

# ВЫБОР ЭФФЕКТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПНЕВМОАГРЕГАТОВ С БОЛЬШОЙ ИНЕРЦИОННОЙ НАГРУЗКОЙ

**Г. А. Крутиков**

Кандидат технических наук, доцент\*  
Контактный тел.: 050-512-63-35

**В. В. Ермак**  
Магистр\*

\*Кафедра пневмогидроавтоматики  
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»  
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002  
Контактный тел.: 099-273-80-19

*Показано, що шляхом використання ємнісного гальмування замість дросельного для пневмоагрегатів з великим інерційним навантаженням вдається наблизити характер руху робочого органу пневмоагрегату до найбільш раціонального. Шляхом машинного експерименту вдається підібрати параметри пневмоагрегату з гальмівною ємністю, що забезпечують оптимальний режим гальмування*

*Показано, что путем использования емкостного торможения вместо дросельного для пневмоагрегатов с большой инерционной нагрузкой удается приблизить характер движения рабочего органа пневмоагрегата к наиболее рациональному. Путем машинного эксперимента удастся подобрать параметры пневмоагрегата с тормозной емкостью, обеспечивающие оптимальный режим торможения*

*It is rotined that by the use of the capacity braking in place of choke for pnevmoagregatov with the large inertia loading it is succeeded to approach character of motion of working organ of pnevmoagregata to to most rational. By a machine experiment it is succeeded to pick up the parameters of pnevmoagregata with a brake capacity, providing the optimum mode of braking*

## Введение

При торможении рабочих органов (РО) пневмоагрегатов (ПА) очень часто, по аналогии с гидроприводами, используют дроссельное торможение. Однако необоснованность такого подхода становится очевидной при нагружении ПА с большой сжимаемостью рабочего тела средними и большими инерционными нагрузками.

## Объект исследования

Наиболее типичным случаем, когда проектировщик сталкивается с проблемой безударного срабатывания ПА с большой инерционной нагрузкой является пневматический модуль поворота колонны автоманипулятора (рис. 1).

Даже при манипулировании сравнительно небольшими массами ( $m$ ) на пневмоцилиндре неполноповоротного модуля с передачей «рейка-шестерня» могут возникнуть чрезвычайно большие инерционные нагрузки.

Достаточно легко оценить, какая будет реальная нагрузка, приведенная к штоку цилиндра, в этом случае.

Приняв  $R=1,0$  м и радиус делительной окружности шестерни  $r_{ш}=0,05$  м, условно сосредоточенную массу на конце консоли  $m=15$  кг, получим момент инерции:

$$I = m \cdot R^2 = 15 \text{ кг м}^2.$$

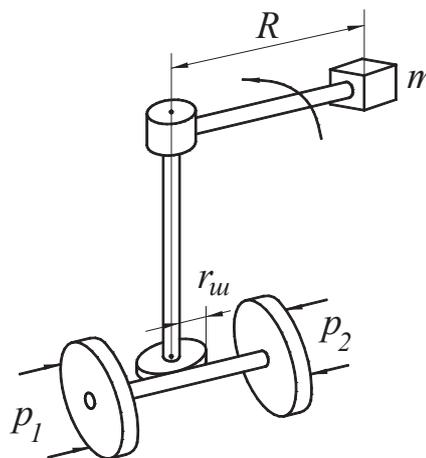


Рис. 1. Кинематическая схема нагружения пневмомодуля поворота колонны манипулятора

Из условия равенства моментов инерции приведенная в этом случае к штоку цилиндра масса  $m_{ир}$  составляет:

$$m_{ир} = \frac{I}{r_m^2} = \frac{15}{0.05^2} = 6000 \text{ кг} .$$

**Основные результаты**

При работе с такими инерционными нагрузками дроссельное торможение не может обеспечить требуемой динамики движения. Ярко выраженный колебательный и, к тому же, затяжной процесс торможения часто вынуждает отказаться от использования пневматики для решения подобных задач и перейти к использованию гидропривода, что многократно усложняет дальнейшую эксплуатацию оборудования.

На рис. 2, 3 представлены схемы ПА соответственно с дроссельным и ёмкостным торможением.

