

УДК 621.541

## К ОЦЕНКЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕМНЫХ ПНЕВМОМОТОРОВ

© Виктор Маирович Бозров, Любовь Константиновна Бозрова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

[ymbzrv@bk.ru](mailto:ymbzrv@bk.ru)

**Аннотация.** Приведены расчетные модели для определения пусковых характеристик и предельной угловой скорости объемных пневмомоторов. Пусковые характеристики предложено определять на основе вычисления установившихся значений давлений сжатого воздуха в их рабочих камерах при фиксированных (с определенным шагом) положениях выходного вала мотора. Показано, что предельную скорость, развиваемую мотором, можно определить с использованием математической пневмомотора модели с безмассовым ротором.

**Ключевые слова:** объемный пневмомотор, механические характеристики, движущий момент, угловая скорость.

Сжатый воздух является вторым по значимости после электричества энергоносителем в промышленности, а различные механизмы с объемными пневмомоторами (ПМ) имеют массовое применение в горнопроходческом оборудовании, подъемно – транспортных устройствах взрывоопасных производств, в ручном механизированном инструменте (пневмодрели, гайковерты, миксеры, отрезные и шлифовальные машины и т.д.). Их преимущества – лучшая энерговооруженность, долговечность и надежность при работе в условиях агрессивной среды, способность работать при длительных перегрузках, не перегреваясь.

Несмотря на распространенность в промышленном применении, методы расчета и проектирования объемных ПМ недостаточно развиты. Одной из причин этого является их конструктивное разнообразие, в том числе и по количеству рабочих камер, и сложность математического описания протекающих в них термодинамических процессов.

Расчетные методики ПМ развивались в основном применительно к конкретным конструктивным типам ПМ. Существенный вклад в расчетную практику поршневых ПМ внесли В.Д.Зиневич, Амяга В.Н. и другие авторы. Из современных исследований поршневых ПМ следует отметить работу В.И.Ивлева и С.Ю.Мисюрина [6], в которой поставлена и решена задача выбора оптимальных параметров поршневого кулачкового ПМ. Исследованию пластинчатых ПМ посвящены работы Зеленецкого С.Б., Лебедева В.П., Герц Е.В., Бозрова В.М. и других авторов.

Общим для упомянутых исследований является использование понятия статических механических характеристик, широко применяемое в практике расчета моторов. Применительно к пневматическим ПМ механические характеристики - это зависимости средних значений момента на валу ПМ и потребляемого при этом количества сжатого воздуха от средней угловой скорости выходного вала ПМ в установившемся режиме работы.

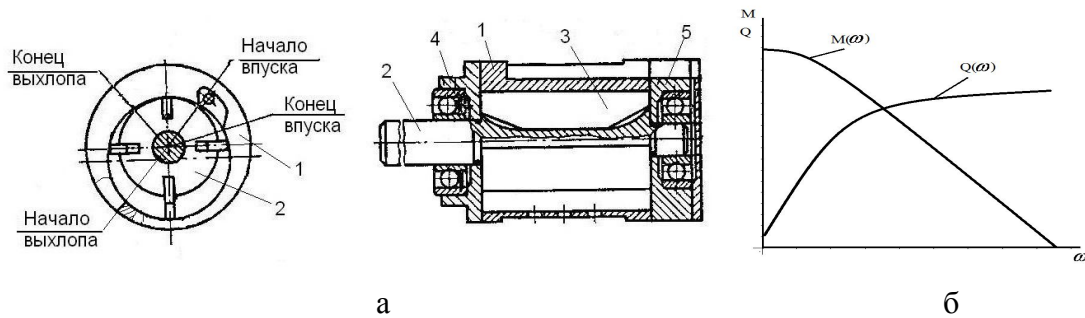
Анализ кинематики образования рабочих камер многих типов ПМ показал общность описания зависимостей текущих объемов рабочих камер и эффективных площадей впускных и выпускных каналов от угла положения выходного вала ПМ. Последнее позволило разработать обобщенную математическую модель вращательного ПМ [1].

