемого изделия - 0,3 кг.
Скорость ударника до 40 м/с Габариты установки - 4500х700х1200 мм.
Производительность – 2-а уд/мин

Технические характеристики стенда К8-77:

Пиковое значение - $5*10^4$g. Длительность импульса - 0,05-0,1 мс.
Форма нагрузки – полусинус. Масса испытуемого изделия - 0,5 кг
Скорость ударника до 50 м/с Габариты установки, 1500х550х650 мм
Производительность 3 уд/мин

Технические характеристики стенда ИЦ-30000/0.01.:

Пиковое значение - 5-30 $*10^3$g Длительность импульса - 5-15 мс
Форма нагрузки – полусинус. Габариты испыт. изд. 40х40х40 мм.
Габариты уст-ки - 1200х750х600 мм
Производительность, уд/час, 20

Однако с увеличением габаритов изделия увеличивать диаметр волновода нельзя из-за искажения плоского фронта ударной волны. В связи с этим при испытании габаритных объектов на импульсное воздействие ставится задача о разработке стендов работающих на другом принципе действия. Для формирования ударного воздействия с небольшим ускорением $\approx 500\ м/c^2$ вполне можно использовать стенды, работающие на принципе свободного падения.

В данной работе покажем, что с помощью центробежных стендов можно габаритному испытуемому объекту сообщить при его поступательном движении импульсное ускорение.

Рассмотрим стенд [2], кинематическая схема которого приведена на рис.1.

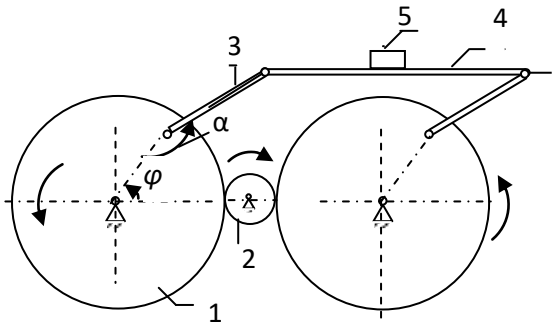


Рис.1

Инерционно-импульсный механизм с поступательным движением стола-носителя рассматриваем как консервативную систему с двумя степенями свободы. Расчетная схема такого механизма (рис.1) включает: два маховика накопителя энергии 1, кинематически связанные между собой шестерней 2; два маятника-водила 3, подвешенных на периферии маховиков;

стола – носителя 4 с испытуемым изделием 5. Механизм расположен в горизонтальной плоскости.

В качестве обобщенных координат, определяющих положение механизма, возьмем угол поворота маховика φ и угол поворота маятника - α. Выбранное положительное направление угла α достигается соответствующим размещением дисбаланса на маятнике, обеспечивающего наличие малого начального угла α_0.

Уравнения движения данной механической системы запишем в безразмерном виде:

$$\ddot{\Psi}_0 = \frac{\dot{\Psi}_0^2(1 - A\cos\alpha) + 2\dot{\Psi}_1\dot{\Psi}_0 + \dot{\Psi}_1^2}{A(\cos^2\alpha - C)}\sin\alpha$$

$$\ddot{\Psi}_1 = A\dot{\Psi}_0^2\sin\alpha - \ddot{\Psi}_0(1 - A\cos\alpha) \qquad (1)$$

где $A = \dfrac{2m_3R\ell_3 + m_4R^2}{2I_3 + m_4R^2}$; $C_1 = \dfrac{2I_0 + (m_4 + I_{02}/r_2^2 + 2m_3)R^2}{2I_3 + m_4h_3^2}$; $C = \dfrac{C_1}{A^2}$

Здесь $\dot{\Psi}_0 = \dot{\varphi}/\omega_0$; $\dot{\Psi}_1 = \dot{\alpha}/\omega_0$; $\ddot{\Psi}_0 = \ddot{\varphi}/\omega_0^2$; $\ddot{\Psi}_1 = \ddot{\alpha}/\omega_0^2$ - безразмерные угловые скорости и ускорения маховиков и маятников, ω_0 - угловая скорость маховиков в начальный момент времени, $\tau = \omega_0 t$; m_3, m_4 - соответственно массы маятника и стола с изделием; I_0, I_3, I_{02} - моменты инерции соответственно маховика, маятника и шестерни- синхронизатора относительно своих осей вращения; ℓ_3, R, r_2 - соответственно расстояние от оси крепления маятника до его центра масс, расстояние от оси маховика до оси крепления маятника, радиус шестерни-синхронизатора.

