

УДК 62-851.1

ПОЛУЧЕНИЕ ВАКУУМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА

© 2013 Е.И. Носков, А.С. Донской

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Поступила в редакцию 25.03.2013

В статье представлены результаты разработки и исследования вакуум-генератора, принцип действия которого основан на нетрадиционном способе получения вакуума. Предложен эффективный способ получения вакуума с использованием явления параметрического резонанса. Разработан алгоритм изменения параметров пневмосистемы, который приводит к появлению резонанса. Авторы предполагают, что такой способ получения вакуума может эффективно применяться на производстве.

Ключевые слова: *пневмопривод, вакуум, резонанс*

Резонанс – это резкое увеличение амплитуды механических колебаний, силы тока или числа поглощаемых фотонов при приближении частоты внешнего воздействия к собственной частоте колебаний системы. Суть явления: многократное усиление эффекта от воздействия на объект при совпадении частоты внешнего воздействия с собственной частотой объекта. Практически в любой литературе о колебаниях можно встретить определения собственных и вынужденных колебаний, а также явления резонанса, который чаще всего рассматривается как совпадение частоты внешней силы и частоты собственных колебаний системы. Реже встречаются рассмотрения более сложного случая – параметрического резонанса, когда колебательный процесс, вызываемый периодической модуляцией какого-либо параметра, принимает нарастающий характер.

$$m \cdot \ddot{x} = -k(t) \cdot x \quad (1)$$

При параметрическом изменении параметра k , когда $k(t + T) = k(t)$, где T – период, m – масса, $\ddot{x}$ – ускорение, x – перемещение, уравнение (1) называют уравнением Хилла.

Резонанс, как правило, представлен как явление вредное и разрушительное, однако в последнее время растет количество устройств, удачно использующих этот эффект. Резонанс применяют в радиотехнике, механике, квантовой механике и т.д. В статье будет рассмотрено

пневматическое устройство для получения вакуума, в основе работы которого лежит резонанс.

По ряду особенностей для работы взят именно параметрический резонанс. Параметрический резонанс представляет собой пороговый эффект, так как при наличии трения он возможен лишь при достаточно большой амплитуде изменения параметра, т. е. при достаточно большой глубине модуляции, превосходящей некоторое критическое значение. Модуляция параметра не может раскачать осциллятор, находящийся в состоянии покоя в положении равновесия: для возбуждения параметрического резонанса, в отличие от обычного резонанса, осциллятор должен совершать хотя бы небольшие собственные колебания. Наиболее выраженный параметрический резонанс происходит при частоте изменения параметра системы $\omega_{\Pi} = 2\omega_{CB}$, а также при частотах

$$\omega_{\Pi} = 2 \cdot \frac{\omega_{CB}}{n}, \quad (2)$$

где ω_{Π} – частота изменения параметра системы, ω_{CB} – частота свободных колебаний системы, n – целое число.

Также стоит отметить, что параметрический резонанс более опасен (при рассмотрении его как вредного явления), чем обычный, еще и по той причине, что линейное демпфирование лишь несколько суживает области неустойчивости, но неспособно ограничить возрастание амплитуд колебаний в этих областях. Однако это обстоятельство будет весьма выгодным с точки зрения преодоления повышенных сил трения в пневмоприводе, а также получения более глубокого вакуума. Учитывая вышеизложенные

Носков Евгений Игоревич, аспирант. E-mail: darkLord-2045@inbox.ru

Донской Анатолий Сергеевич, доктор технических наук, профессор

особенности систем, работающих в зоне параметрического резонанса, была разработана пневмосхема и логика её управления.

Принципиальная пневмосхема. По аналогии с другими механическими системами пневматическая колебательная система также проста – за основу взят пневмоцилиндр без штока. Как известно, обычно это цилиндрический поршень, размещенный в цилиндре, закрытый с обеих сторон крышками. К полостям цилиндра

подключены патрубки, через которые имеется возможность подавать и откачивать воздух. Одно из свойств воздуха – это сжимаемость, и, следовательно, некоторая жесткость. Тем самым у нас есть все, что есть в реальной колебательной системе – поршень некоторой массы, две жестких воздушных «пружины», силы трения между поршнем и цилиндром и др. Принципиальная схема приведена ниже (рис.1).

