Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLVII, вып. 1, 1962 г.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРИОДОВ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ МАШИНЫ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

Г. А. Терехов, А. Д. Школьников

При теоретическом исследовании рабочих процессов пневматических машин ударного действия возникает ряд трудностей. Сложный характер термодинамических процессов, протекающих в цилиндре пневматической машины, обусловливает введение упрощающей схематизации. С другой стороны, применяемые для решения системы дифференциальных уравнений рабочего процесса этих машин приближенные математические методы вносят дополнительные погрешности в окончательный результат исследования. При этом оказывается невозможным раздельно оценить эти погрешности и доказать или опровергнуть правильность принимаемой схематизации физических явлений.

Применение математических машин открывает новые возможности для теоретического исследования рабочих процессов пневматических машин. Невысокая стоимость, простота обслуживания при достаточной точности делает особенно пригодными для этой цели математические машины непрерывного действия (электронные модели). В лаборатории автоматики и телемеханики Ленинградского горного института совместно с заводом «Пневматика» ведется работа по созданию методики электрического моделирования замкнутого рабочего цикла пневматической машины ударного действия. Задачи первого этапа этой работы, результаты которой излагаются в настоящей статье, — установить возможность электрического моделирования отдельных периодов рабочего цикла пневматических машин ударного действия на малых электронных моделях; проверить правильность принятой схематизации физических процессов, имеющих место при работе этих машин.

Принцип работы электронных математических машин непрерывного действия (электронных моделей) основан на том, что многие явления различной физической природы количественно описываются тождественными по форме математическими уравнениями (динамические аналогии). Переменные величины, связанные дифференциальными соотношениями, представляются в такой машине в виде непрерывных физических параметров (напряжений) электрических цепей, коммутируемых на наборной плате электронной модели в соответствии с видом решаемого дифференциального уравнения. Таким образом, решение дифференциальных уравнений электронными математическими машинами непрерывного действия сводится к воспроизведению в ней физического процесса другой природы, но количественно описывающегося таким же дифферен-

циальным уравнением. При подготовке дифференциального уравнения к решению на электронной модели необходимо представить переменные величины в виде электрических напряжений и установить соответствующий масштаб для независимой переменной — времени.

Рабочий процесс пневматической машины ударного действия может быть описан, при известной схематизации явлений, системой обыкновенных дифференциальных уравнений 4-го порядка [1].

$$\left.\begin{aligned} \frac{d\varepsilon_1}{d\tau} &= \frac{k}{\eta}\left[\Phi(\varepsilon_1) - \varepsilon_1 \frac{d\eta}{d\tau}\right] \\ \frac{d(\alpha\varepsilon_2)}{d\tau} &= \frac{k}{1-\eta}\left[-B\Phi_p(\alpha\varepsilon_2) + (\alpha\varepsilon_2)\frac{d\eta}{d\tau}\right] \\ \frac{d^2\eta}{d\tau^2} &= \varepsilon_1 - \alpha\varepsilon_2 - (1-\alpha)\varepsilon_a. \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

Для набора задачи на электронной модели введем новые переменные, связанные с переменными системы уравнений (1) следующими линейными соотношениями:

$$H = a_\eta \eta, \quad (2)$$

$$E_1 = a_{\varepsilon_1}\varepsilon_1, \quad (3)$$

$$E_2 = a_{\varepsilon_2}\varepsilon_2, \quad (4)$$

$$T = a_\tau \tau. \quad (5)$$

Здесь постоянные a_η, a_{ε_1}, a_{ε_2}, a_τ — масштабные коэффициенты. Коэффициенты a_η, a_{ε_1}, a_{ε_2} имеют размерность [100 *в*], а коэффициент a_τ — размерность времени. При выбранных значениях относительных единиц измерения физических величин коэффициенты линейного преобразования приняты равными

$$a_\eta = 100\ в; \quad a_{\varepsilon_1} = a_{\varepsilon_2} = 100\ в; \quad a_\tau = 1\ сек.$$