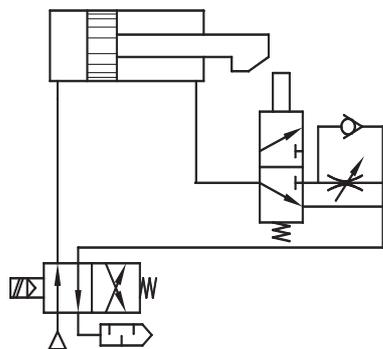


Рис. 2. Схема дроссельного торможения

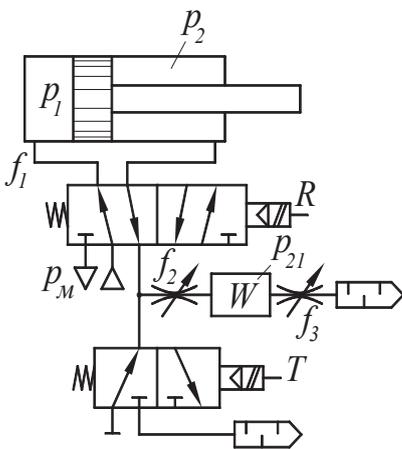


Рис. 3. Схема ёмкостного торможения

На схеме ёмкостного торможения (рис. 3) при отсутствии управляющего сигнала Т сжатый воздух из выхлопной полости пневмоцилиндра попадает в междроссельную камеру с объёмом W, причем при правильном согласовании объёма W и эффективных площадей дросселей  $f_2$  и  $f_3$  с параметрами пневмоцилиндра и величиной массовой нагрузки можно осуществить эффективное торможение РО ПА.

При перемещении РО в крайнее положение срабатывает конечный переключатель и подает сигнал Т, в результате чего происходит быстрое опорожнение выхлопной полости и ёмкости.

Математическую модель ПА с тормозной ёмкостью получим на основании термодинамических зависимостей тела переменной массы [1]

$$\begin{cases} \frac{dp_1}{dt} = \frac{k \cdot f_1 \cdot p_M \cdot \sqrt{k \cdot R \cdot T_M} \cdot \varphi(z) - k \cdot p_1 \cdot V}{F_1(x_1 + x)} \\ \frac{dp_2}{dt} = -\frac{k \cdot f_2 \cdot p_2 \cdot \sqrt{R \cdot T_M}}{F_2 \cdot p_M^{0.143} \cdot (L - x + x_2)} \cdot \varphi(z_{21}) + \frac{k \cdot p_2 \cdot V}{L - x + x_2} \\ \frac{dp_{21}}{dt} = \frac{k \cdot \sqrt{k \cdot R \cdot T_M}}{W} \cdot [f_2 \cdot p_2 \cdot \varphi(z_{21}) - f_3 \cdot \varphi(z) \cdot p_{21}] \\ \frac{dx}{dt} = V \\ \frac{dV}{dt} = \frac{(p_1 \cdot F_1 - p_2 \cdot F_2 - P)}{m} \end{cases} \quad (1)$$

где  $z$  – отношение давлений,  $z_1 = p_1/p_2$ ;  $z_{21} = p_{21}/p_2$ ;  $z_3 = p_a/p_{21}$ ;  $p_M, p_a$  – магистральное и атмосферное давление;  $p_1, p_{21}, p_2$  – давления в соответствующих полостях ПА (рис. 3);  $\varphi(z)$  – расходная функция, которая записывается в виде универсальной зависимости, пригодной как для критического, так и для надкритического режима течения.

$$\begin{aligned} \varphi(z) = & \frac{[1 + \text{sign}(z - 0,528)] \cdot \sqrt{\text{abs}(z^{1.43} - z^{1.71})}}{2} + \\ & + \frac{0,579 \cdot [1 - \text{sign}(7 - 0,528)]}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

где  $T_M$  – абсолютная температура воздуха в магистрали питания;  $R$  – газовая постоянная;  $k$  – показатель адиабаты;  $x_1, x_2$  – начальные координаты поршня слева и справа;  $x$  – текущая координата поршня;  $L$  – полный ход поршня;  $f_1, f_2, f_3$  – эффективные площади соответствующих дросселей (рис. 3);  $W$  – объём ёмкости;  $m$  – масса подвижных частей;  $P$  – статическая нагрузка;  $V$  – скорость поршня;  $F_1, F_2$  – площади торцов поршней слева и справа.

