

ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА РАСЧЕТА К ИССЛЕДОВАНИЮ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКИХ МАШИН УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

П. М. АЛАБУЖЕВ

Рабочий процесс электропневматического молотка описывается двумя нелинейными дифференциальными уравнениями второго порядка с переменными коэффициентами: уравнением движения бойка

$$\frac{Q_6}{g} \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot (p - p_0), \quad (1)$$

уравнением движения электродвигателя

$$d \left(J \frac{\omega^2}{2} \right) = (M_k + M_p) \cdot d\varphi = dE, \quad (2)$$

где обозначено:

Q_6 — вес бойка;

g — ускорение свободного падения;

x — перемещение бойка;

D — диаметр цилиндра молотка;

p — давление воздуха между бойком и поршнем, которое принято

изменяющимся по закону $p = p_0 \left(\frac{l_0}{l} \right)^m$, где m — показатель по-

литропы, а l — расстояние между бойком и поршнем,

$J = J_0 + m_n r^2 \left(\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \cdot \sin 2 \varphi \right)$ — значение приведенного момента

инерции к валу кривошипа радиуса r (здесь $J_0 = \text{const}$ и $\lambda = \frac{r}{L}$, где L — длина шатуна);

$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ — угловая скорость вала кривошипа;

$M_k = f(\omega)$ — заданная графически характеристика электродвигателя;

$M_p = (p - p_0) \cdot r \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \left(\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \cdot \sin 2 \varphi \right)$ — момент сил воздушного

давления (M_p может иметь положительное значение, отрицательное и ноль);

E — кинетическая энергия системы: электродвигатель, редуктор, кривошипно-шатунный механизм, поршень.

Уравнения (1) и (2) составлены в предположении, что положение молотка горизонтальное, количество воздуха между бойком и поршнем неизменно и силы сопротивления незначительны.

Решение уравнений (1) и (2) дано в работе [1] методом численного интегрирования, позволяющим выполнить расчет с любой заданной степенью точности. К числу недостатков этого метода следует отнести его значительную громоздкость и необходимость затраты сравнительно большого количества времени на выполнение расчета; кроме того, необходимо построение ряда графиков, дающих конструктору представление о рабочем процессе машины, так как „Закономерность всякого процесса лучше всего обнаруживается при графическом изображении“ [5, 133].

Экспериментальное исследование рабочего процесса электропневматического молотка, выполненное нами [2], подтвердило правильность выводов, сделанных в работе [1], и дало более ясную картину работы воздушной связи (в частности, экспериментально было получено среднее значение показателя политропы за цикл: $m_{cp}=1,23$ и к.п.д. воздушной подушки порядка $\approx 86\%$).

Элементарное графическое решение некоторых динамических задач применительно к расчету электромолотков было дано в работе [9] для случая, когда $\omega = \text{const}$. Работы [10; 7; 4; 3] в известной мере дали толчок и направили мысль о применении графоаналитического метода расчета к исследованию рабочего процесса машин ударного действия. К сожалению, графоаналитические методы, развитые в работах [3, 4], нельзя применить к решению нашей задачи, так как заранее неизвестно изменение давления воздуха $p=p_0 \left(\frac{l_0}{l}\right)^m$ в зависимости от времени. Попытка задаться значением

функциональной связи $p=p(t)$ приводит к проверке ряда предварительных предположений не всегда, однако, возможных в реальном осуществлении. Вид функции $p=p(t)$ зависит от типа конструкции молотка, его параметров, режима работы и находится в процессе решения конкретной задачи.

В работах [3; 4] рассмотрен весьма важный вопрос о погрешности графоаналитического метода, причем показывается, что шаговая погрешность имеет порядок $-(\Delta t)^3$, а результирующая погрешность—порядка $(\Delta t)^2$, где Δt —шаг интегрирования (в нашем случае шаг интегрирования по углу поворота кривошипа обозначен через $\Delta\varphi$). В работе [3] показывается, что при одном и том же шаге интегрирования шаговая погрешность по методу средних ординат является наименьшей по сравнению с методами касательной и секущей¹⁾.