Тогда система дифференциальных уравнений рабочего процесса пневматической машины ударного действия принимает вид

$$\left.\begin{aligned} P(E_1) &= 28\,\frac{1}{20H}\left[\Phi(K_1E_1) - E_1P(H)\right] \\ P(\alpha E_2) &= 28\,\frac{1}{20(1-H)}\left[-B\Phi_p(K_2\alpha E_2) + \alpha E_2 P(H)\right] \\ P^2(H) &= E_1 - \alpha E_2 - (1-\alpha)E_a, \end{aligned}\right\} \quad (6)$$

где P — символ производной по независимому переменному (времени).

Постоянные коэффициенты

$$K_1 = \frac{1}{C^2}, \quad (7)$$

$$K_2 = \frac{1}{5\alpha C^2 \frac{p_a}{p_c}} \quad (8)$$

введены для того, чтобы избежать перестроения нелинейных функций $\Phi(\varepsilon_1)$ и $\Phi_p(\varepsilon_2)$ при изменении относительных единиц измерения давления. Здесь

$$C = \left[\sqrt{\frac{k-1}{2k}}\,\frac{S_1}{\mu_1 S_{0_1}}\sqrt{\frac{L-l}{RT_c}}\sqrt{\frac{S_1 p_c}{mg}}\right]^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

Вывод системы дифференциальных уравнений (1) и принятые в статье обозначения см. в настоящем сборнике: Г. А. Терехов. Система дифференциальных уравнений рабочего процесса пневматических машин ударного действия.

Для решения системы дифференциальных уравнений (6) использовалась серийная электронная модель МН-7 с комплектом нелинейных блоков КНБ. Решение задачи регистрировалось на осциллографе МПО-2. Блок-схема набора задачи показана на рис. 1. Нелинейные функции одной переменной набраны в виде ломаных прямых на блоках нелинейностей электронной модели. Обратные функции величин H и $1\text{-}H$ набраны уменьшенными в 20 раз. Этим объясняется появление постоянного множителя 28 в уравнениях (6). Кусочно-линейная аппроксимация нелинейной функции $\Phi(\varepsilon_1)$ изображена на рис. 2. При решении задачи регистрировались переменные E_1, αE_2, H, $P(H)$. Вид частного решения

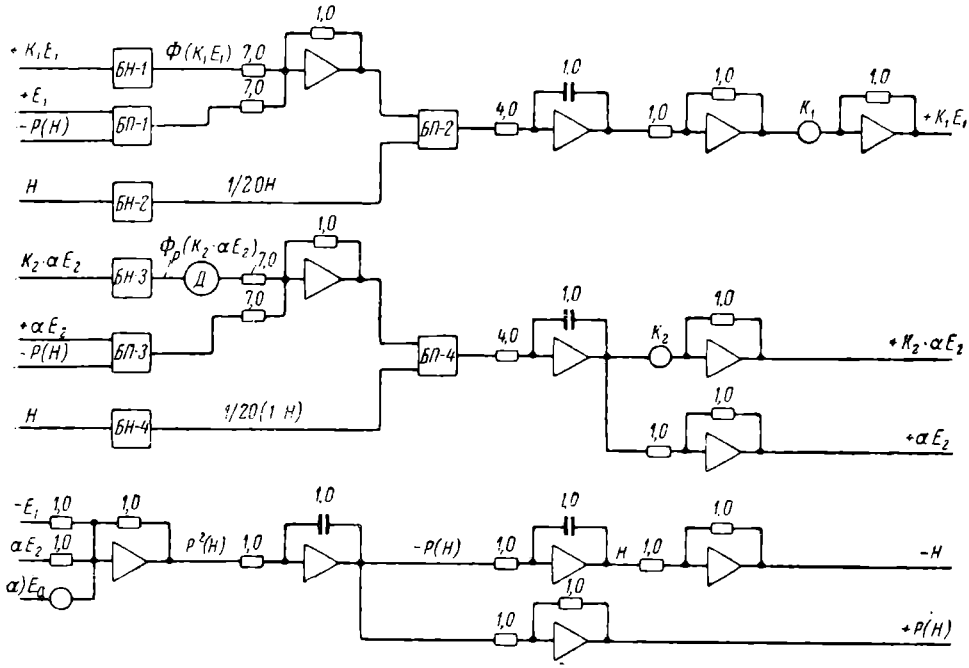


Рис. Блок-схема набора системы дифференциальных уравнений рабочего процесса пневматической машины на электронной модели