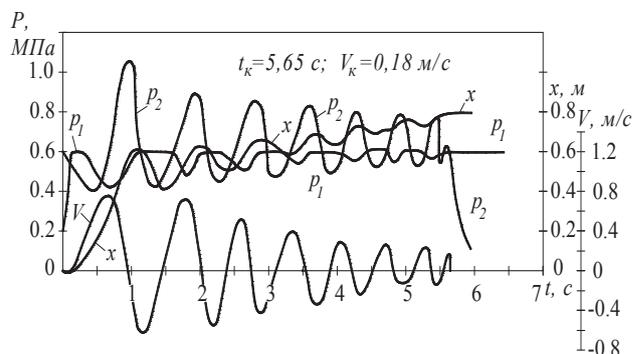


Рис. 4. Переходный процесс для ПА с дроссельным торможением

На рис. 4 представлен переходный процесс, полученный на ЭВМ в результате численного интегрирования системы дифференциальных уравнений, отражающих функционирование ПА с дроссельным торможением (рис. 2) при следующих параметрах:  $m = 6000$  кг,  $P = 250$  Н,  $F_1 = 0,1$  м<sup>2</sup>,  $F_2 = 0,094$  м<sup>2</sup>,  $L = 0,8$  м,  $x_T = 0,4$  м,  $f_1 = f_2 = 0,47 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>,  $f_3 = 0,4 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>,

где  $x_T$  и  $f_T$  – координата торможения и эффективная площадь тормозного дросселя.

Из представленного расчета видно, что процесс торможения колонны манипулятора носит ярко выраженный колебательный характер, с большой амплитудой колебания, и длительным временем срабатывания ( $t_k = 5,65$  А).

Несмотря на затянутый процесс срабатывания скорость удара в конце хода составляет 0,18 м/с, что учитывая большую приведенную массу подвижных частей, может привести к разрушительным последствиям.

Попытка увеличить тормозной путь  $x_T$  приводит лишь к более затяжному переходному процессу, практически не меняя сам характер переходного процесса.

Радикальным образом изменить характер переходного процесса, приблизив его к идеальному, возможно лишь при переходе к ёмкостному торможению. Переходный процесс на рис. 5 получен при тех же условиях, что и в предыдущем случае, но при использовании ёмкостного торможения.

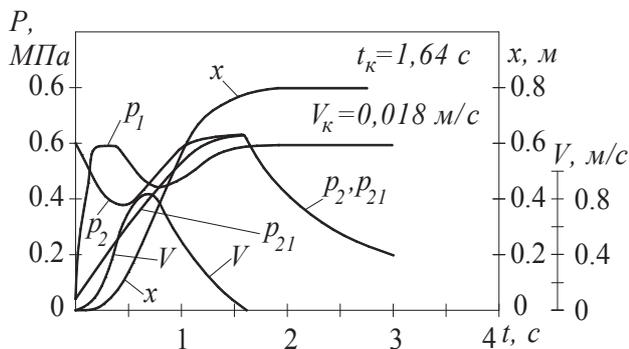


Рис. 5. Переходный процесс для ПА с ёмкостным торможением

Путем машинного эксперимента удалось подобрать оптимальное соотношение  $W$  и  $f_2, f_3$ , которые обеспечили наивысшее быстродействие ( $t_k = 1,64$  А) и характер изменения скорости близкий к идеальному, циклоидальному виду. Наиболее оптимальные параметры переходного процесса в данном случае обеспечивает ёмкость  $W = 0,12$  м<sup>3</sup> и дроссели  $f_2 = 0,47 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>,  $f_3 = 0,3 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>.

Для разработки инженерной методики расчета ПА с ёмкостным торможением необходим переход к безразмерной форме записи с выделением критериев динамического подобия, которые позволят с помощью графиков-номограмм оперативно определять оптимальные значения  $f_2, f_3$  и  $W$ .

### Выводы

Изложенный в работе сравнительный анализ двух способов торможения свидетельствует о высокой эффективности ёмкостного способа. Приближенный способ может стать практически единственным способом обеспечения безударного срабатывания ПА с большой инерционной нагрузкой.

### Литература

1. Герц Е.В., Крейнин Г.В. Расчет пневмоприводов. Справочное пособие. – М.: Машиностроение, 1975. – 272 с.