При расчете мы применяем метод средних величин, являющийся по существу методом численного решения, предложенным в работе [10]. „Взяв промежутки Δt достаточно малыми и проделав вычисления для каждого значения t дважды, чтобы получить вторую степень приближения, мы можем этим способом численного интегрирования получить всегда точность, достаточную для практических применений“ [10, 85].

В настоящее время отсутствуют методы получения общего решения уравнений типа (1) и (2), поэтому прежде нужно выбрать параметры машины ударного действия; к числу исходных параметров (в зависимости от назначения машины) в первую очередь относятся—энергия удара $Aб$, число ударов z , усилие подачи P и угол α поворота бура между ударами бойка. По этим исходным данным в первом приближении выбираются параметры ударного узла (l_0 , D , Q_0 , r). Зная мощность мотора и его характеристику $M_k=f(\omega)$, можно графоаналитическим методом выполнить уточняющий

¹⁾ Метод средних ординат при одинаковой Δt точнее метода секущей в два раза, а методы касательной—в 12 раз [3].

расчет с учетом взаимодействия бойка и электродвигателя за цикл работы машины.

При наличии продуманной схемы расположения материала, вспомогательных таблиц (графиков) и шаблонов можно довольно быстро получить представление о рабочем процессе машины и ее показателях. К числу достоинств графоаналитического метода нужно отнести:

1) наглядность решения; по существу, наряду с решением, сразу же получается изображение (график) изменения рабочего процесса машины и ее характеристик;

2) наличие хорошего контроля, так как ошибки расчета сразу же вскрываются в процессе работы;

3) эффективность метода при достаточной для практики точности расчета; применение метода не ограничивается числом членов уравнения и характером изменения отдельных величин в течение цикла работы машины (возможность учета изменения угловой скорости ω , показателя политропы — m , утечек воздуха, явления удара и отскока бойка и т. д.);

4) относительная легкость замены шага интегрирования в зависимости от характера изменения величин (φ , ω , x);

5) выполнение расчета графоаналитическим методом не требует высокой квалификации исполнителя и доступно широкому кругу инженерно-технических работников и изобретателей.

Поясним порядок выполнения расчета на примере молотка схемы ЗЭРТ, известной в литературе и описанной достаточно подробно в работах [1; 2]. Изложенный ниже метод расчета нами применялся для исследования и других конструкций молотков и перфораторов.

Прежде всего строим на одном листе миллиметровой бумаги графики следующих функций:

1) график пути поршня $s = r \cdot \left[\left(1 + \frac{\lambda}{4} \right) - \left(\cos \varphi + \frac{\lambda}{4} \cos 2\varphi \right) \right]$ и график скорости поршня $v_n = \frac{ds}{dt} = r \cdot \omega \cdot \left(\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right)$ в функции угла поворота вала кривошипа φ ;

2) значение момента инерции J ;

3) коэффициент $K = \frac{\pi D^2}{4} \cdot r \cdot \left(\sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right)$;

