

К ТЕОРИИ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКИХ МАШИН УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

П. М. АЛАБУЖЕВ

В данной статье рассмотрены некоторые вопросы теории и расчета электропневматических машин ударного действия на примере молотка с односторонней воздушной связью (рис. 1).

Характеристиками рабочего процесса могут служить графики, представленные на рис. 2, 3, 4 и 5. На рис. 2 за период цикла T изображены графики изменения угловой скорости ω , путь поршня s_n , путь бойка s_b , скорость бойка v_b , давление воздуха p между бойком и поршнем и значение энергии бойка E ; на рис. 3 показан баланс энергии электропневматического молотка в одном из лучших режимов при испытаниях его на стенде [5]. Характеристики воздушной связи изображены на рис. 5. На рис. 4а показано изменение за цикл скорости бойка в зависимости от пути бойка. Так называемый предельный цикл на фазовой плоскости s_b, v_b устанавливается после 4—5 ударов бойка. Предельный цикл в безразмерных координатах $\frac{v_b}{R\omega}$ и $\frac{s_b}{l_0}$ показан на рис. 4б.

Каждая точка фазовой плоскости соответствует определенному состоянию колеблющейся системы. „Фазовый портрет“ поведения системы позволяет сразу охватить всевозможные состояния системы [7].

Зависимость $v_b = f(s_b)$ определяет на фазовой плоскости все особенности движения системы, так как на основании предельного цикла можно получить:

а) характер переходного и установившегося режима машины;

б) период цикла установившейся работы;

в) коэффициент восстановления при ударе $e = \frac{v_{om}}{v_{yd}}$;

г) давление воздуха $p = p_0 - \frac{v_b}{k} \cdot \operatorname{tg} \psi$,

где

$$k = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{g}{Q_b}$$

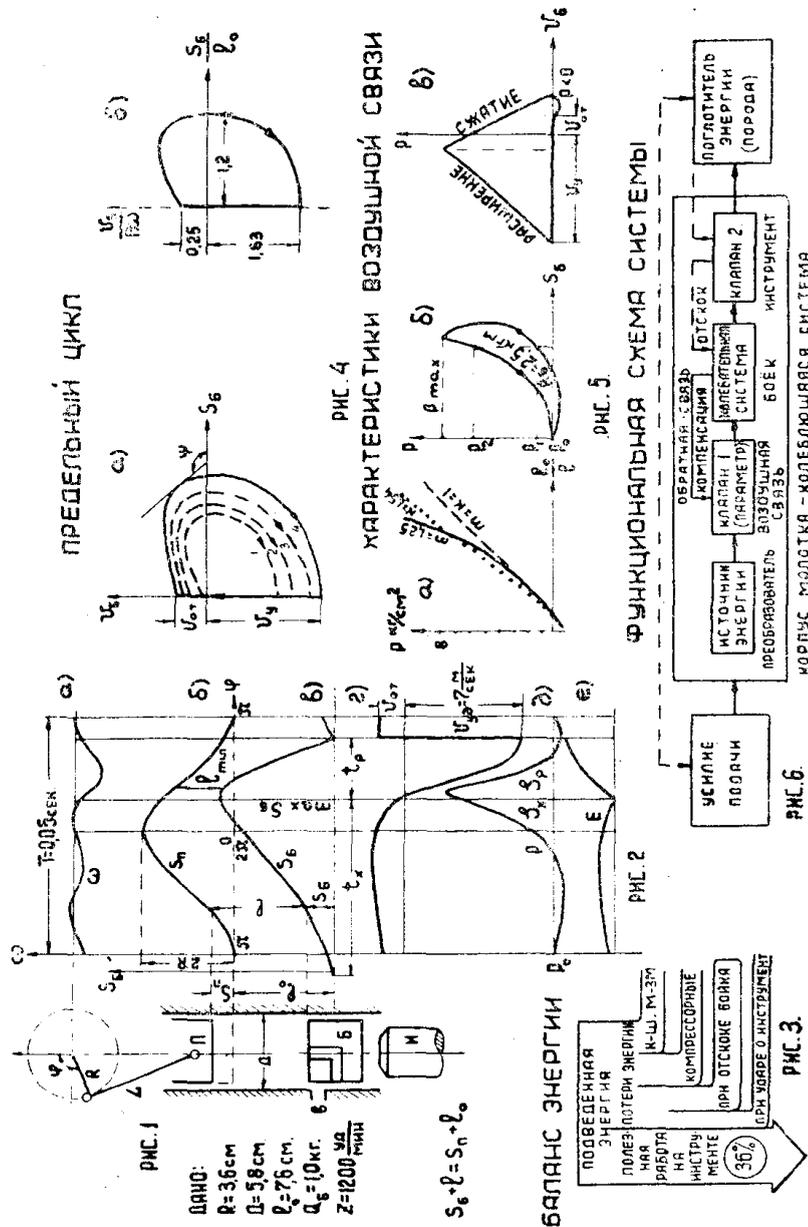
Интересно также изучение зависимости $v_n = f(s_n)$ как при холостом ходе машины, так и при рабочем ходе. Кривые $v_b = f(s_b)$ и $v_n = f(s_n)$ проще всего получить экспериментально, применением электрических датчиков и дифференцирующих цепей.