системы дифференциальных уравнений, соответствующий периоду рабочего хода до открытия выхлопных окон ($H_0 = 0{,}1$; $P_0(H) = 0$; $(E_1)_0 = 1{,}0$; $\alpha E_2)_0 = 0{,}2$; $K_1 = 1{,}67$; $K_2 = 2{,}22$; $B = 0{,}15$), представлен на рис. 3. При электрическом моделировании рабочих процессов пневматической машины ударного действия варьировались значения начальных условий интегрирования и величины постоянных коэффициентов системы дифференциальных уравнений C и B. Таким путем задавались частные решения системы дифференциальных уравнений, соответствующие различным периодам рабочего цикла и разным конструктивным размерам пневматической машины.

Зависимость частных решений системы дифференциальных уравнений от конструктивных размеров машины для периода наполнения рабочей полости цилиндра представлена на рис. 4. На рис. 4, *а* показан ряд частных решений системы для различных значений коэффициента C при одинаковых начальных условиях интегрирования и постоянном значении коэффициента $B = 0{,}15$. Как видно из приведенных графиков, увеличение коэффициента C ведет к более быстрому падению давления сжатого воздуха в рабочей полости цилиндра и к менее интенсивному на-

растанию противодавления в нерабочей полости цилиндра. Несмотря на уменьшение противодавления в нерабочей полости цилиндра αE_2, движущее усилие [уравнение (6)] будет тем не менее уменьшаться. Поэтому увеличение коэффициента C ведет к уменьшению скорости и перемещению поршня пневматической машины. Полученный характер зависимости

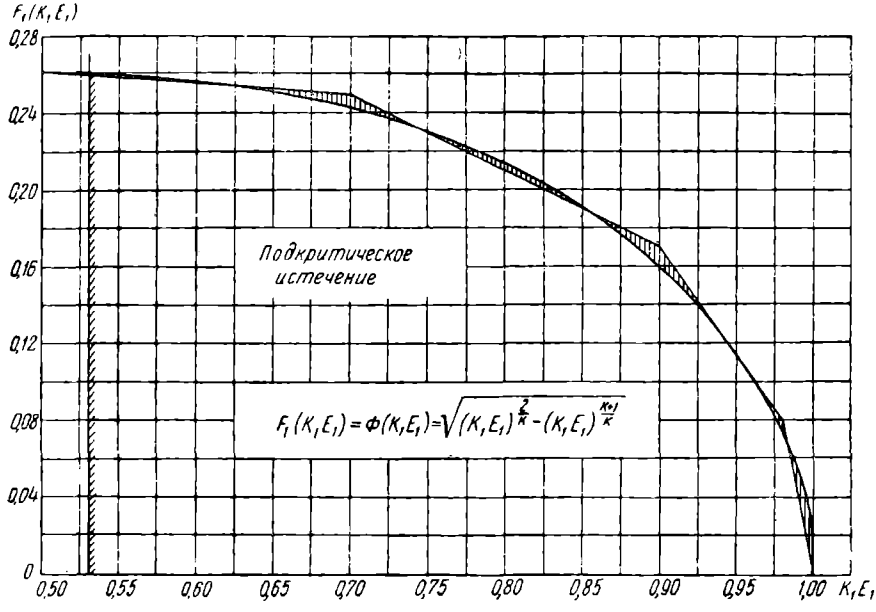


Рис. 2. График функции истечения через впускное отверстие и ее кусочно-линейная аппроксимация

