

Колебательный шаговый пневмопривод поворотного действия в упаковочной технике (перспективы использования)

Е.В. Лазарева, к.т.н., Ю.А. Осинский, В.Я. Копп, д.т.н., Севастопольский национальный технический университет, г. Севастополь

Современный этап научно-технического развития упаковочного оборудования характеризуется комплексной автоматизацией производственных процессов, начиная от подачи объекта упаковывания и заканчивая выполнением заключительных операций, связанных с разгрузочно-погрузочными операциями грузовых единиц.

Существует много конструктивных решений механизмов и устройств, которые выполняют операции с остановкой рабочих органов оборудования в промежуточных положениях перемещения. Как правило, остановка происходит при возвратно-поступательном или вращательном движении. Так, для упаковочного оборудования с роторной транспортной системой (рис. 1) необходимо обеспечить точный угол поворота карусели с ее гарантированной остановкой в заданной точке. Роторный функциональный модуль последовательно перемещает продукцию и упаковочный материал по технологическим позициям, количество которых зависит от формы упаковки и вида продукции. Как правило, каждый рабочий орган для выполнения технологической операции дополнительно комплектуется специальным узлом или механизмом точного позиционирования.

Модуль ротора транспортной системы с упаковками имеет немалую массу и габариты, поэтому для начала поворота карусели и обеспечения заданной производительности должен быть приложен значительный крутящий момент.

Конструкции приводов таких механизмов условно можно разделить на две группы: с возвратно-поступательным движением ведущего звена привода, которое преобразуют во вращательное с остановкой (рис. 2), и реже — с вращательным (рис. 3).

Для обеспечения точности остановки сегодня наиболее предпочтительно использовать электрические приводы с шаговым или серводвигателем.

Серводвигатель может обеспечить постоянную скорость и крутящий момент, высокую повторяемость и точность позиционирования. Хорошей альтернативой электросерводвигателям в системах позиционирования являются шаговые двигатели. Однако шаговые двигатели развивают небольшую частоту вращения и не обеспечивают высокую точность позиционирования.

Основной составляющей такого привода является специальная система управления им. Такая система требует применения микропроцессорной техники, что иногда вызывает сложности с их применением.

В данной работе для механизмов с вращательным движением предлагается использовать более простой привод, который по своим техническим характеристикам не уступает

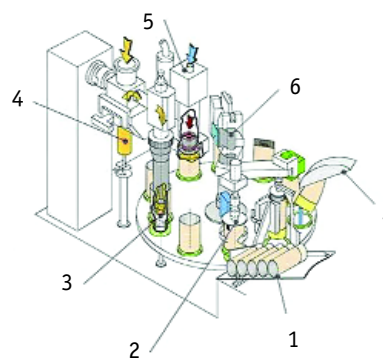


Рис. 1. Конструкция роторной транспортной системы в автомате упаковывания пастообразных продуктов в тубы: 1 — магазин туб; 2 — механизм ориентации туб; 3, 4 — дозатор продукта; 5 — механизм завивки хвостовой части тубы; 6 — механизм нанесения даты; 7 — механизм выдачи готовой тубы

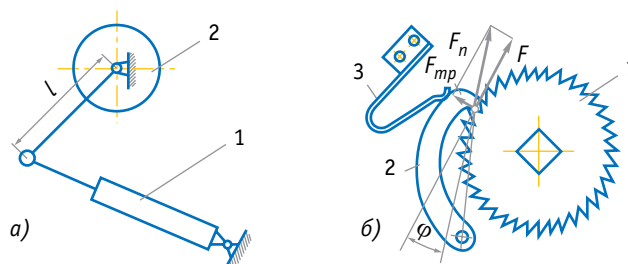


Рис. 2. Схема пневматического привода для роторной транспортной системы: рычажная система для преобразования возвратно-поступательного движения во вращательное (а): 1 — пневмоцилиндр, 2 — храповый механизм; конструкция храпового механизма (б): 1 — храповое колесо, 2 — собачка, 3 — прижимная пружина



Рис. 3. Внешний вид и условные обозначения серво- и шаговых двигателей: серводвигатель (бесщеточный) (а); шаговый мотор (2-фазный) (б)

электроприводу, — шаговый пневмопривод поворотного действия (КШПП).