О том, что пневматические отбойные молотки являются автоколебательными системами, сказано в работе [9].

Функциональная схема системы: податчик—молоток—порода изображена на рис. 6.

С точки зрения автоколебательных систем электропневматические машины ударного действия (в отличие от пневматических машин) имеют следующие особенности:

1) эти машины являются преобразователями энергии с выраженными элементами автоколебаний (наличие падающей характеристики в кривой $p=f(v_0)$, предельного цикла, независимость рабочего цикла от начальных условий). Но в большинстве конструкций частота колебаний бойка определяется извне, так как у электропневматических молотков имеется сравнительно мощная система вращающихся частей, по отношению которой колебательное движение бойка имеет подчиненное значение;



2) обратная связь (действие вакуума, компенсация утечек воздуха, отскок бойка) преимущественно реактивного типа;

3) клапан 1 "открыт" при значении длины воздушной подушки $l = l_0$; клапан 2 "открыт" в момент удара;

4) в системе имеется жесткое возбуждение, так как молоток приводится в работу (или прекращает ее) при помощи выключателя.

Полагая угловую скорость электродвигателя постоянной, пренебрегая сопротивлениями трения при горизонтальном положении молотка, мы можем

записать уравнение движения бойка для машины ударного действия с односторонней воздушной связью в следующем виде:

$$\frac{Q_{\sigma}}{g} \cdot \frac{dv_{\sigma}}{dt} = - \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot (p - p_0) + F_y,$$

где F_y — сила реакции инструмента, действующая только в момент удара.

Применяя к решению энергетический метод [7], можно определить максимальный ход бойка

$$s_{\sigma \max} = \frac{1}{p_0} \cdot \int p_1 ds_{\sigma} - \frac{q}{p_0} \cdot \frac{v_{om}^2}{2g},$$

где p_1 — давление, отсчитываемое по кривой расширения воздуха рис. 5б.

Здесь q — вес бойка на единицу площади $q = \frac{4Q_{\sigma}}{\pi \cdot D^2}$.

При рабочем ходе

$$s_{\sigma \max} = \frac{1}{p_0} \cdot \int p_2 ds_{\sigma} - \frac{q}{p_0} \cdot \frac{v_{y\sigma}^2}{2g},$$

где p_2 — давление, отсчитываемое по кривой сжатия воздуха, рис. 5б.

Нетрудно показать, что в установившемся рабочем режиме машины работа A_n , поглощенная инструментом, равна энергии бойка A_{σ} , накопленной им от воздушной подушки за время цикла T и

$$A_n = A_{\sigma} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \int (p_2 - p_1) ds_{\sigma}.$$

Применяя к решению уравнения движения бойка теорему импульсов и имея в виду, что максимальный ход бойка имеет одно и то же значение как при холостом ходе, так и рабочем ходе, нетрудно установить следующее соотношение:

$$e = \frac{v_{om}}{v_{o\sigma}} = \frac{t_p}{t_x}.$$

Более точное значение в распределении времени цикла $T = t_x + t_p$ на части, соответствующие времени холостого хода t_x и времени рабочего хода t_p , можно получить с учетом влияния формы импульса на движение массы бойка [8].