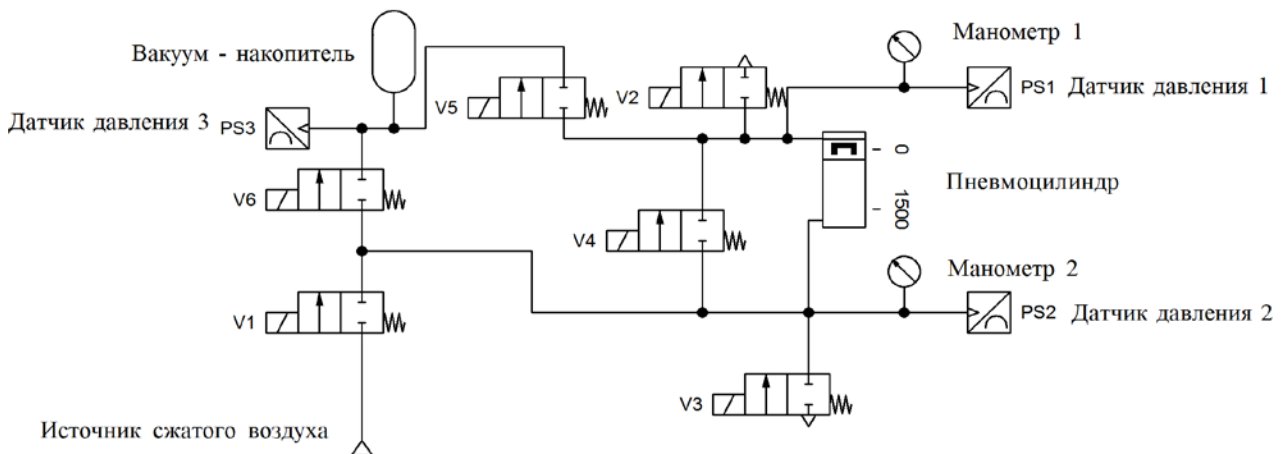


Рис. 1. Принципиальная пневмосхема вакуумного генератора

Схема состоит из бесштокового пневмоцилиндра, являющегося основным рабочим элементом системы, вакуум-накопителя, предназначенного для «хранения» вакуума, группы однотипных распределителей 2/2 с электромагнитным управлением, источника сжатого воздуха для питания системы энергией, двух датчиков давления и манометров для регистрации текущего давления в полостях пневмоцилиндра. Условно обозначим: верхнюю – полость 1, а нижнюю – полость 2.

Принцип работы. Для появления в системе параметрического резонанса нужно соблюсти несколько условий. Так как для требуемого изменения параметра системе требуется не только сжатый воздух, но и вакуум, то цикл работы устройства можно разделить на 2 основных этапа: создание вакуума и собственно сам параметрический резонанс с переходным процессом при выходе в зону резонанса.

Создание вакуума. Будем считать, что в начальный момент времени давление во всех полостях и патрубках атмосферное, поршень находится в верхнем крайнем положении, клапаны V2 и V3 открыты и связывают полости цилиндра с атмосферой. Под действием силы тяжести поршень ускоренно движется вниз, пока не достигнет определенной скорости. В этот момент клапан V2 закрывается, а V5 открывается, тем самым связывая первую полость с вакуум-накопителем. Часть кинетической энергии

идет на разряжение газа в полости и вакуум-накопителе. При подходе поршня к «критической нижней отметке» все клапана перекрываются – в первой полости резко образуется разряжение, а во второй – воздушная подушка. В результате скорость резко снижается и меняет свой знак. В момент времени, когда давление во второй полости за счет движения поршня вверх снизится до значения, меньшего, чем значение давления источника сжатого воздуха, открывается клапан V1. В результате произойдет наполнение второй полости сжатым воздухом, что приведет к ускоренному движению поршня вверх.