Целью данной работы было исследование динамических характеристик работы КШПП в упаковочном оборудовании с роторной транспортной системой.

Конструкция КШПП представлена на рис. 4 [1]. Он состоит из корпуса 1 с восемью мембранными приводами 2, расположенными под углом 45° относительно друг друга. Штоки 3 приводов 2 контактируют с шестерней внутреннего зацепления 4, выполняющей роль ведущего элемента. В свою очередь шестерни 4 находятся в зацеплении с валом-шестерней 5, который установлен в подшипниковых

опорах 6, образуя при этом планетарную передачу. В отличие от волновой передачи, ведущий элемент планетарной выполнен жестким, а аналогия этих передач прослеживается в том, что шестерня 4 может совершать только плоскопараллельные круговые колебания. От поворота вокруг собственной оси она фиксируется крестообразной муфтой 7 и прижимной планкой 8 через шарики 9, которые расположены в сепараторах 10 и 11. Люфт всей системы выбирается за счет затяжных винтов 12. Последовательной подачей воздуха в приводы 2 обеспечиваются плоскопараллельные круговые колебания шестерни 4, преобразующиеся во вращение вала-шестерни 5 вокруг собственной оси.

Теоретические динамические характеристики КШПП оценивались при помощи уравнения движения на основании уравнения Лагранжа второго рода, вывод которого подробно приведен в работе [2]. Дифференциальное уравнение, описывающее изменение угла поворота ведущего элемента, имеет вид:

$$\ddot{\alpha}(t) = b \cdot \left(\frac{1}{p_0} \cdot F_{\tau_{\text{рез}}}(t) - \frac{M_c \cdot i}{(1 - K_\varphi) \cdot p_0} \right), \quad (1)$$

где $b = p_0 \cdot r^{-1} \left(m_1 + \frac{J \cdot i^2}{1 - K_\varphi} \right)^{-1}$;

$\alpha(t)$ — угол смещения ведущего элемента;

$F_{\tau_{\text{рез}}}(t)$ — результирующее воздействие, оказываемое на ведущий элемент;

d — диаметр окружности колебаний ведущего элемента ($r = d/2$);

m_1 — масса ведущего элемента;

$J = J_S + m_n \cdot r_n^2$ — момент инерции системы;

J_S — момент инерции ведомого элемента;

m_n — масса нагрузки;

r_n — радиус траектории нагрузки;

$i = 2/D_2$ — коэффициент клиновой передачи «ведущий элемент — ведомый элемент»;

$K_\varphi = \frac{(D_2/d + d/D_2)f}{(f + d/D_2) \cdot D_2/d}$ — коэффициент;

p_0 — установившееся значение силового воздействия, которое оказывает мембранный пневмопривод в режиме «включено»;

$M_c = 9,81 m_n \cdot r_n$ — момент сопротивления, действующий на выходном валу;

$d = D_1 - D_2 = (z_1 - z_2) \cdot m_z$ — диаметр окружности колебаний ведущего элемента;

m_z — модуль зацепления;

$D_1 = z_1 \cdot m_z$ — диаметр ведущего элемента;

$D_2 = z_2 \cdot m_z$ — диаметр ведомого элемента;

f — коэффициент трения.

При совершении одного полного круга колебаний ведущего элемента ведомый элемент поворачивается на угол

$$\gamma^{\text{ок}} = \frac{z_1 - z_2}{z_1} 2\pi.$$

Величина результирующего воздействия, оказываемого на ведущий элемент, определяется тангенциальной $F_\tau(t)$ составляющей суммы управляющих воздействий, создаваемых мембранными пневмоприводами, и суммарной силой трения $F_{\text{тр}}(t)$, которая зависит от нормальной составляющей $F_n(t)$:

$$F_{\tau_{\text{рез}}}(t) = F_\tau(t) - \text{sign}(\dot{\alpha}(t)) \cdot |F_{\text{тр}}(t)|.$$

