

Профессор Ю.А. Фатыхов, доцент О.В. Агеев,
старший преподаватель А.З. Мационко
(ФГБОУ ВПО «Калининградский государственный технический университет»)
кафедра пищевых и холодильных машин, тел. 8 (4012) 93-55-46

Моделирование пневматического привода мехатронного комплекса для порционирования пищевых продуктов

Рассмотрен пневматический привод режущего рабочего органа мехатронного комплекса для порционирования пищевых продуктов. Проанализированы уравнения динамики пневмодвигателя. Приведена принципиальная схема пневматического привода. Изложена математическая модель для силы полезного сопротивления при движении пневмодвигателя с режущим инструментом. Приведена математическая модель для сил сопротивления резанию пластинчатым ножом.

The pneumatic drive of the cutting actuating medium of the mechatronic complex for portioning food is considered. The dynamics equations air motor is analyzed. The schematic diagram of the pneumatic actuator is shown. The mathematical model for the power of useful resistance of the air motor with moving cutting tool is set out. The mathematical model for the power of resistance of cutting plate knife is shown.

Ключевые слова: мехатронный комплекс, пневматический привод, пневматический цилиндр, пластинчатый нож, моделирование, резание.

В настоящее время одним из наиболее востребованных продуктов рыбной отрасли является обесшкуренное рыбное филе. Экономически выгодным является изготовление порционированного филе, нарезанного на кусочки заданного веса, формы и размеров. Исходным сырьем при этом являются рыбные обесшкуренные филейчики, полученные при машинном филетировании рыбы и снятии шкуры. Готовым продуктом являются кусочки филе, предназначенные для дальнейшей упаковки, охлаждения, транспортировки и реализации потребителю [1].

Совершенствование разделочно-филетировочной техники привело к разработке нового класса технических систем – мехатронных комплексов с интеллектуальными управляющими системами. Данное оборудование является мехатронной техникой, состоящей из следующих концептуально связанных блоков: видеосканирующего оборудования, управляющей микроЭВМ, программного обеспечения для распознавания образа филе, расчета параметров и принятия решений, привода для перемещения режущих рабочих органов, а также конвейерного оборудования для перемещения филе и порций [2].

Мехатронный комплекс должен обеспечивать измерение веса каждого филейчика, распознавание графического образа филе, порционирование на три части – филейную, центральную и хвостовую. Кроме того, при помощи управляющей микроЭВМ должна осуществляться переналадка на другой вид сырья, изменение карты разрезания на порции, а также решение задачи оптимального раскроя филе в зависимости от заданного веса порций. Так, при смене рабочих органов, возможно выполнение мехатронным комплексом операции обезглавливания рыбы при производстве тушки обезглавленной, тушки разделанной на клипфиск и так далее.

Вместе с тем, мехатронное устройство для порционирования предназначено для резания другой пищевой продукции – мяса птицы, плодов, овощей, хлеба и сыра. Использование данного устройства позволяет малым и средним предприятиям выпускать продукцию, полностью готовую к реализации, то есть без дальнейшей механической обработки.

Условия работы режущих рабочих органов определяют требования к приводу мехатронного комплекса. В качестве рабочего органа целесообразно использовать фигурный нож гильотинного типа. Для резания продуктов с мягкой консистенцией наиболее подхо-

дающим является пневматический привод рабочего органа. Пневмопривод характеризуется большим быстродействием, высокими показателями по мощности, усилию и массе. Простота конструкции, дешевизна, простота в эксплуатации и обслуживании выгодно отличают этот вид привода от электрического привода. Пневмопривод может работать во влажной, запыленной и загрязненной средах, длительное время выдерживает перегрузки. Перемещение сжатого воздуха в полости двигателя и элементах пневмопривода позволяет отводить избыточную теплоту, что обеспечивает работу привода в условиях повышенной температуры [3].

Наряду с преимуществами пневмопривода известны его недостатки. К ним относятся высокая податливость привода вследствие сжимаемости рабочего тела – воздуха. Невысокое давление в промышленной пневмосети (обычно не выше 10 атм.) ограничивает возможность получения высоких рабочих усилий для резания плотных пищевых продуктов. Однако для резания филе и обезглавливания рыбы усилия, развиваемые пневматическими двигателями, на практике являются вполне достаточными.

Значительный вклад в расширение области применения пневмопривода внесла разработка мехатронных модулей, включающих однокристалльные микроЭВМ и миниатюрные датчики параметров состояния. При этом сняты многие ограничения по реализации сложных алгоритмов управления, устранена повышенная податливость привода.

Устройством, перемещающим режущий рабочий орган в мехатронном комплексе, является поршневой пневматический двигатель, выполненный в виде пневмоцилиндра двустороннего действия с односторонним штоком. Для обоснования основных параметров необходимо выполнить математическое моделирование динамики пневмопривода. В общем случае это возможно сделать на основе системы нелинейных дифференциальных уравнений, решаемых численными методами.