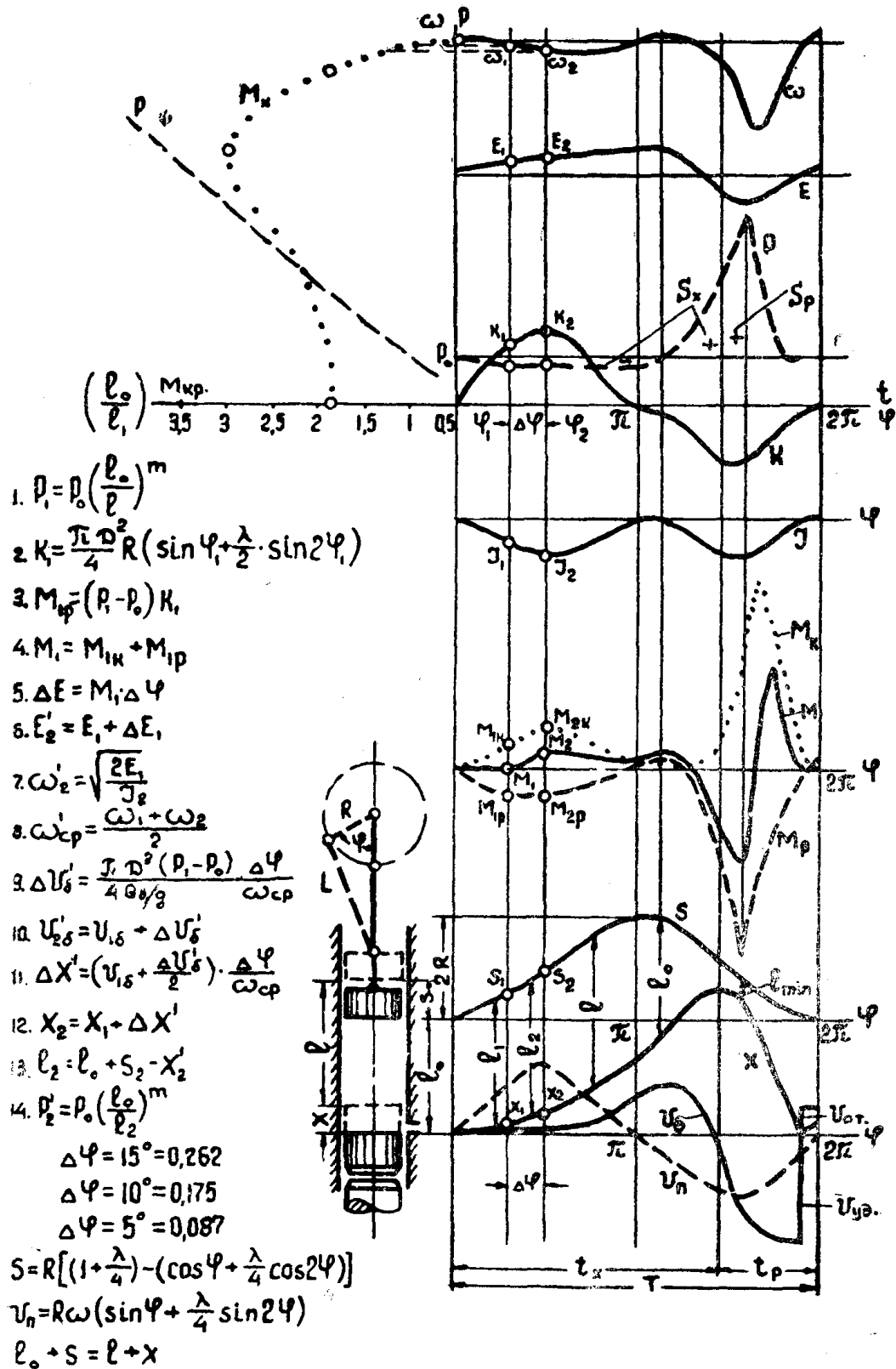
4) характеристику электродвигателя $M_k = f(\omega)$;

5) график изменения давления воздуха (политропа)

$$p = p_0 \left(\frac{l_0}{l} \right)^m.$$

Примерное расположение графиков и схемы расчета изображено на фиг. 1. В левом нижнем углу расчетного листа помещаем схему молотка и необходимые формулы. Шаг интегрирования $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ выбираем в соответствии с характером изменения величин, определяющих расчет (порядок $\Delta\varphi \approx 5^\circ \div 15^\circ$).

Покажем, как от угла поворота вала кривошипа — φ_1 , которому соответствуют значения величин $p_1, M_1, E_1, \omega_1, x_1$ перейти к углу φ_2 с нахождением значения тех же величин — $p_2, M_2, E_2, \omega_2, x_2$, имея уже построенные графики s, v_n, J, K, M_k, p .