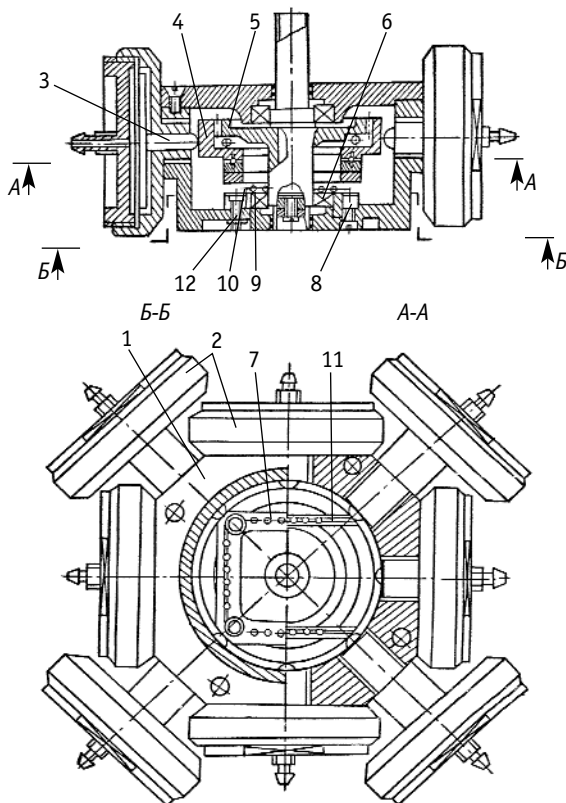


Рис. 4. Конструкция КШПП

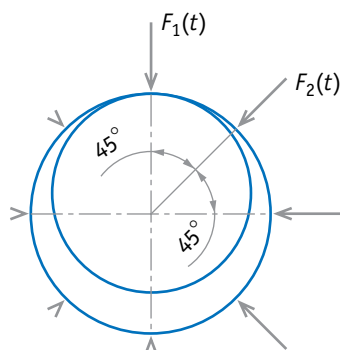


Рис. 5. Схема действия сил в точках расположения восьми пневмоприводов

Величины $F_\tau(t)$ и $F_n(t)$ зависят от проекций управляющей силы на оси OX и OY :

$$\begin{cases} F_\tau(t) = -F_1(t) \cdot \sin \alpha(t) + F_2(t) \cdot \cos \frac{\pi}{4} \cdot (\cos \alpha(t) - \sin \alpha(t)); \\ F_n(t) = F_1(t) \cdot \cos \alpha(t) + F_2(t) \cdot \cos \frac{\pi}{4} \cdot (\sin \alpha(t) + \cos \alpha(t)), \end{cases}$$

где $F_1(t)$ и $F_2(t)$ определяют силу воздействия l -го пневмопривода.

В данной статье рассматривается динамика КШПП с мембранными пневмоприводами (рис. 5), расположенными под углом 45° относительно друг друга.

Для данного случая управления, в соответствии с [2], суммарная сила трения определяется тангенциальной $F_\tau(t)$ и нормальной $F_n(t)$ составляющими суммы управляющих воздействий и силами трения между штоками мембранных пневмоприводов и ведущим элементом:

$$F_{TP}(t) = 2f \cdot \left(F_1(t) + \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot F_2(t) \right) \cdot \cos(\alpha(t)).$$

Так как $F_1(t) \geq 0$, $F_2(t) \geq 0$, а на интервале значений $0 \leq \alpha(t) \leq \frac{\pi}{4}$ выполняется условие $\frac{\sqrt{2}}{2} \geq \cos(\alpha(t)) \geq 0$, то $F_{TP}(t) \geq 0$ и, следовательно, $|F_{TP}(t)| \equiv F_{TP}(t)$. Таким образом:

$$\begin{aligned} F_{\tau_{\text{рез}}}(t) &= \frac{\sqrt{2}}{2} F_2(t) \cdot \cos \alpha(t) - \left(F_1(t) + \frac{\sqrt{2}}{2} F_2(t) \right) \cdot \sin \alpha(t) - \\ &- 2f \cdot \text{sign}(\dot{\alpha}(t)) \cdot \left(F_1(t) + \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot F_2(t) \right) \cdot \cos(\alpha(t)). \end{aligned} \quad (2)$$

Переключение пневмоприводов может осуществляться только в определенные моменты t_k из дискретного множества $\{t_k: t_k = t_0 + k \cdot \frac{1}{\nu}; k = 0, 1, 2, \dots\}$, которое зависит от частоты срабатывания пневмоприводов, определяемой техническими возможностями пневмопривода ($\nu \in [80 \div 120]$ Гц).