Принципиальная схема пневмопривода мехатронного комплекса для порционирования пищевых продуктов приведена на рисунке 1.

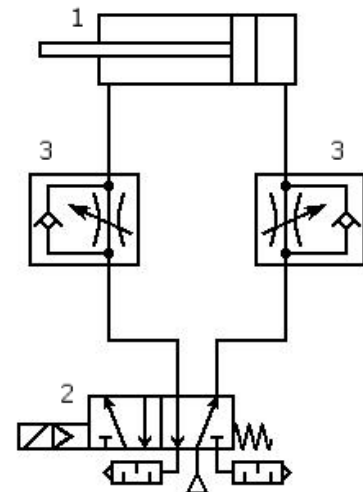
К основным уравнениям динамики пневмодвигателя отнесены уравнения изменения давления в его камерах и уравнение движения режущего рабочего органа. Характер изменения давления в камере пневмодвигателя определяется интенсивностью подвода и отвода воздуха, а также и протекающими в этой камере термо-

динамическими процессами. При математическом моделировании сжатый воздух рассматривается как идеальный газ, давление и температура в напорной пневмолинии полагаются неизменными, а процессы в камере пневмодвигателя считаются квазистационарными.

Баланс энергии в камере пневмодвигателя определяется следующим выражением:

$$dQ_M = dU + dL + dQ_a, \quad (1)$$

Энергия dQ_M , подводимая к камере с поступающим в нее сжатым воздухом, расходуется на изменение внутренней энергии воздуха dU , а также на работу расширения dL . Кроме того, часть энергии dQ_a выделяется в окружающую среду с вытекающим из камеры воздухом.



1 – пневмодвигатель (пневмоцилиндр); 2 – пневмораспределитель; 3 – регулятор скорости.

Рисунок 1 - Принципиальная схема пневматического привода

Заменим $dQ_M = i_M d\theta_M$; $dQ_a = i d\theta_a$; $dU = \theta du + u d\theta$; $dL = p dV$; $i_M = c_p T_M$; $i = c_p T$; $u = c_v T$, где θ_M, θ_a – массы втекающего и вытекающего из камеры воздуха, θ – масса воздуха в камере, u – удельная внутренняя энергия воздуха в камере, i_M, i – удельная энтальпия воздуха, поступающего в камеру из напорной пневмолинии и вытекающего из камеры в атмосферу, p – давление воздуха в камере, V – объем камеры, c_p, c_v – теплоемкость воздуха при по-

стоянном давлении и постоянном объеме, T_M, T – температура воздуха в напорной пневмолинии и в камере.

С учётом замены запишем выражение (1) в следующем виде:

$$c_p T_M d \theta_M - c_p T d \theta_a = c_v \theta d T + c_v T d \theta + p d V; \quad (2)$$

Используя уравнение состояния воздуха $p V = \theta R T$, где R – газовая постоянная для воздуха, получаем:

$$\theta d T = \frac{1}{R} (p d V + V d p + R T d \theta); \quad (3)$$

Подставим выражение (3) в (2), заменив $c_p / c_v = k$ (k – показатель адиабаты), $c_p - c_v = R$:

$$k R T_M d \theta_M - k R T d \theta_a = k p d V + V d p; \quad (4)$$

где $d \theta_M = G_M d t$, $d \theta_a = G_a d t$, G_M , G_a – расходы воздуха, втекающего в камеру и вытекающего из нее, t – время.

Уравнение (4) представим в следующем виде:

$$\dot{p} = \frac{k}{V} (G_M R T_M - G_a R T - p \dot{V}); \quad (5)$$

Уравнение изменения температуры воздуха в полости получаем из выражения (3),

заменив $d \theta = (G_M - G_a) d t$, $\theta = \frac{p V}{R T}$:

$$\dot{T} = \frac{T}{V} \dot{V} + \frac{T}{p} \dot{p} - \frac{R T^2}{p V} (G_M - G_a); \quad (6)$$

В случае $T = const$ выражение (5) принимает вид:

$$\dot{p} = \frac{1}{V} (G_M R T_M - G_a R T - p \dot{V}); \quad (7)$$

Для двустороннего пневматического цилиндра выразим объемы полостей через площади поршня, а также координаты его положения в цилиндре:

$$V_1 = (x_0 + x) F_1; V_2 = (x_0 - x) F_2. \quad (8)$$

где F_1, F_2 – площади поршня; x_0 – координата среднего (начального) положения поршня; x – текущая координата поршня, отсчитываемая от среднего положения вправо по оси абсцисс.