Опытные данные [3,5] подтверждают наличие отмеченного соотношения

$e = \frac{t_p}{t_x}$, с погрешностью порядка $\approx 10\%$. Отсюда ясно влияние материала,

поглощающего энергию при ударе, на рабочий процесс машин ударного действия и на распределение времени цикла T .

Из проведенных нами экспериментальных исследований [5] установлено, что в режиме ударной нагрузки зависимость давления воздуха p от степени

сжатия $\frac{l_0}{l}$ почти линейная; кроме того, среднее значение показателя полит-

ропы за цикл можно считать $m_{cp} = 1,25$.

Линеаризуя уравнение политропы, рис. 5а, получим:

$$p = p_0 \left[k \left(\frac{l_0}{l} - 1 \right) + 1 \right],$$

где k определяется, согласно [6] из условия

$$-\frac{d}{dk} \int_{y_1}^{y_2} \left[y^m - k(y-1) - 1 \right]^2 dy = 0.$$

Здесь: $y = \frac{l_0}{l}$; при $m = 1,25$ и $y = 0,5 \div 5,0$; $k = 1,54$.

Из рис. 1 видно, что $s_\delta + l = l_0 + s_\pi$; при $\lambda = \frac{R}{L} = 0$, $s_\pi = R(1 + \cos\varphi)$,

где $\varphi = \omega t$;
тогда

$$\begin{aligned} \frac{ds_\delta}{dt} + \frac{dl}{dt} &= \frac{ds_\pi}{dt} = -R\omega \sin\varphi; \\ \frac{d^2s_\delta}{dt^2} + \frac{d^2l}{dt^2} &= \frac{d^2s_\pi}{dt^2} = -R\omega^2 \cos\varphi. \end{aligned}$$

Уравнение движения бойка будет:

$$\frac{Q_6}{g} \cdot \frac{d^2s_\delta}{dt^2} = -\frac{\pi \cdot D^2}{4} (p - p_0) = -\frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot p_0 \cdot k \left(\frac{l_0}{l} - 1 \right).$$

Обозначая $\frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{gkp_0}{Q_6} = h$, получим:

$$\frac{d^2l}{dt^2} - h \left(\frac{l_0}{l} - 1 \right) = -R\omega^2 \cdot \cos\omega t$$

нелинейное и неоднородное уравнение воздушной связи бойка с поршнем.

Полагая решением: $l = l_0 + r \cos \nu$, где $\nu = \omega t - \delta$ (здесь r и δ медленно меняющиеся функции с течением времени), в первом приближении будем иметь:

$$\frac{dl}{dt} \approx -r\omega \sin \nu \quad \text{и} \quad \frac{d^2l}{dt^2} \approx -r\omega^2 \cdot \cos \nu.$$

После замены получим:

$$\begin{aligned} -r\omega^2 \cdot \cos \nu + h \cdot \frac{\cos \nu}{l_0 + r \cos \nu} \cdot \frac{\sin \nu}{\sin \nu} &= \\ &= -R\omega^2 \cdot (\cos \nu \cdot \cos \delta - \sin \nu \cdot \sin \delta), \end{aligned}$$

откуда

$$\sin \delta = \frac{hr \operatorname{ctg} \nu}{R\omega^2 l}; \quad \cos \delta = \frac{r}{R}; \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{h \cdot \operatorname{ctg} \nu}{\omega^2 \cdot l}.$$

Из условия $\sin^2 \nu + \cos^2 \nu = 1$, получим

$$r^4 + ar^3 + br^2 + cr + d = 0,$$

где

$$\begin{aligned} a &= \frac{2l_0}{\cos \nu}; \quad b = \frac{l^2}{\cos \nu} + \frac{h^2}{\omega^4 \cdot \sin^2 \nu} - R^2; \\ c &= \frac{2R^2 \cdot l_0}{\cos \nu}; \quad d = -\frac{l_0^2 \cdot R^2}{\cos^2 \nu}. \end{aligned}$$