Управление, оказываемое l -м пневмоприводом на интервале времени $t \in [t_k; t_{k+1}]$, определяется соотношением:

$$\begin{aligned} F_l(t) - F_l(t_k) &= p_0 \cdot [F_{lf} + a_0 e^{\lambda_0(t-t_k)} + a_1 e^{\lambda_1(t-t_k)} + \\ &+ a_2 e^{\lambda_2(t-t_k)} + a_3 e^{\lambda_3(t-t_k)} + a_4 e^{\lambda_4(t-t_k)}] \cdot u_l(t_k), \end{aligned}$$

где $u_l(t_k) \in \{0; 1\}$ — величина, отражающая осуществление в данный момент времени силового воздействия l -м пневмоприводом, которая принимает одно из двух значений $\{0; 1\}$ («0» — привод отключен; «1» — включен);

F_{lf} — коэффициент, принимающий одно из двух значений: $F_{lf} = 0$, если пневмопривод работает на опорожнение, и $F_{lf} = 1$, если пневмопривод работает на наполнение;

a_i , $i = 0, 1, \dots, 4$ — коэффициенты (в общем случае — комплексно-сопряженные) разложения функции управления по экспоненциальным функциям с соответствующими показателями λ_i , которые также могут принимать два варианта значений в зависимости от того, на опорожнение или на наполнение работает l -й пневмопривод.

Поскольку определение точного значения p_0 весьма затруднительно, то, на наш взгляд, при построении закона управления следует учитывать только сам факт включения/выключения l -го пневмопривода.

После линеаризации получаем, что на интервале $t \in [t_k; t_{k+1}]$ динамика исходной нелинейной системы достаточно адекватно описывается дифференциальным уравнением в нормальной форме Коши:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} y(t) &= A(t_k) \cdot y(t); \\ \alpha(t) &= C \cdot y(t), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{где } y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \alpha(t) \\ \dot{\alpha}(t) \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} y_1(t_0) \\ y_2(t_0) \\ y_3(t_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha(t_0) - \alpha_f \\ \dot{\alpha}(t_0) \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$A(t_k) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ b \cdot a(t_k) & 0 & b \cdot c(t_k) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\begin{aligned} a(t_k) &= - \left((1 + \eta(t_k) \cdot 2f) \cdot \cos(\alpha_f) \cdot u_1(t_k) + \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot ((1 + \eta(t_k) \cdot 2f) \times \right. \\ &\times \cos(\alpha_f) - \sin(\alpha_f)) \cdot u_2(t_k); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c(t_k) &= \left(- (1 + \eta(t_k) \cdot 2f) \cdot \sin(\alpha_f) \cdot u_1(t_k) + \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot (\cos(\alpha_f) - (1 + \eta(t_k) \times \right. \\ &\times 2f) \cdot \sin(\alpha_f)) \cdot u_2(t_k) \Big) - \frac{M_c \cdot i}{(1 - K_\phi) \cdot p_0}; \end{aligned}$$

$$\eta(t_k) = \begin{cases} -1, & \dot{\alpha}(t) < 0, \quad \forall t \in [t_k; t_{k+1}]; \\ +1, & \dot{\alpha}(t) > 0, \quad \forall t \in [t_k; t_{k+1}]; \\ 0, & \exists t: \dot{\alpha}(t) = 0, \quad t \in [t_k; t_{k+1}]; \end{cases}$$