Пневматический привод режущего органа работает в цикловом режиме. Поршень перемещается от одного крайнего положения в другое, при этом полости пневмодвигателя соединяются пневмораспределителем поочередно то с напорной пневмолинией, то с атмосферой. Примем, что камера 1 пневмоцилиндра соединена с питающей линией пневмораспределителя, а камера 2 соединена с выхлопной линией. Поскольку в камере 2 идет процесс чистого опорожнения, процесс изменения её состояния описывается уравнением адиабаты. Кроме того, сделаем допущение о постоянстве температуры воздуха в камере.

Подставив выражение (8) в выражение (5), получим уравнения изменения давления в первой и второй камерах пневмоцилиндра:

$$\dot{p}_1 = \frac{k}{x_0 + x} \left(\frac{f_{\varnothing}}{F_1} K p_1 \right), \quad (9)$$

$$\dot{p}_2 = \frac{k}{x_0 - x} \left(-f_{\varnothing} \bar{K} \cdot \frac{\sqrt{R T_0}}{F_2} \cdot \frac{p_2^{(3k-1)/2k}}{p_M^{(k-1)/2k}} \cdot \frac{p_{атм}}{p_2} \cdot \varphi(\varepsilon) \right) - \frac{k}{x_0 - x} p_2 x, \quad (10)$$

где k – показатель адиабаты; $f_{\varnothing}$ – эффективная площадь проходного сечения питающего и выхлопного отверстий пневмоцилиндра;

$$K = \bar{K} \sqrt{R T_0} = \sqrt{\frac{2 k R T_0}{k-1}} \approx 760 \quad \text{м/с};$$

$\bar{K} = \sqrt{\frac{2k}{k-1}}$; p_M – давление воздуха в питающей пневмолинии; T_0 – температура воздуха в камерах; $\varphi(\varepsilon)$ – расходная функция; ε – отношение давлений воздуха за отверстием и перед отверстием,

$$\varphi(\varepsilon) = \sqrt{\varepsilon^{2/k} - \varepsilon^{(k+1)/k}} \text{ при } \varepsilon \geq \varepsilon_*; \quad (11)$$

$$\varphi(\varepsilon) = \varphi(\varepsilon_*) = 0,259 \text{ при } \varepsilon < \varepsilon_*. \quad (12)$$

Уравнение движения поршня и связанных с ним механизмов с предположением, что приведённая к штоку масса подвижных частей зависит от положения штока, выражается следующим образом:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \frac{dm}{dx} = F_1 p_1 - F_2 p_2 - C_B \frac{dx}{dt} - P_{mp} \operatorname{sgn} \left(\frac{dx}{dt} \right) - P_C; \quad (13)$$

где m – приведённая к штоку масса подвижных частей пневмоцилиндра, включая режущий инструмент; C_B – коэффициент вязкого трения; P_{mp} – сила сухого трения; P_C – сила полезного сопротивления.

Таким образом, при допущении о постоянстве температуры воздуха в камерах пневмоцилиндра, выражения (9), (10), (13) являются математическим описанием динамики пневмоцилиндра.

С учётом (13) определим силу полезного сопротивления при движении штока с режущим инструментом:

$$P_C = [F_1 p_1 - F_2 p_2] - \left[C_B \frac{dx}{dt} - P_{mp} \operatorname{sgn} \left(\frac{dx}{dt} \right) \right] - \left[m \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \frac{dm}{dx} \right]; \quad (14)$$

Из (14) очевидно, что сила полезного сопротивления определяется рабочим усилием пневмодвигателя с учётом потерь на трение и инерции подвижных частей.

Режущим рабочим органом мехатронного комплекса является пластинчатый нож, который имеет перемещение в одном направлении, перпендикулярном режущей кромке. Нож характеризуется углом заточки и толщиной. Для повышения качества среза и повышения износостойкости инструмента режущей кромке пластинчатого ножа придается фасонная форма.

Усилие, необходимое для вдавливания ножа в продукт, должно уравновешиваться

нормальными и касательными напряжениями на контактных прямых:

$$Q = 2 \tau_0 a \left[\frac{\gamma}{2} + \alpha + \frac{\cos \gamma}{\cos \frac{\gamma}{2}} \sin \left(\frac{\gamma}{2} + \delta \right) \right] \sin \frac{\gamma}{2}, \quad (15)$$

где τ_0 – напряжение трения; δ – угол трения; a – длина контактного участка; γ – угол заточки ножа; α – угол, определяющий размер области с упругой деформацией (зависит от угла заточки ножа).