Порядок решения задачи алгебраическим методом:

- 1) при известных параметрах $R, l_0, Q_0, k, D, \omega$ задаемся ν и находим коэффициенты a, b, c, d ;
- 2) решая уравнение четвертой степени, определяем r ;
- 3) находим угол сдвига фаз $-\delta$;
- 4) определяем угол поворота кривошипа $\varphi = \omega t = \nu + \delta$;
- 5) вычисляем путь поршня $s_n = R(1 + \cos \varphi)$;
- 6) определяем путь бойка $s_0 = l_0 + s_n - l$;
- 7) находим для данного положения механизма давление воздуха

$$p = p_0 \left[k \left(\frac{l_0}{l} - 1 \right) + 1 \right].$$

Примечание: $\varphi_{y0} = \nu + \delta = \pi$ и $s_0 = s_n = 0$, если $\text{tg}^2 \nu = \frac{h}{\omega^2 l_0} = 1$, то есть комплекс величин $\frac{\pi D^2 g k p_0}{4 \cdot Q_0 \cdot \omega^2 l_0}$ равен единице.

При малых значениях l_0, Q_0 и ω имеем колебания бойка на упругой (воздушной) связи под действием воздушной подушки, возмущаемой поршнем. Удара бойка по инструменту может и не быть, если избыточное среднее давление воздуха в воздушной подушке за цикла работы молотка равно нулю.

В работе [10] приводится численный пример решения задачи алгебраическим методом. Несмотря на громоздкость решения и ограниченность применения, этот метод открывает возможность аналитического решения задачи, выбора оптимальных параметров машины ударного действия и исследования устойчивости движения.

В работах [1,4] нами показана возможность применения к исследованию рабочего процесса молотка численных и графических методов расчета.

В заключение покажем возможность выбора параметров машины ударного действия на основе теории подобия [2].

Пусть в качестве хорошо работающей машины является молоток с параметрами: $R = 39$ мм, $l_0 = 58$ мм, $Q = 1,65$ кг, $n = z = 1400$ уд/мин, $N = 4,95$ квт, $D = 68$ мм и $A_0 = 7$ кг м. Предположим, что нас интересует новая машина с числом ударов $Z_1 = 1100$ уд/мин, при весе бойка $Q_1 = 3$ кг и работе на бойке $A_1 = 10$ кг м.

Тогда на основании теории динамического подобия определяем масштабные коэффициенты: отношение времен совершающихся процессов

$$t_c = \frac{t}{t_1} = \frac{z_1}{z} = \frac{1100}{1400} = 0,785;$$

отношение масс

$$m_c = \frac{m}{m_1} = \frac{Q}{Q_1} = \frac{1,65}{3} = 0,55;$$

отношение работ

$$A_c = \frac{A}{A_1} = \frac{7}{10} = m_c \cdot v_c^2.$$

Тогда линейный масштаб

$$l_c = v_c t_c = 1,13 \cdot 0,785 = 0,885.$$

Так как $l_c = \frac{l}{l_1} = \frac{R}{R_1} = \frac{D}{D_1}$, то новая длина воздушной подушки будет

$$l_1 = \frac{l}{l_c} = \frac{58}{0,885} = 65,5 \text{ мм, новый радиус кривошипа } R_1 = \frac{R}{l_c} = \\ = \frac{39}{0,885} = 44,3 \text{ мм; новый диаметр } D_1 = \frac{D}{l_c} = \frac{68}{0,885} = 77 \text{ мм.}$$

Отношение мощностей

$$N_c = \frac{N}{N_1} = m_c \frac{l_c^2}{t_c^3} = 0,55 \cdot \frac{0,885^2}{0,785^3} = 0,89.$$