частных решений системы дифференциальных уравнений от величины C легко объяснить, если рассмотреть уравнение (9). Действительно, относительное падение давления в рабочей полости цилиндра должно быть тем больше, чем больше значения свободного объема цилиндра $S_1(L-l)$, давления сжатого воздуха на входе в молоток p_c и чем меньше

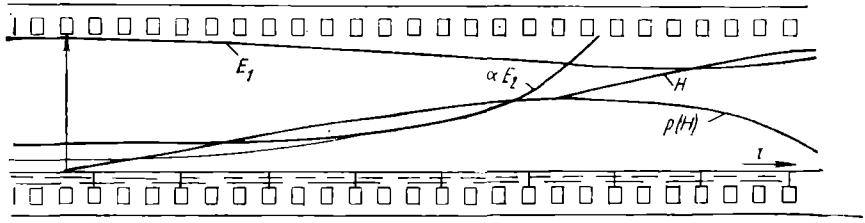


Рис. 3. Частное решение системы дифференциальных уравнений рабочего процесса пневматической машины:

$H_0 = 0{,}1$; $P_0(H) = 0$; $(E_1)_0 = 1{,}0$; $(E_2)_0 = 0{,}2$; $K_1 = 1{,}67$; $K_2 = 2{,}22$; $B = 0{,}15$

значения площади впускного отверстия S_{0_1}, коэффициента расхода μ_1 и массы поршня m.

Графики на рис. 4, *б* отображают рабочий процесс пневматической машины ударного действия при различных значениях коэффициента B и постоянном $C^2 = 0{,}60$. Изменение величины B в первую очередь определяет характер термодинамического процесса сжатия воздуха в нерабочей полости цилиндра. Так, при $B = 0$ происходит адиабатическое