Полное усилие резания включает силу сопротивления скольжению:

$$P_C = 2 \tau_0 a \left[\frac{\gamma}{2} + \alpha + \frac{\cos \gamma}{\cos \frac{\gamma}{2}} \sin \left(\frac{\gamma}{2} + \delta \right) \right] \cdot \sin \frac{\gamma}{2} + k_C U_n S \quad (16)$$

где k_C – коэффициент сопротивления скольжению; U_n – скорость движения ножа; S – площадь боковых поверхностей ножа.

Из (14) и (16) получаем выражение для максимальной толщины пласта, разрезаемого ножом с пневматическим приводом:

$$a = \frac{[F_1 p_1 - F_2 p_2] - \left[C_B \frac{dx}{dt} - P_{mp} \operatorname{sgn} \left(\frac{dx}{dt} \right) \right]}{2 \tau_0 \left[\frac{\gamma}{2} + \alpha + \frac{\cos \gamma}{\cos \frac{\gamma}{2}} \sin \left(\frac{\gamma}{2} + \delta \right) \right] \sin \frac{\gamma}{2}} - \frac{\left[m \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \frac{dm}{dx} \right] - k_C U_n S}{2 \tau_0 \left[\frac{\gamma}{2} + \alpha + \frac{\cos \gamma}{\cos \frac{\gamma}{2}} \sin \left(\frac{\gamma}{2} + \delta \right) \right] \sin \frac{\gamma}{2}}, \quad (17)$$

На рисунках 2 и 3 приведены график изменения скорости и ускорения рабочего органа, а также график изменения давления в пневмодвигателе и координаты рабочего органа пневматического привода.

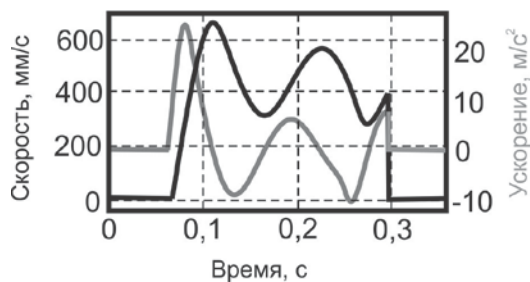


Рисунок 2 - График изменения скорости и ускорения рабочего органа пневматического привода

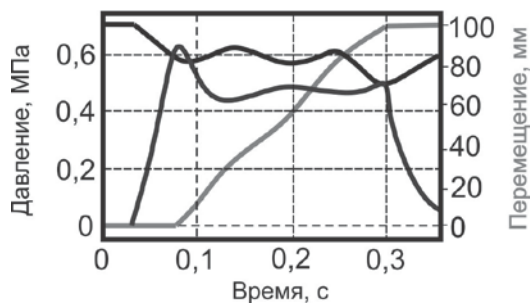


Рисунок 3 - График изменения давления в пневмодвигателе и координаты рабочего органа пневматического привода

Вышеуказанные упрощённые модели создают основу для расчёта параметров пневматического привода мехатронного комплекса. Из моделей (14)-(17) следует, что эффективность порционирования пищевых продуктов пластинчатым ножом с пневматическим приводом зависит от следующих параметров: рабочего давления в напорной магистрали, габаритов пневмодвигателя, потерь на сухое и вязкое трение в пневмодвигателе, массы штока с ножом, потерь на трение на боковых поверхностях ножа, угла заточки и формы ножа.

ЛИТЕРАТУРА

1 Фатыхов, Ю. А. Мехатроника в оборудовании для разделявания и филетирования рыбы. Ресурсосберегающее адаптивное управление процессом производства рыбного филе на основе мехатроники [Текст]: монография / Ю. А. Фатыхов, О. В. Агеев. – Саарбрюкен: Издательство LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 264 с.

2 Фатыхов, Ю. А. Мехатроника в рыбо-разделочном оборудовании [Текст]: монография / Ю. А. Фатыхов, О. В. Агеев. – Калининград: ФГОУ ВПО «КГТУ», 2008. – 279 с.

3 Лепешкин, А. В. Гидравлические и пневматические системы [Текст] / А. В. Лепешкин, А. А. Михайлин; под ред. Ю. А. Беленкова. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 336 с.

REFERENCES

1 Fatykhov, Y. A. Mechatronics in equipment for cutting and filleting fish. Resource-adaptive control of the process of production of fish fillets on the basis of mechatronics [Text]: monograph / Y. A. Fatykhov, O. V. Agueyev. – Saarbruecken: Publishing house of the LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 264 p.

2 Fatykhov, Y. A. Mechatronics in equipment for cutting fish [Text]: monograph / Y. A. Fatykhov, O. V. Agueyev. - Kaliningrad: FSEE HPE "KSTU", 2008. - 279 p.

3 Lepeshkin, A. V. Hydraulic and pneumatic systems [Text] / A. V. Lepeshkin, A. A. Mihailin, ed. Y. A. Belenkova. – M.: Publishing center "Academy", 2004. – 336 p.