

К ВЫБОРУ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РОТАЦИОННО-МАЯТНИКОВОГО УДАРНОГО МЕХАНИЗМА

Еремянц В.Э.

Институт машиноведения и автоматики Национальной академии наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызская Республика

Ключевые слова: ротационно-маятниковый ударный механизм, выбор рациональных параметров, минимизация динамических нагрузок на ротор, наибольшая скорость и частота ударов.

Аннотация. Рассмотрена динамика ротационно-маятникового ударного механизма, с целью определения его рациональных параметров, обеспечивающих минимизацию динамических нагрузок на ротор механизма при обеспечении наибольших выходных параметров – скорости и частоты ударов. Показано, что одним из важных параметров, обеспечивающих решение поставленной задачи, является коэффициент k , равный отношению расстояния от оси ротора до оси маятника к длине маятника, а также количество и расположение маятников на роторе. Установлено, что при принятом допущении о равномерном вращении ротора наилучшим вариантом является расположение на роторе трех маятников под углом 120 градусов друг к другу при отношении длин звеньев k равном 2,5. В этом случае обеспечивается наибольшая скорость и частота ударов бойком по наковальне с испытываемым образцом.

TO THE CHOICE OF RATIONAL PARAMETERS ROTATIONAL-PENDULUM IMPACT MECHANISM

Eremyants V.E.

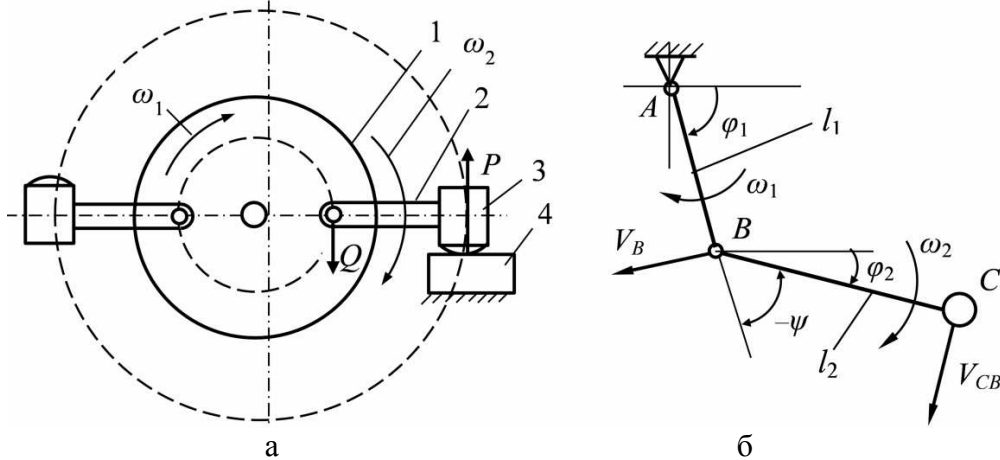
Institute of Mechanical Engineering and Automation of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic

Keywords: rotary-pendulum percussion mechanism, choice of rational parameters, minimization of dynamic loads on the rotor, maximum speed and frequency of impacts.

Abstract. The dynamics of a rotary pendulum impact mechanism is considered in order to determine its rational parameters that ensure the minimization of dynamic loads on the rotor of the mechanism while providing the highest output parameters – the speed and frequency of impacts. It is shown that one of the important parameters that ensure the solution of the problem is the coefficient k , equal to the ratio of the distance from the rotor axis to the pendulum axis to the length of the pendulum, as well as the number and location of the pendulums on the rotor. It has been established that under the assumption of uniform rotation of the rotor, the best option is to place three pendulums on the rotor at an angle of 120 degrees to each other with a link length ratio k equal to 2.5. In this case, for a given angular velocity of the rotor, the highest speed and frequency of impacts by the striker on the anvil with the test sample are provided.

Ротационно-маятниковые ударные механизмы на протяжении многих лет использовались для исследования влияния ударно-циклических нагрузок на свойства материалов, ударного и ударно-абразивного износа деталей горных, строительных и транспортных машин [1-3]. Эти механизмы состоят из ротора 1 (рис. 1) на котором крепятся маятники 2 с ударной массой 3 (бойком) на их конце. Количество маятников может быть различным – от

двух до четырех. Несмотря на давнее применение таких механизмов, их теория была развита недостаточно, что затрудняло выбор их рациональных параметров, удовлетворяющих заданным требованиям.



1 – ротор, 2 – маятник, 3 – боек, 4 – наковальня

Рис. 1. Конструктивная (а) и расчетная (б) схемы ротационно-маятникового ударного механизма

В связи с этим в Институте машиноведения и автоматики Национальной академии наук Кыргызской Республики были начаты работы по изучению кинематики и динамики таких механизмов с целью выявления их основных закономерностей, позволяющих научно-обосновано подходить к выбору их рациональных параметров.