Фиг. 1

Порядок расчета:

а) первое приближение (метод касательной)	б) второе приближение (индексом "с", помечены средние значения величин в интервале)
1) $p_1 = p_0 \left(\frac{l_0}{l_1} \right)^m$	15) $p_c = \frac{p_1 + p_2}{2}$
2) $K_1 = \frac{\pi D^2}{4} \cdot r \left(\sin \varphi_1 + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi_1 \right)$	16) $K_c = \frac{\pi D^2}{4} \cdot r \left(\sin \varphi_c + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi_c \right)$
3) $M_{1p} = (p_1 - p_0) \cdot K_1$	17) $(M_c)_p = (p_c - p_0) \cdot K_c$
4) $M_1 = M_{1k} + M_{1p}$	18) $M_c = (M_c)_p + (M_c)_k$
5) $\Delta E_1 = M_1 \cdot \Delta \varphi$	19) $\Delta E_c = M_c \cdot \Delta \varphi$
6) $E_2 = E_1 + \Delta E$	20) $E_2 = E_1 + \Delta E_c$
7) $\omega_2 = \sqrt{\frac{2E_2}{J_2}}$	21) $\omega_2 = \sqrt{\frac{2E_2}{J_2}}$
8) $\omega_c = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$	22) $\omega_c = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$
9) $\Delta v_1 = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{p_1 - p_0}{Q_0/g} \cdot \frac{\Delta \varphi}{\omega_1}$	23) $(\Delta v_c)_c = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{p_2 - p_0}{Q_0/g} \cdot \frac{\Delta \varphi}{\omega_c}$
10) $v_1 = v_{1c} + \Delta v_1$	24) $v_2 = v_{1c} + (\Delta v_c)_c$
11) $\Delta^1 x = \left(v_{1c} + \frac{\Delta v_1}{2} \right) \cdot \frac{\Delta \varphi}{\omega_1}$	25) $\Delta x = \left(v_{1c} + \frac{\Delta v_{1c}}{2} \right) \cdot \frac{\Delta \varphi}{\omega_c}$
12) $x_2 = x_1 + \Delta x^1$	26) $x_2 = x_1 + \Delta x$
13) $l_2 = l_0 + s_2 - x_2$	27) $l_2 = l_0 + s_2 - x_2$
14) $p_2 = p_0 \left(\frac{l_0}{l_2} \right)^m$	28) $p_2 = p_0 \left(\frac{l_0}{l_2} \right)^m$

Весь расчет выполняется с помощью логарифмической линейки, циркуля и карандаша, с одновременным отображением соответствующих значений на графике. Сравнение расчета, выполненного графоаналитическим методом с более точными методами численного интегрирования (например, методом Адамса-Штермера, развитого в работе [8]), показывает, что результирующая погрешность по отдельным показателям, при одном и том же шаге $\Delta \varphi = 15^\circ$, лежит в пределах от 2—6%; эта погрешность может быть уменьшена за счет уменьшения шага ($\Delta \varphi = 5 \div 10^\circ$), применения логарифмической линейки длиной 50 см, а также путем увеличения масштаба графического построения.

Хорошим контролем графоаналитического метода в процессе работы могут служить следующие характерные точки:

- 1) когда $l = l_0$, то $p = p_0$ (разрежение сменяется сжатием);
- 2) когда $x = x_{max}$, в этом случае $v_0 = 0$; кривая давления p разделяется на две части с импульсами, соответствующими: а) рабочему ходу бойка за время t_p и равному $S_p = \frac{Q_0}{g} \cdot v_{y0}$, б) холостому ходу бойка, за время t_x

и равному $S_x = \frac{Q_0}{g} \cdot v_{om}$, причем отношение $\frac{S_x}{S_p} = \frac{v_{om}}{v_{y0}} = k$ можно наз-