Процессы образования вращающего момента ПМ описываются достаточно сложной системой (1) нелинейных уравнений переменной структуры, решаемой численными

методами [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{p}_i = f(p_i, \omega, \varphi, S_l, \dot{V}_i, V_i); \quad i = 1, z; \\ M = \frac{1}{\omega} \sum_{i=1, z} p_i \dot{V}_i \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $z$  и  $l$  - число рабочих камер и каналов ПМ соответственно,  $p_i$  - давление воздуха в  $i$ -ой камере,  $S_l$  - эффективная площадь  $k$ -го канала,  $V_i$  - текущий объем  $i$ -ой камеры,  $\varphi$  - угол поворота вала,  $\omega = \dot{\varphi}$  - угловая скорость ПМ. Получаемые при этом вращающий момент  $M$ , мощность  $N$  и расход воздуха  $Q$  характеризуются колебаниями, накладываемыми на некоторый базовый процесс. Частота и амплитуда колебаний определяются числом камер, угловой скоростью вала ПМ, параметрами сжатого воздуха и параметрами собственно ПМ. Статические характеристики ПМ в общем случае зависят, кроме того, от внутренних потерь на трение, а также от утечек воздуха из камер и ее перетечками между камерами. На рис.1. для примера приведена полуконструктивная схема пластинчатого ПМ и показан характер его механических характеристик.



**Рис.1.** а - схема пластинчатого ПМ. 1- статор, 2- ротор, 3 – пластины, 4 и 5 – передняя и задняя крышки; б - характер механических характеристик ПМ

При построении моментной статической характеристики  $M(\omega)$  с использованием системы (1) определяют некоторый средний вращающий момент на валу для каждого выбранного значения угловой скорости. Начальными значениями давлений в камерах можно задаваться относительно свободно. Расчет выполняется до выхода на установившийся режим колебаний момента между двумя пределами. Для построения статической моментной характеристики выбирается точка, соответствующая среднему значению момента за оборот вала ПМ [1]. Аналогичным образом строятся статические характеристики мощности  $N(\omega)$  и расхода воздуха  $Q(\omega)$ . При этом очевидно, что численным интегрированием системы уравнений (1) невозможно получить значения механической характеристики в точке  $\omega = 0$  (из-за деления на 0), а также в точке холостого хода, где  $M=0$ . Решения в данных точках с помощью системы (1) получают путем экстраполяции кривых, полученных в заранее заданном интервале  $0 < \omega \leq \omega_n$ , до точек пересечения с осями соответствующих координат ( $n$  – количество рассчитываемых точек механической характеристики).

С учетом изложенного предложено развитие обобщенной математической модели для расчета механических характеристик объемных пневмомоторов (ПМ), позволяющей непосредственно рассчитать предельные моментные и расходные характеристики ПМ. Под предельными характеристиками понимаем значения момента и потребляемого расхода

сжатого воздуха ПМ при пуске, когда угловая скорость равна нулю, и угловой скорости ротора ПМ (режим холостого хода), когда движущий момент ПМ равен нулю.

Суть предложения заключается в дополнении ранее разработанной модели расчета механических характеристик ПМ (1) комплексом соотношений, описывающих пусковой режим ( $\omega = 0$ ) и режим холостого хода ( $M=0$ ).

Основой для составления полной модели является система (1). Приведем ее в развернутом виде для интервала  $0 < \omega \leq \omega_n$ :

$$\frac{dP_i}{d\varphi} = \frac{k}{\omega V_i} [R(TG_{im} - T_i G_i) - P_i \omega \frac{dV_i}{d\varphi}] ; \quad (2)$$

$$\frac{dT_i}{d\varphi} = \frac{T_i}{\omega P_i V_i} [P_i \omega \frac{dV_i}{d\varphi} + \omega V_i \frac{dP_i}{d\varphi} - RT_i (G_{im} - G_i)] ;$$

$$M_{\text{ос}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sum_{i=1,z} P_i \frac{dV_i}{d\varphi} d\varphi - M_c ; \quad (3)$$

$$Q = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sum_{i=1,z} G_{im} d\varphi ; \quad (4)$$

$$i = 1, z$$

где  $k$  – показатель адиабаты,  $R$  – газовая постоянная для воздуха,  $T$  – температура воздуха в магистрали, откуда он поступает в  $i$ -ю камеру,  $G_{im}$  – секундный расход воздуха поступающего в  $i$ -ую камеру из магистрали (если она сообщается с магистралью),  $T_i$  – температура воздуха в  $i$ -й камере,  $G_i$  – секундный расход воздуха из  $i$ -й камеры,  $M_{\text{ос}}$  – движущий момент,  $M_c$  – момент от сил сопротивления, в том числе и от сил трения,  $Q$  – секундный расход сжатого воздуха, поступающего в ПМ из магистрали. Вычисление расхода проводится по формуле Сен-Венана [1]. Открытие и закрытие впускных и выхлопных каналов  $S_i$  в функции угла поворота ротора задается дополнительными алгебраическими и логическими соотношениями, которые здесь не приводятся.