При этом априори принималось, что основным требованием при выборе рациональных параметров механизма является обеспечение равномерного вращения его ротора. При этом снижаются динамические нагрузки в самом механизме, и обеспечивается его установившийся режим работы. С учетом этого в работе [4] при допущении о постоянстве скорости вращения ротора было получено следующее уравнение движения механизма

$$\ddot{\psi} + \dot{\psi}^2 q \sin \psi + b \sin \psi = 0, \tag{1}$$

где ψ – угол поворота маятника относительно ротора, рад; $\psi = \varphi_2 - \varphi_1$; φ_1, φ_2 – углы поворота соответственно ротора и маятника относительно горизонтальной координатной оси (рис.1, б):

$$q = \left(\frac{k(k^2 + 1 + 2k \cos \psi)}{1 + \xi(k^2 + 1 + 2k \cos \psi)} \right); \quad b = \frac{\xi \omega_1^2 k(k^2 + 1 + 2k \cos \psi)}{1 + \xi(k^2 + 1 + 2k \cos \psi)}, \tag{2}$$

$$k = l_1 / l_2; \quad \xi = 2m_2 l_2^2 / J_{2C}, \tag{3}$$

где J_{2C} – момент инерции ударной массы (бойка) относительно её центра масс, кгм².

Наибольшее влияние на неравномерность хода ротора оказывают ударные реакции в опоре маятника, при ударе бойком по наковальне. В зависимости от параметров маятника они могут быть сравнимы с ударной

силой, возникающей в контакте бойка с наковальней и достигать нескольких десятков, а то и сотен килоньютон.

В соответствии с положениями теоретической механики для того, чтобы ударные реакции в шарнире маятника с ротором были равны нулю необходимо выполнение условия [5]:

$$l_2 = J_{2C} / ml_C, \quad (4)$$

где l_2 , l_C – соответственно расстояние от оси маятника до линии удара и до центра тяжести маятника с бойком, м; m – масса маятника с бойком, кг; J_{2C} – момент инерции маятника с бойком, относительно их центра масс, кгм².

Отсюда следует, что выбор параметров ротационно-маятникового механизма необходимо проводить с определения длины маятника, удовлетворяющего условию (4). Пример достижения этого условия методом последовательных приближений приведен в работе [6].

Вторым условием обеспечения равномерного или близкого к нему вращения ротора является минимизация инерционных сил, действующих на ротор. Силы инерции, связаны с нормальными и тангенциальными ускорениями, возникающими при движении маятников, которые можно определить, используя следующие решения уравнения движения (1):

$$\dot{\psi} = \mp \sqrt{(\dot{\psi}_0^2 + \xi \omega_1^2) e^{-2q(1-\cos\psi)} - \xi \omega_1^2}; \quad (5)$$

$$\ddot{\psi} = -q \sin \psi (\dot{\psi}_0^2 + \xi \omega_1^2) e^{-2q(1-\cos\psi)}. \quad (6)$$

Эта задача решалась в работе [7], где было показано, что при симметричном расположении двух или четырех маятников на роторе силы инерции, действующие на ротор со стороны маятников, уравновешивают друг друга.

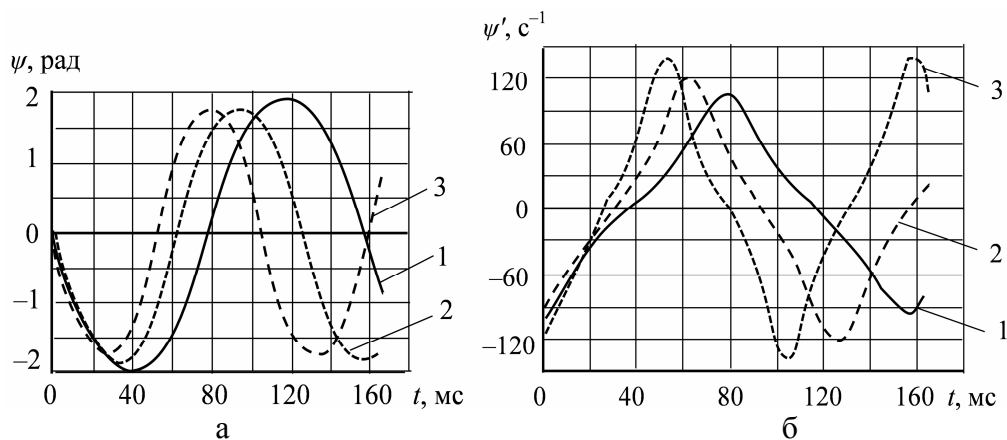
Одной из задач выбора рациональных параметров ротационно-маятникового ударного механизма является обеспечение того, чтобы при вращении ротора скорость удара бойком по наковальне и частота ударов были по возможности наибольшими.