вать коэффициентом восстановления при ударе и отскоке бойка от инструмента (в системе трех тел: боек—инструмент—материал). Значение коэффициента k при расчете должно быть известным;

3) при $p = p_{max}$, длина воздушной связи $l = l_{min}$;

4) кроме того, экстремальным значениям давления воздуха p соответствует равенство скоростей бойка и поршня. В самом деле из уравнения

$$\text{политропы)} \quad \frac{dp}{dt} = -p_0 m \left(\frac{l_0}{l} \right)^{m-1} \frac{\dot{l}}{l^2} \cdot \frac{dp}{dt} = 0, \text{ если } \dot{l} = \frac{dl}{dt} = 0;$$

но $l = l_0 + s - x$, следовательно, скорость деформации воздушной связи $\dot{l} = \dot{s} - \dot{x} = v_n - v_\sigma = 0$, если $v_\sigma = v_n$.

По значению скорости при ударе $v_{y\sigma}$ и весу бойка Q_σ определяем и проверяем значение энергии удара $A_\sigma = \frac{Q_\sigma \cdot v_{y\sigma}^2}{2g} = \frac{S_p \cdot v_{y\sigma}}{2}$, а также среднее

$$\text{давление воздуха за цикл } p_{cp} = \frac{S_p + S_x}{t_p + t_x} = \frac{Q_\sigma(v_{om} + v_{y\sigma})}{g \cdot T} = \frac{Q_\sigma \cdot z \cdot v_{y\sigma} \cdot (1+k)}{60 \cdot g}.$$

На основании диаграммы давления $p = p(\varphi)$ не трудно выполнить силовой расчет машины, а также сделать поверочный расчет маховых масс при наличии периодически повторяющейся кратковременной пиковой нагрузки и мощности электродвигателя методами, изложенными в соответствующей литературе [6,7].

Применяя графоаналитический метод расчета в сочетании с экспериментальными методами исследования, можно глубже и полнее изучить вопросы динамики машин ударного действия (влияние выбора параметров на рабочий процесс машины, вопросы переходного режима; влияние утечек воздуха и зазоров между бойком и цилиндром на рабочий процесс и т. д.).

Зная распределение потерь в отдельных звеньях машины, можно оценить общий к.п.д. машины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алабужев П. М. Исследование рабочего процесса электроотбойного молотка с упругой (воздушной) связью. Известия ТПИ, № 61, вып. 1, 1947.
2. Алабужев П. М. и Юдин И. П. Экспериментальное исследование электропневматического молотка. Труды ЗСФАН, вып. 8, 1950.
3. Башкиров Д. А. Графоаналитический метод построения переходных процессов в системах автоматического регулирования. АКВИА, Москва, 1952.
4. Бей-Суси А. Графический анализ нелинейных систем. Журн. „Прикладная математика и машиностроение“, № 6, изд. ин. лит. М. 1952.
5. Горячкин В. П. Приближенные вычисления и графические изображения. Теория, конструкция и производство сельскохозяйственных машин, т. 1, Труды ВИСХОМ, Сельхозгиз, М.-Л. 1935.
6. Зиновьев В. А. Расчет маховых масс при движущем моменте, зависящем от скорости. Труды семинара по теории машин и механизмов, т. XII, вып. 46, изд. АН СССР, М. 1952.
7. Ирошников А. Н. О графическом методе динамического исследования многозвенного механизма при изменении момента в функции скорости. Журн. „Вестник машиностроения“, № 8, 1949.
8. Крылов А. Н. Лекции о приближенных вычислениях. Собрание трудов, т. III, изд. АН СССР, М.-Л., 1949.
9. Суднишников Б. В. Некоторые вопросы теории машин ударного действия, ЗСФАН, 1949.
10. Тимошенко С. П. Теория колебаний в инженерном деле. ГИТЛ, М.-Л., 1931