Откуда мощность новой машины

$$N_1 = \frac{N}{N_c} = \frac{4,95}{0,89} = 5,55 \text{ квт.}$$

Для электропневматических машин с односторонней воздушной связью критерием подобия является выражение, справедливое при одинаковых условиях работы машины (отскок бойка, компенсация воздуха, зазоры и смазка)

$$\Pi = \frac{p_0 g D^2}{Q \omega^2 l_0} = idem \text{ (одно и то же) [2].}$$

В данном случае

$$\Pi = \frac{1.980 \cdot 6,8^2}{1,65 \cdot 146,5^2 \cdot 5,8} = \frac{1.980 \cdot 7,7^2}{3.116^2 \cdot 6,55} = 0,22.$$

Если для взятой машины мы изменим только число оборотов, полагая вредные сопротивления прежними, то есть возьмем новый режим по времени, сохраняя линейные размеры прежними, то $l_c = 1$; $m_c = 1$.

Отношение сил

$$F_c = m_c \frac{l_c}{t_c^2} = 1 \cdot \frac{1}{t_c^2} = n_c^2.$$

Отношение работ

$$A_c = F_c \cdot l_c = n_c^2.$$

Отношение мощностей

$$N_c = m_c \cdot \frac{l_c^2}{t_c^3} = 1 \cdot \frac{1}{t_c^3} = n_c^3.$$

Пусть, например, $n_1 = z_1 = 700$ уд/мин, тогда

$$n_c = \frac{n}{n_1} = \frac{1400}{700} = 2; F_c = n_c^2 = 2^2 = 4;$$

$$A_c = \frac{A}{A_1} = n_c^2 = 2^2 = 4 \text{ и } A_1 = \frac{A}{A_c} = \frac{7}{4} = 1,75 \text{ кэ.м.}$$

$$N_c = \frac{N}{N_1} = n_c^3 = 2^3 \text{ и мощность новой машины}$$

$$N_1 = \frac{N}{2^3} = \frac{4,95}{8} = 0,64 \text{ квт.}$$

Из уравнения движения вала кривошипа [2]

$$I \cdot \varepsilon = M_k + M_p - \frac{\omega^2}{2} \cdot \frac{dl}{d\varphi}$$

следует, что между коэффициентами для моментов сил M , действующих в подобных системах, существуют соотношения:

$$M_c = \frac{M}{M_1} = I_c \cdot \varepsilon_c = m_c \cdot \frac{l_c^2}{t_c^2} = \rho_{oc} \cdot l_c^3 = \omega_c^2 \cdot \frac{Q_c}{g_c} \cdot l_c^2 = \omega_c^2 \cdot J_c,$$

которые могут быть использованы для нахождения характеристик подобных электродвигателей, работающих в режимах ударных нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алабужев П. М. Исследование рабочего процесса электроотбойного молотка с упругой (воздушной) связью. Известия ТПИ, т. 61, вып. 1, 1947.
2. Алабужев П. М. Применение теории подобия и размерностей к исследованию (моделированию) машин ударного действия. Известия ТПИ, т. 73, 1952.
3. Алабужев П. М., Медлина Е. К., Невструев Е. Н. К методике исследования индикаторных диаграмм электропневматических машин ударного действия. Известия ТПИ, т. 76, 1953.
4. Алабужев П. М. Применение графоаналитического метода расчета к исследованию рабочего процесса электропневматического молотка. Известия ТПИ, т. 75, 1954.
5. Алабужев П. М. Некоторые итоги экспериментального исследования электропневматических машин ударного действия. Известия ТПИ, т. 78, 1954.
6. Пановко Я. Г. Действие периодических ударов на нелинейную упругую систему с одной степенью свободы. Труды института физики, т. V, АН СССР, Рига.
7. Стрелков С. Б. Введение в теорию колебаний, ГИТТЛ, М.-Л., 1950.
8. Суднишников Б. В. Некоторые вопросы теории машин ударного действия, ЗСФАН, Новосибирск, 1949.
9. Харкевич А. А. Автоколебания, ГИТТЛ, М, 1953.
10. Алабужев П. М. Исследование рабочего процесса электропневматических машин ударного действия. (Диссертация), ТПИ, 1954.