Исследования, проведенные в работе [4], показали, что при коэффициенте восстановления скорости бойка после удара равным нулю сразу после первого удара бойком по наковальне возникает установившийся режим движения механизма с начальными условиями после каждого удара:

$$\psi(0) = 0; \quad \dot{\psi}(0) = -\omega_1(k+1). \quad (7)$$

Из формулы (5) следует, что относительная скорость маятника наибольшая при выполнении условия $\psi = 0$, когда точки A , B , C механизма расположены на одной линии. Назовем это положение «раскрытием маятника».

На рис. 2 а видно, что в зависимости от коэффициента k за один оборот ротора ($T = 0,157$ с) возможно несколько особых положений маятника, когда параметр ψ равен нулю. При этом в каждом последующем случае знак относительной скорости маятника, согласно формуле (5) меняется на противоположный (рис. 2, б).



1 – $k = 1,5$; 2 – $k = 2,0$; 3 – $k = 2,5$. $\omega_1 = 40 \text{ c}^{-1}$, $T = 0,157 \text{ c}$

Рис. 2. Графики зависимости угла поворота (а) и скорости маятника (б) относительно ротора от времени для одного оборота ротора [4]

Линейная скорость бойка при раскрытии маятника определится как:

$$V_{\sigma} = \omega_1 l_1 \pm \omega_2 l_2.$$

Знак плюс в этой формуле соответствует случаю, когда угловые скорости ротора и маятника совпадают по направлению, а минус – когда они направлены в противоположные стороны.

Учитывая, что

$$\omega_2 = \dot{\psi} + \omega_1 = \omega_1 (k + 2);,$$

для нечетных номеров полупериодов колебания маятника ($i = 1, 3, 5$) (рис. 2) получим:

$$V_{\sigma} = 2\omega_1 l_2 (k + 1);$$

для четных полупериодов ($i = 2, 4, 6 \dots$):

$$V_{\sigma} = 0.$$

В качестве примера в таблице 1 представлены углы поворота ротора φ_1 , соответствующие условию $\psi = 0$, при угловой скорости ротора ω_1 равной 40 c^{-1} и различных значениях коэффициента k . Там же указана скорость бойка V_{σ} для различных полупериодов i колебаний маятника и частота ударов f за один оборот ротора.

Табл. 1. К определению рациональных параметров ротационно-маятникового ударного механизма

| k | 1,5 | | | 2,0 | | | 2,5 | | |
|------------------------------|-----|------|-----|-----|------|-----|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| φ_1 , град | 180 | 360 | 540 | 143 | 286 | 536 | 120 | 240 | 360 |
| $d\psi/dt$, c^{-1} | 100 | -100 | 100 | 120 | -120 | 120 | 140 | -140 | 140 |
| ω_2 , c^{-1} | 140 | -60 | 140 | 160 | -80 | 160 | 180 | -100 | 180 |
| V_{σ} , м/с | 12 | 0 | 12 | 7,2 | 0 | 7,2 | 16,8 | 0 | 16,8 |
| f , Гц | 0 | | | 6,4 | | | 12,8 | | |

Из этой таблицы следует, что при k равном 1,5 при одном обороте ротора существует два положения, когда $\psi = 0$: при φ_1 равном 180° и 360° . В первом положении угловая скорость маятника положительная, а во втором равна нулю. Это означает, что удара по наковальне не будет и маятник продолжит движение с той же начальной относительной скоростью, что и после первого удара. Далее цикл движения этого бойка повторится.

Скорость второго маятника сдвинута по фазе на половину оборота ротора. Начальные условия для его движения из этого положения:

$$\psi(T/2) = 0; \quad \dot{\psi}(T/2) = +\omega_1(k+1).$$

Поэтому он также подойдет к наковальне с нулевой скоростью и также как и первый боек проскочит наковальню без удара.

Отсюда следует парадоксальный вывод, что при наличии двух маятников с бойками, симметрично расположенными на роторе (рис. 1, а), бойки не будут наносить удары по наковальне. Хотя при этом будет реализован установившийся режим движения механизма. Это может быть следствием принятых допущений. В действительности при неравномерном вращении ротора и при учете сил трения в кинематической паре ротора и маятника картина будет несколько иной, но скорость соударения бойков с наковальней определённо будет меньше максимальной.