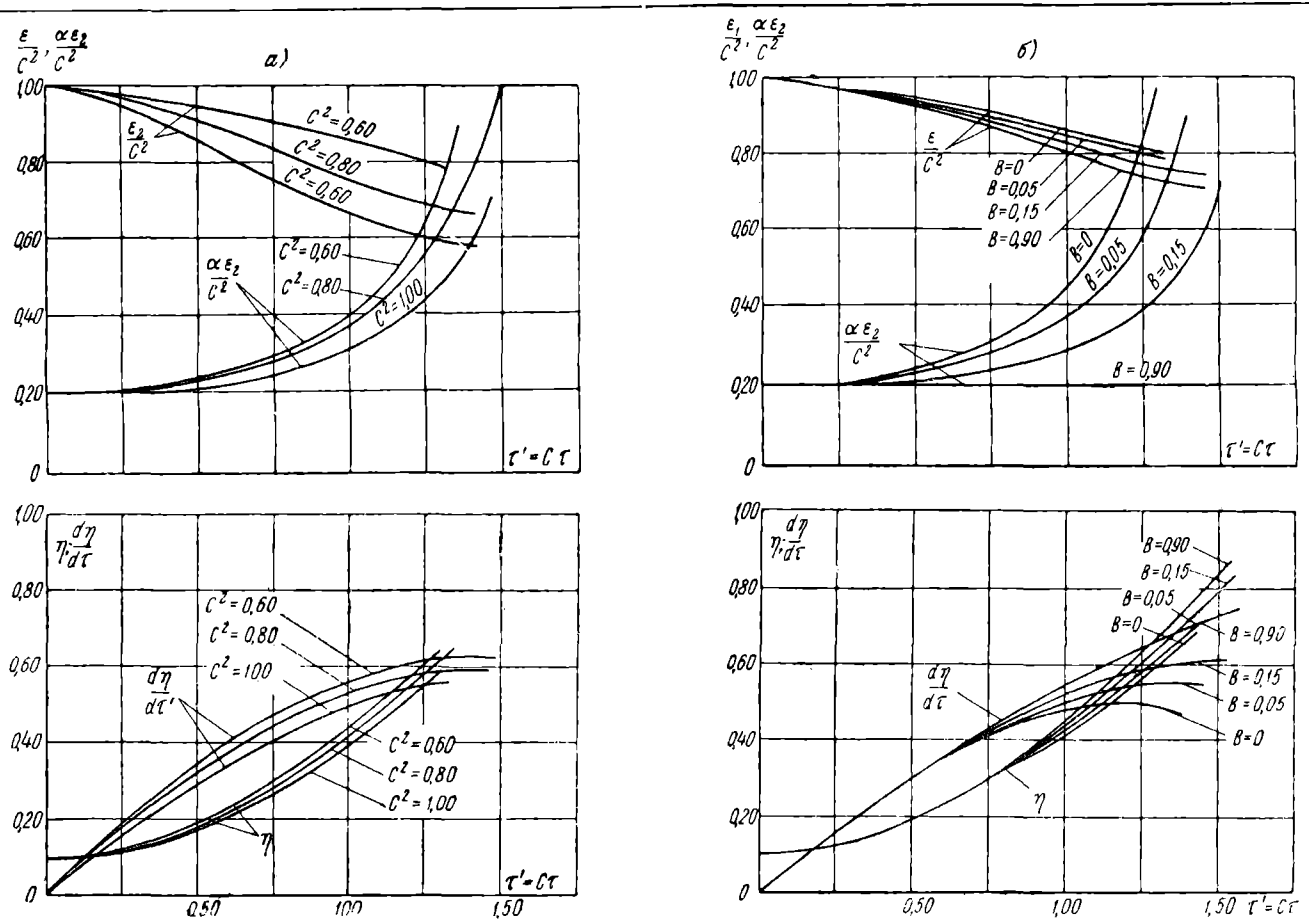


Рис. 4. Зависимость частных решений системы дифференциальных уравнений рабочего процесса пневматической машины: *а* — от коэффициента C (B 0,15); *б* — от коэффициента B (C^2 0,60)

сжатие постоянного количества воздуха, при $B>0$ — адиабатическое сжатие переменного количества воздуха. Практически, уже при $B\approx1{,}0$ давление воздуха в нерабочей полости цилиндра остается постоянным (изобарический процесс вытеснения воздуха из полости цилиндра). Увеличение противодавления при уменьшении величины B вызывает уменьшение движущего усилия [уравнение (6)], что приводит к более медленному росту кривой скорости поршня и, как следствие этого, к замедленному падению давления E_1 в рабочей полости цилиндра.

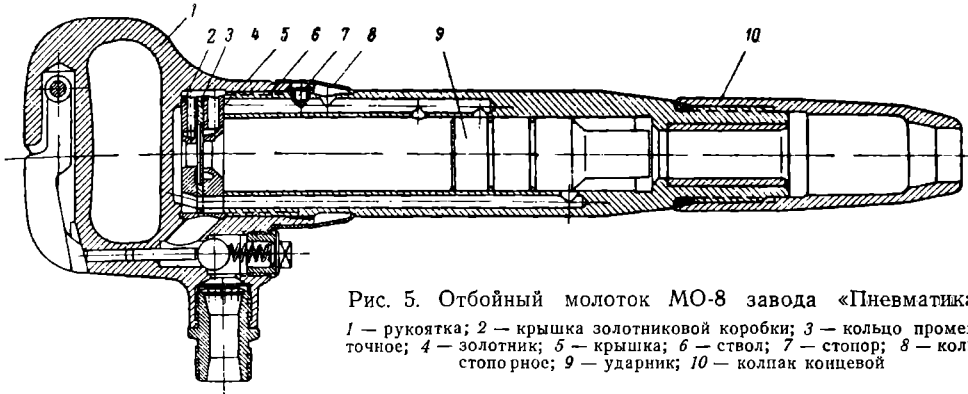


Рис. 5. Отбойный молоток МО-8 завода «Пневматика»:

1 — рукоятка; *2* — крышка золотниковой коробки; *3* — кольцо промежуточное; *4* — золотник; *5* — крышка; *6* — ствол; *7* — стопор; *8* — кольцо стопорное; *9* — ударник; *10* — колпак концевой