Система уравнений (1) решается при следующих начальных условиях:

при $\tau = 0$, $\varphi = 0$, $\alpha = \alpha_0$, $\dot{\Psi}_0 = 1$, $\dot{\Psi}_1 = 0$. (2)

Абсолютное ускорение изделия 5 разложим на две составляющие на нормальную составляющую, направленную по маятнику к его оси вращения и касательную, направленную перпендикулярно к нормальной в сторону углового ускорения маятника.

$$\tilde{a}^{\tau} = (A-1)(\ddot{\Psi}_0 \cos\alpha + \dot{\Psi}_0^2 \sin\alpha)$$
$$\tilde{a}^{n} = (\dot{\Psi}_1 + \dot{\Psi}_0)^2 - \dot{\Psi}_0^2 \cos\alpha + \ddot{\Psi}_0 \sin\alpha \qquad (3)$$

Здесь $\tilde{a}^{\tau} = a^{\tau} / \omega_0^2 R$, $\tilde{a}^{n} = a^{n} / \omega_0^2 R$

Расчет параметра А для различных конфигураций маятников показал, что он не превышает двух $(A < 2)$. Следовательно, при дальнейшем исследовании динамики инерционно-импульсного механизма можно положить $A = 1$. При этом, если $A = 1$ то как следует из (3) $\tilde{a}^{\tau} = 0$. В этом случае направление вектора ускорения любой точки изделия будет всегда совпадать с направлением нормали маятника. То есть абсолютное ускорение изделия будет равно $\tilde{a}^{n}$. Используя первый интеграл системы (1), можно получить зависимость максимального углового ускорения маятника (при $\alpha = \pi$) от констант C_1 и А:

$$\dot{\tilde{\alpha}}_{\pi} = \sqrt{\frac{4A(C_1 + 1 - 2A)}{C_1 - A^2}} \qquad (4)$$

Откуда видно, что при $A = 1$ максимальная угловая скорость маятника будет всегда постоянна, не зависимо от параметров маховика, и равна двум.

Уменьшение параметра С приводит к падению угловой скорости маховика, а при С < 5 маховик вообще меняет направление вращения. Чтобы потеря угловой скорости маховика при максимальном раскрытии маятника ($\alpha = \pi$) не превышала 15% достаточно положить С=50.

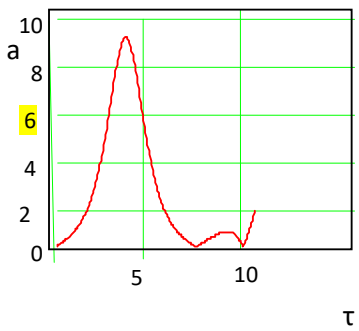


Рис.2

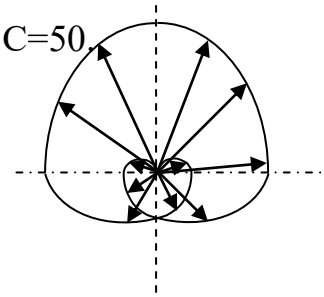


Рис.3

Зависимость импульса ускорения, которое получает изделие, рассчитанное по формулам (3) при выбранных константах А и С, показана на рис.2. Пусть необходимо воспроизвести импульс ускорения с максимальной амплитудой $20 \cdot 10^4$ м/с^2 и длительностью процесса $21 \cdot 10^{-3}$ с. В этом случае достаточно разогнать маховики до начальной угловой скорости $n = 3185$

об/мин, а расстояние от оси вращения маховика до места крепления маятника взять равным $R = 0.2$ м.

На рис.3 показано как изменяется направление вектора ускорения во времени в системе координат XOY в любой точке изделия.

Таким образом, рассмотренная модель центробежного стенда с поступательным движением стола- носителя позволяет испытывать изделия больших габаритов на импульсное воздействие повышенной интенсивности. Но вектор ускорения в каждой точке объекта в этом случае вращается вокруг своей точки приложения.

Рассмотрим копёр [3], который ранее использовался для разгона ударников. Покажем, что его можно применить для разгона испытуемого объекта при прямолинейном поступательном движении.