При коэффициенте k равном 2,0, раскрытие маятника происходит в точках, не совпадающих с полупериодами его колебаний. При этом, как следует из рисунка 2, б (кривая 2), в конце полного оборота ротора на 360 градусов относительная скорость маятника $d\psi/dt$, близка к нулю. При этом маятник движется с такой же угловой скоростью, как и ротор и в конце оборота ротора скорость бойка составит:

$$V_y = \omega_1(l_1 + l_2) = \omega_1 l_2(k+1).$$

При принятых исходных данных: $\omega_1 = 40 \text{ с}^{-1}$, $l_2 = 0,06 \text{ м}$ она равна $7,2 \text{ м/с}$., то есть меньше максимально возможной скорости удара.

При коэффициенте k равном 2,5 за один оборот ротора существует три положения, когда $\psi = 0$: при φ_1 равном 120° , 240° и 360° . В первом положении после удара угловая скорость маятника 1 положительная (рис. 2, б), во втором – отрицательная, а в третьем снова положительная. Это означает, что за один оборот ротора будет нанесено два удара по наковальне с максимальной скоростью, первым и третьим бойком. Второй боек наносить удары не будет, поскольку при подходе к наковальне он имеет отрицательную скорость. Но он необходим для уравнивания сил инерции, действующих на ротор [4]. Следует отметить, что именно такой механизм с тремя бойками использовался в работе [2].

Проведенный анализ показал, что при принятых допущениях наилучшим вариантом выбора параметров ротационно-маятникового ударного механизма является такой, при котором на роторе располагаются три маятника под углом 120° относительно друг друга. Выбор длины маятника l_2 производится по условию (4), а расстояние от оси ротора до оси

маятника l_1 должно быть равно $2,5l_2$. В этом случае обеспечивается наибольшая скорость удара бойком по наковальне и наибольшая частота ударов при минимальных динамических нагрузках на ротор механизма.

Список литературы

1. Сорокин Г.М., Полянская Т.А. Машина для изучения ударно-усталостного износа // Заводская лаборатория. 1970. №5. С. 10-13.
2. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Албагачиев А.Ю. Изнашивание при ударе. – М.: Машиностроение, 1982. – 192 с.
3. Мигиренко Г.С., Евграфов В.Н., Рыков А.А., Хон В.Ф. Ударные стенды для испытания малогабаритных изделий. – Иркутск: Изд-во Иркутского ун-та, 1987. – 216 с.
4. Еремьянц В.Э., Усубалиев Ж., Кынатбекова Н.Н. Динамическая модель ротационного маятника в поле инерционных сил // Современные проблемы теории машин. 2021. №11. С. 20-25.
5. Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики. В 2-х томах. Т. 2. Динамика. – М.: Наука. Главная редакция физ-мат литературы, 1983. – 640 с.
6. Еремьянц В.Э., Колесников Н.А. Динамика коромысловых ударных систем. – Москва: РУСАЙНС, 2021. – 106 с.
7. Еремьянц В.Э., Кынатбекова Оценка сил сопротивления движению ротационно-маятникового ударного механизма // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 14. – С. 7-14.

References

1. Sorokin G.M., Polyanskaya T.A. Machine for studying impact fatigue wear // Factory laboratory. 1970. No. 5. P. 10-13.
2. Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Albagachiev A.Yu. Impact wear. – M.: Mechanical Engineering, 1982. – 192 p.
3. Migirenko G.S., Evgrafov V.N., Rykov A.A., Khon V.F. Impact stands for testing small-sized products. – Irkutsk: Publ. house of Irkutsk University, 1987. – 216 p.
4. Eremyants V.E., Usubaliev Zh., Kynatbekova N.N. Dynamic model of a rotary pendulum in the field of inertial forces // Modern problems of the theory of machines. 2021. No. 11. P. 20-25.
5. Loitsyansky L.G., Lurie A.I. Course of theoretical mechanics. In 2 volumes. Vol. 2. Dynamics. – M.: Science. The main edition of physical and mathematical literature, 1983. – 640 p.
6. Eremyants V.E., Kolesnikov N.A. Dynamics of rocker shock systems. – Moscow: RUSSIGNS, 2021. – 106 p.
7. Eremyants V.E., Kynatbekova N.N. Evaluation of the forces of resistance to the movement of a rotational-pendulum impact mechanism // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2022. No. 14. P. 7-14.

| | |
|--|--|
| <p>Еремьянц Виктор Эдуардович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник</p> | <p>Eremyants Viktor Eduardovich – doctor of technical sciences, professor, chief researcher</p> |
| <p>eremjants@inbox.ru</p> | |

Received 23.05.2022