Сравнение результатов электрического моделирования рабочих процессов пневматических машин ударного действия с экспериментальными данными было проведено для серийного отбойного молотка МО-8 (рис. 5). Индикаторная диаграмма отбойного молотка получена в лаборатории электрических методов измерения завода «Пневматика». Для записи индикаторных диаграмм на заводе разработаны специальные мембранные тензометрические датчики давления. Сигнал датчика по-

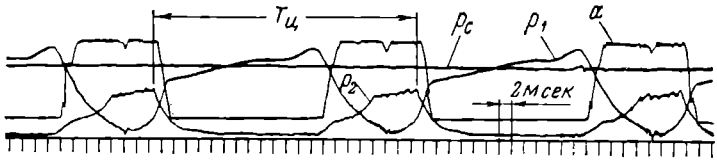


Рис. 6. Экспериментальная индикаторная диаграмма отбойного молотка МО-8:

и p_2 — кривые давления в верхней (рабочей) и нижней (нерабочей) полостях цилиндра; p_c — давление на входе в молоток; $T_ц$ — время цикла

дается на усилительную аппаратуру и регистрируется на шлейфовом осциллографе. На индикаторной диаграмме отбойного молотка МО-8 (рис. 6) кривая a регистрирует моменты перекидки воздухораспределительного клапана. Сравнение результатов машинного решения системы дифференциальных уравнений (6) с экспериментальными данными (рис. 7) проводилось только для периода наполнения верхней полости цилиндра (начало рабочего хода), так как это единственный период рабочего цикла, для которого с достоверностью можно задать начальные условия интегрирования. Для других периодов эти условия определяются как конечные условия предыдущего периода. Сравнение кривой давления сжатого воздуха в рабочей полости цилиндра, полученной в результате обработки индикаторной диаграммы цикла отбойного молотка, с кривыми изменения давления, полученными в результате электрического моделирования рабочего процесса (рис. 7), дает относительную ошибку 18%. Это расхождение можно объяснить, по-видимому, тем, что принятые

при интегрировании системы и рекомендуемые некоторыми авторами [1] значения коэффициентов расхода больше действительных. При введении действительных значений коэффициентов расхода следует ожидать более близкого совпадения результатов машинного решения системы с опытными данными.

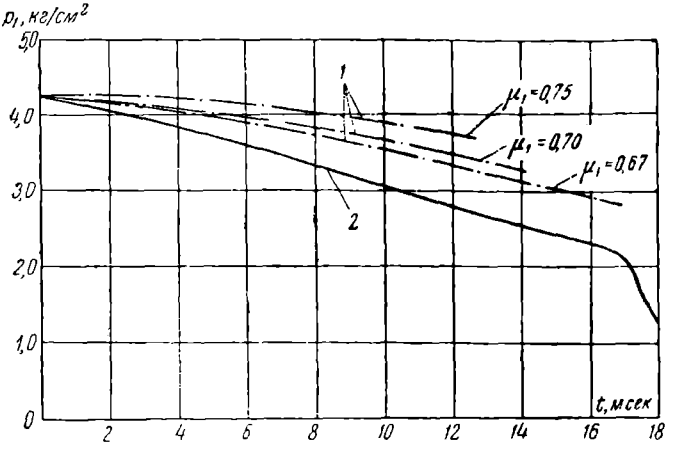


Рис. Сравнение результатов электрического моделирования с экспериментальными данными (2)

Заключение

1. Доказана возможность электрического моделирования рабочих процессов пневматических машин ударного действия на малых электронных моделях (типа МН-7).

2. Предложена блок-схема набора задачи, позволяющая моделировать различные периоды рабочего цикла пневматической машины при минимальных изменениях в коммутации модели.

3. Установлено, что принятая схематизация рабочих процессов пневматической машины в первом приближении соответствует действительному протеканию этих процессов.

---

[1] Кассациер И. С. Теория и расчет строительных пневматических инструментов. Научные тр. Ленингр. инженерно-строит. ин-та, 1950, вып. 9.