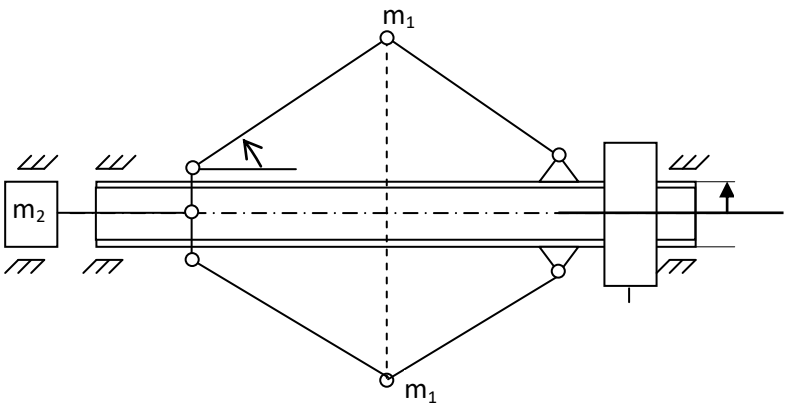


Рис. 4

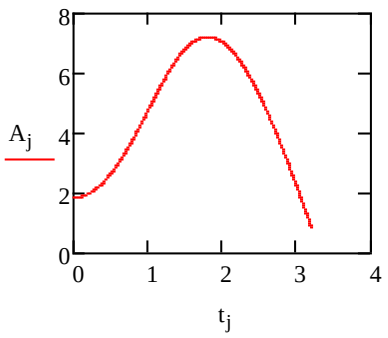
Кинематическая схема такого стенда показана на рис. 4. Основными элементами стенда являются: полый вал радиусом r_0, два груза массой m_1 каждый, четыре тела длиной l каждый, платформа с испытуемым объектом общей массой m_2, маховик массой m_3. После достижения валом, а вместе с ним всей конструкции (кроме платформы с изделием) заданной угловой скорости, срабатывает спусковой механизм. Платформа с испытуемым объектом получает импульсное ускорение. Предполагая, что угловая скорость вращения конструкции остается постоянной во все время работы

стенда, уравнение движения данной механической системы в безразмерном виде, без учета сил трения имеет вид;

$$\ddot{z} = \frac{z \cdot \left(\frac{\dot{z}^2}{4 \cdot L^2} + \left(1 - \frac{z^2}{4 \cdot L^2}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{1}{L} + \sqrt{1 - \frac{z^2}{4 \cdot L^2}}\right)\right)}{\left(1 - \frac{z^2}{4 \cdot L^2}\right)\left(1 + 2 \cdot M \cdot \left(1 - \frac{z^2}{4 \cdot L^2}\right)\right)}$$

где $z = x/r_0$, $L = l/r_0$, $M = m_2/m_1$, $\ddot{z} = \frac{\ddot{x}}{\omega^2 \cdot r_0}$, x- координата, определяющая положение платформы с испытуемым объектом.

Решая уравнение при начальных условиях: при τ=0 $\dot{z} = 0$, $z = 2 \cdot L \cdot \cos(\alpha_0)$, вычисляем импульс ускорения объекта $A_j = \ddot{z}$ при M=1 и $L = \frac{l}{r_0} = 12.5$ (рис.5).

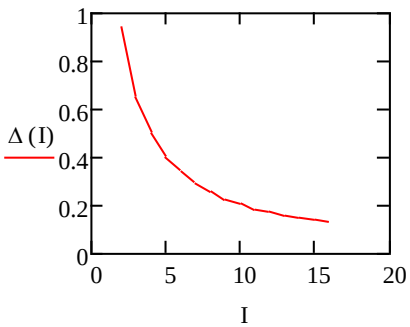


Полный импульс ускорения формируется при изменении угла α от α_0 до $\pi/2$.

Положим ω=100с$^{-1}$. Тогда при $r_0 = 0.05$ м получаем амплитуду импульса ускорения объекта равной 3500 м/с^2 с длительностью 0.03с.

Заметим, что изменением массы грузов m_1 и угловой скорости вращения вала, можно варьировать амплитуду и длительность импульса ускорения.

Используя закон сохранения кинетического момента, можно сделать



оценку непостоянства угловой скорости вращения механизма (Рис. 6).

Рис.5 Рис.6

$$\Delta(I) = \frac{\left(\frac{2}{L}\right) \cdot (\sin(\alpha) - \sin(\alpha_0)) + \sin^2(\alpha) - \sin^2(\alpha_0)}{(1/L + \sin(\alpha_0))^2 + 0.5 \cdot I},$$

где $I = I1/(m_1 l^2)$, I1- момент инерции маховика. Из рис. 6 видно, чтобы падение угловой скорости при раскрытии механизма на угол $\alpha = 90^0$ не превышало 20% необходимо, чтобы $I = 10$. Отсюда можно определить момент инерции маховика.

Рассмотрим третью схему стенда, близкую по принципу действия с предыдущим стендом. Основными элементами этого стенда (рис. 7) являются: полый вал радиусом r_0, грузы 1 массой m_1 каждый, платформа с испытуемым объектом 2 массой m_2, маховик 3 массой m_3. Грузы, которые под действием центробежных сил движутся прямолинейно внутри маховика, соединены с платформой тросом. В начальный момент грузы находятся в покое относительно маховика вблизи оси вращения.