При движении поршня вверх давление верхней полости будет расти от давления разряжения, оставшееся от предыдущего цикла до давления атмосферного. Далее отрывается клапан V2 и воздух первой полости выбрасывается в атмосферу, чтобы не оказывать сопротивление движению поршня. При подходе поршня к «верхней критической отметке» перекрывается клапан V2 и соединяются полости с помощью клапана V4. После относительного выравнивания давлений перекрывается V4 и открывается V3. В результате, двигаясь по инерции, поршень еще сильнее сжимает газ в первой полости, а давление второй полости уменьшается до атмосферного – скорость поршня снижается и снова меняет направление. Далее цикл повторяется с тем лишь исключением, что клапан V2

открывается только для выброса «лишнего» воздуха при движении поршня вверх. На рис. 2 показаны графики изменения положения и скорости поршня, построенные для математической модели этой системы. В основе модели лежат следующие формулы [2]:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = p_1 F_1 - p_2 F_2 - p_A (F_1 - F_2) - N \quad (3)$$

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{k f_1 \sqrt{RT_M}}{F_1 (x + x_{01}) \sqrt{\zeta_1}} \sqrt{p_M^2 - p_1^2} - \frac{k p_1}{x + x_{01}} \frac{dx}{dt} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{dp_1}{dt} = & -\frac{f_2}{\sqrt{\zeta_2}} \left(\frac{k \sqrt{RT_M}}{F_2 (S - x + x_{02})} \left(\frac{P_2}{P_M} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right) \sqrt{P_2^2 - P_{A00}^2} + \\ & + \frac{k}{S - x + x_{02}} \dot{x} \end{aligned} \quad (5)$$

где k – показатель адиабаты (коэффициент Пуассона); R – газовая постоянная, Дж/(кг*К); T – абсолютная температура газа, К; p – давление в полостях, Па; p_A – давление на выходе, Па; p_M – давление питания, Па; x – координата положения поршня, м; x_0 – приведенная координата, характеризующая объем вредного пространства, м; f – площадь проходного сечения трубопровода, м²; ζ – коэффициент сопротивления линии, дросселей; M – масса подвижных частей, кг; F – эффективная площадь поршня, м²; S – максимальный ход поршня, м; N – статическая нагрузка, Н. Численные значения параметров для воздуха при температуре $T=293^0\text{K}$ (20^0C) и давлении $p=101,3$ кПа (1 атм.): $k=1,4$; $R=287$ Дж/(кг*К).

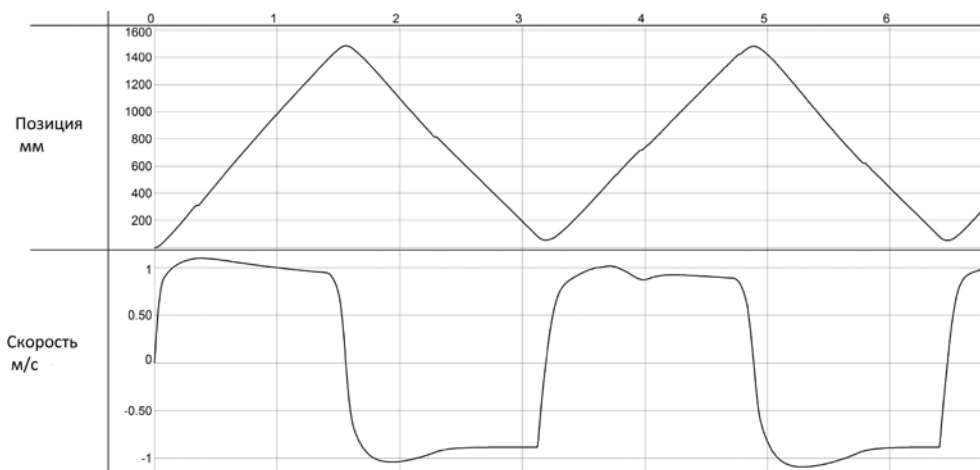


Рис. 2. Изменение положения и скорости поршня

Таким образом, процесс получения вакуума происходит при условии вынужденного резонанса, так как частота подвода воздуха ко 2-ой полости и частота соединения полостей совпадают с собственной частой колебаний поршня. В результате данная система с каждым новым циклом меняет свои параметры (растет глубина вакуума) и этот факт требует корректировки управления (изменение «критических» положений, подключение вакуум-накопителя в другие моменты, изменение времени нагнетания воздуха в полости). За эту функцию отвечает система автоматического управления (САУ), собирающая информацию с датчиков давления, положения и др. (в данной работе не представлена).