Для случая  $\omega = 0$  (пусковой режим) из уравнения (2) принимаем  $\frac{dP_i}{d\varphi} = 0$  для

каждого дискретного положения ротора. Тогда из (2) получим:

$$G_{im} - G_i = 0 . \quad (5)$$

Уравнение (5), составленное для каждой камеры, отражает баланс соответствующих секундных расходов в  $i$ -ой камере. Оно представляет собой трансцендентное уравнение, решением которого является величина установившегося давления воздуха в этой камере  $P_i$ . Вычислив таким образом значения  $P_i$  и  $G_m$  во всех камерах на каждом шаге по углу  $\varphi$  за один оборот и подставив их в выражения (3) и (4), получим значения  $M_{\text{ос}}$  и  $Q$  для случаев  $\omega=0$ .

Для случая  $M=M_c = \text{const}$  предложена модель ПМ с нулевой вращаемой массой. Тогда, при нулевом моменте инерции вращающихся элементов ПМ из уравнения (1) получим:

$$\sum_{i=1,z} P_i \dot{V}_i = M_c \cdot \quad (6)$$

Запишем уравнение (2) в виде:

$$\frac{dP_i}{d\varphi} = \frac{k}{\omega V_i} F_i - \frac{k}{V_i} P_i \frac{dV_i}{d\varphi}, \quad (7)$$

где  $F_i = R(TG_{im} - T_i G_i)$ .

Далее, в продифференцированное по углу  $\varphi$  выражение (6) подставим зависимость (7) и выразим из него величину  $\omega$ :

$$\omega = \frac{k(\sum_{i=1,z} F_i \frac{dV_i}{d\varphi} / V_i)}{[k \sum_{i=1,z} P_i (\frac{dV_i}{d\varphi})^2 / V_i - \sum_{i=1,z} P_i \frac{d^2 V_i}{d\varphi^2}]} \quad (8)$$

Соответствующий этой скорости средний за оборот секундный расход воздуха  $Q$  из магистрали определим по формуле (4).

Модель ПМ с нулевой вращаемой массой (7)-(8), реализуемая методами численного интегрирования, например, методом Рунге-Кутты 4-го порядка, также требует задания начальных значений давлений воздуха в камерах ПМ. Особенность этой процедуры заключается в том, что начальные значения давлений  $P_i$  в камерах следует задавать из условия строгого выполнения условия (6). Также отметим, что эта модель ПМ дает возможность численно строить механические характеристики ПМ в виде зависимости угловой скорости  $\omega$  вала ПМ от момента  $M$ , т.е.  $\omega=f(M)$ . Очевидно, что при этом момент  $M$  при на каждом шаге интегрирования будет иметь постоянное значение, равное  $M_c$  ( $M_c$  является дискретно задаваемой величиной в требуемом диапазоне его значений).

В заключение укажем, что пусковые значения  $M_{об}$  и  $Q$ , рассчитанные для пластинчатых ПМ по модели (2)-(4) для значений  $\omega$ , близких к нулевым, и модели (5)-(3)-(4) ( $\omega=0$ ), дают практически одинаковые результаты как по величинам давлений воздуха в камерах по углу поворота вала ПМ, так и по собственно средним пусковым моменту и расходу сжатого воздуха из магистрали. Такой же вывод сделан относительно определения угловой скорости холостого хода ( $M_c=0$ ). Рассчитанные механические характеристики для пластинчатых ПМ приведены в [5].

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России 2009-2013 гг».

### Литература

1. Герц Е.В., Бозров В.М. Обобщенная математическая модель объемных вращательных пневмоприводов различных типов. - В кн.: Пневматика и гидравлика. Приводы и системы управления. Вып.10.- М.: 1984, с.221-230.
2. Герц Е.В. Динамика пневматических систем машин - М. Машиностроение. 1985. - 256с.
3. Бозров В.М., Крейнин Г.В., Бозрова Л.К. К исследованию динамики приводов с объемным пневмомотором //Проблемы машиностроения и надежности машин, №6, 2003, с. 3-7.
4. Бозров В.М., Ивлев В.И. К оценке силовых и энергетических характеристик спирального пневмомотора //Проблемы машиностроения и надежности машин, №6, 2008, с. 98-83.
5. Бозров В.М., Ивлев В.И. Перспективы повышения эксплуатационных характеристик пластинчатых пневмомоторов // Машиностроение и инженерное образование, №2, 2009, с.7-6.

6. Ивлев В.И., Мисюрин С.Ю. Многокритериальная оптимизация параметров пневмомотора на основе его детализированной математической модели // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки, 2010, № 4, с. 3-12.

*Поступила: 16.04.12.*