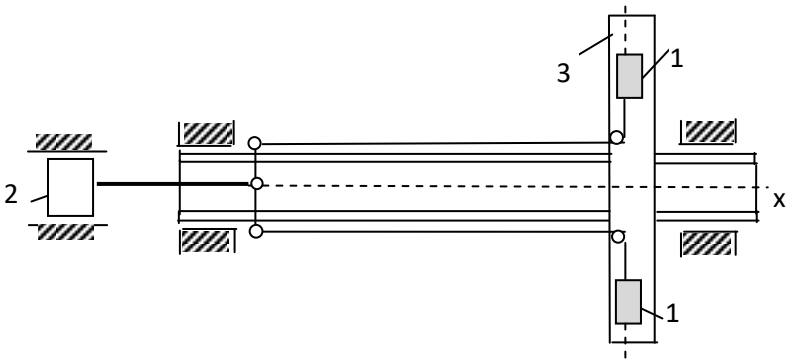


Рис.7

После достижения маховиком необходимой угловой скорости срабатывает спусковой механизм (на рисунке он не показан), поступательное движение грузов 1 относительно маховика преобразуется в прямолинейное движение платформы с испытуемым объектом. На этом этапе разгона платформы с испытуемым объектом формируется первая фаза импульса ускорения .Дифференциальное уравнение, описывающее движение на этом участке в безразмерном виде имеет вид:

$$\ddot{z} = 2 \cdot \mathrm{M} \cdot (1 + \mathrm{z})$$

с начальными условиями: при τ=0 $z = 0, \quad \dot{z} = 0.$

Вторая фаза импульса ускорения формируется при торможении платформы . Будем считать, что демпфирующая сила изменяется по закону $F = \mu(x - x_1)^3$, где x_1- координата, при которой начинает действовать демпфирующая сила. Уравнение движения на этом участке (при $z \geq z_1$ примет вид:

$$\ddot{z} = 2 \cdot \mathrm{M} \cdot (1 + \mathrm{z}) - \mathrm{b} \cdot (\mathrm{z} - \mathrm{z}_1)^3,$$

$$b = \frac{\mu \cdot r_0^2}{m_2 \cdot \omega^2}, \quad z = \frac{x}{r_0}, \quad \mathrm{M} = \frac{\mathrm{m}_1}{\mathrm{m}_2}, \quad \mathrm{z}_1 = \frac{\mathrm{x}_1}{\mathrm{r}_0}, \quad \tau = \omega t$$

Таким образом, формируется полный импульс ускорения платформы с испытуемым объектом (рис.8). Расчет выполнен при $M = 2,\ b = 100,\ z_1 = 2.$

Положив $r_0 = 0.05$ м и $\omega = 100\ c^{-1}$ получим амплитуду импульса ускорения равной 7600 м/с^2 с длительностью 0.02 с.

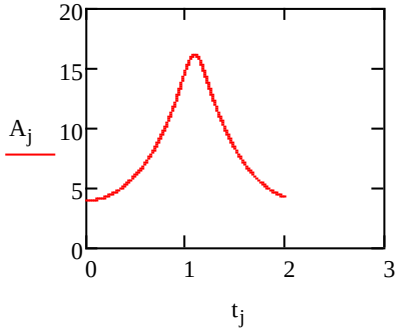


Рис.8

Возможности такого стенда позволяют варьировать не только длительностью и амплитудой импульса ускорения, но также, за счет изменения демпфирующей силы, изменять форму импульса.

Таким образом, показали, что центробежные стенды, применяемые ранее для испытания на ударные воздействия малогабаритных изделий, можно приспособить для испытания габаритных объектов на импульсное воздействие.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Мигиренко Г.С. и др. Ударные стенды для испытания малогабаритных изделий. – Иркутск: Изд-во Иркут. Ун-та, 1987. -216 с.

2. Атапин В.Г., Родионов А.И., Рыков А.А. и др. Стенды и устройства для испытаний материалов и специзделий на ударные прочность и устойчивость // Науч. вестн. НГТУ.- Новосибирск: Из-во НГТУ, 2009. - №3(36). –С. 87-98.

3. А.С. 836544 (СССР). Копер для ударных испытаний изделий /П.М. Алабужев, В.Ф. Хон, И.И. Гернер, Л.И. Ким, А.А. Рыков, Ю.К. Лауткин.- Опубл. в Б.И., 1981, №21.