Параметрический резонанс. После получения достаточного разряжения в вакуум-накопителе можно использовать его для перевода

пневматической системы в режим параметрического резонанса. Суть процесса – изменять значения жесткости воздуха в полостях как можно близко к закону (2). Для этого переводим нашу систему из режима колебания «от стенки к стенке» в режим колебаний вблизи центра пневмоцилиндра. Затем, чередуя подключение вакуума и избыточного давления к полостям, переходим в режим параметрического резонанса. При этом очень важно соблюсти все условия резонанса (иметь достаточную начальную амплитуду колебаний; иметь энергию, вносимую в систему, больше, чем энергия, затраченная на потери и пр.). Далее, как и следует из теории, при наступлении параметрического резонанса начинает увеличиваться амплитуда колебаний. Вместе с увеличением амплитуды так же начинают меняться давления в полостях, что приводит к

изменению параметров системы. В данный момент основная задача САУ – как можно точнее поддерживать созданный закон изменения параметров. В результате энергия, подводимая к системе, максимально эффективно воспринимается этой системой и трансформируется в работу по разряжению воздуха в вакуум-накопителе. Дело в том, что поршень с каждым новым колебанием удаляется от положения равновесия системы. В итоге это приводит к двум эффектам – увеличению глубины получаемого вакуума и увеличению давления воздушной подушки

(которое, кстати, успешно можно использовать для влияния на параметры системы). Регулируя доли этих эффектов можно настроить направленность системы на получение вакуума. В итоге согласно математической модели получается процесс, схожий с классическим для механической системы, представленным на рис. 3. Здесь показано графическое изменение координат поршня $x(t)$, скорости $\dot{x}(t)$ при импульсном изменении жесткости воздуха.

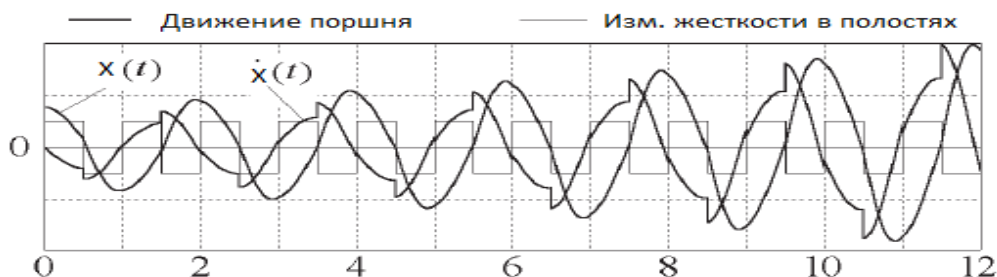


Рис. 3. Переходные процессы в пневмоцилиндре

Из приведенных графиков видно, что получается параметрический резонанс. Тем самым мы получаем систему, работающую в режиме резонансов, что позволяет максимально эффективно использовать подводимую энергию к системе. Эта особенность помогает наиболее рационально использовать энергию сжатого воздуха, являющейся одной из самых дорогих энергоносителей. Кроме того, система помогает получить более высокий уровень вакуума по сравнению со многими другими устройствами. Большие габариты являются недостатком пневматической системы, однако это не является большой проблемой для размещения на произ-

водстве, так как пневмоцилиндр представляет собой довольно длинную, но тонкую трубку (с помощью поршня с маленьким диаметром легче получать глубокий вакуум).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Бутиков, Е.И. Колебания линейных систем. Часть II. Параметрические колебания. Издательство СПбИТМО, СПб., 1999. 68 с.
2. Донской, А.С. Обобщенные математические модели элементов пневмосистем. – СПб, 2001. 204 с.

RECEIVING VACUUM WITH USING THE EFFECT OF PARAMETRICAL RESONANCE

© 2013 E.I. Noskov, A.S. Donskoy

St. Petersburg State Polytechnical University

Results of development and researching the vacuum generator, which principle of action is based on non-traditional way of receiving vacuum are presented in article. The efficient way of receiving vacuum with use of parametrical resonance phenomenon is offered. The algorithm of change the pneumatic system parameters, which leads to occurrence of a resonance is developed. Authors assume that such way of receiving vacuum can be applied efficiently in production.

Key words: *pneumatic actuator, vacuum, resonance*

Evgeniy Noskov, Post-graduate Student. E-mail: darkLord-2045@inbox.ru
Anatoliy Donskoy, Doctor of Technical Sciences, Professor