$$C = [1 \quad 0 \quad \alpha_f].$$

В задаче конструирования требуется произвести поворот ведущего элемента из начального положения $\alpha(t_0) = \alpha_0$ в конечное $\alpha(t_f) = \alpha_f$ (где t_f — момент окончания переходного процесса), осуществив остановку в этой конечной позиции (то есть $\dot{\alpha}(t_f) = 0$, $\ddot{\alpha}(t_f) = 0$). Классические задачи проектирования системы автоматического управления (САУ) предполагают построение регулятора посредством выбора вида линейного закона управления (интегрального, пропорционального, дифференциального, их разновидности) и величины коэффициентов управления. Важная отличительная черта исследуемой САУ состоит в необходимости реализовать управление путем выбора на дискретном множестве моментов времени t_k величин двух переменных $u_1(t_k)$ и $u_2(t_k)$ из множества значений $\{0; 1\}$. Управление системой такого вида рассматривалось в работе [3]. Усовершенствуем метод управления, предложенный в [3]. Очевидно, что осуществить изменение сил $F_1(t)$ и $F_2(t)$ во времени так, чтобы закон изменения $F_{\tau_{\text{рез}}}(t)$ (или хотя бы ее основной составляющей $F_\tau(t)$) соответствовал линейному закону

управления, физически невозможно. Однако представляется возможным максимально приблизить нелинейное функционирование управляющих механизмов к желаемому линейному. Предлагается следующий подход:

1. Осуществляется проектирование абстрактной идеальной линейной САУ:

$$\ddot{\beta}(t) = b \cdot \gamma(t), \quad (4)$$

где β — идеальное значение угла смещения ведущего элемента; $\gamma(t)$ — идеальное управление, соответствующее линейному закону управления:

$$\gamma(t) = K_1 \cdot (\beta(t) - \alpha_f) + K_2 \cdot \dot{\beta}(t). \quad (5)$$

Построение регулятора для абстрактной системы (4) осуществляется методом линейно-квадратической оптимизации.

2. Управление пневмоприводами осуществляется так, чтобы функционирование реальной САУ на каждом из дискретных участков $t \in [t_k; t_{k+1}]$ было максимально приближено к функционированию абстрактной (4):

$$\alpha(t) \rightarrow \beta(t), \quad \forall t \in [t_k; t_{k+1}]; \quad \beta(t_k) = \alpha(t_k), \quad \dot{\beta}(t_k) = \dot{\alpha}(t_k),$$

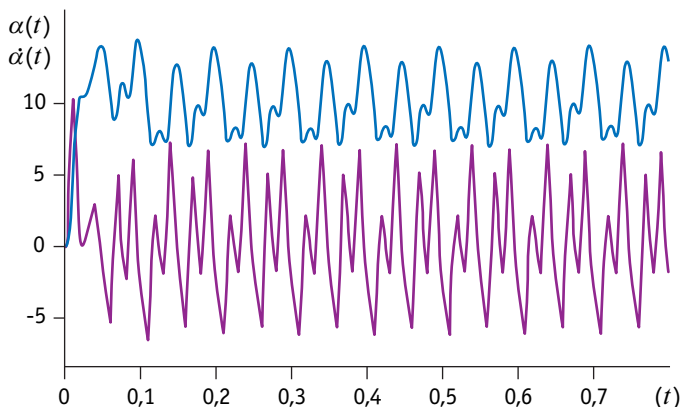


Рис. 6. Результаты моделирования динамики КШПП: $\alpha(t)$ (—); $\dot{\alpha}(t)$ (—)

то есть осуществляется включение/выключение пневмоприводов в соответствии с:

$$F_{\tau_{\text{рез}}}(t) - \frac{M_c \cdot i}{1 - K_{\phi}} \rightarrow p_0 \cdot \gamma(t).$$

Решением задачи проектирования является выбор коэффициентов $u_1(t_k)$ и $u_2(t_k)$, обеспечивающий оптимальное с некоторой точки зрения приближение протекания процессов в реальной САУ (1) к протеканию процессов в идеальной САУ (4).

С целью обеспечения в режиме реального времени выбора управления в виде обратной связи на основе данных о положении и скорости ведущего элемента в момент t_k , получаемых с датчиков, заменим исходную нелинейную систему дифференциальных уравнений (1) на систему, полученную в процессе линеаризации (3).

Очевиден один из критериев выбора коэффициентов $u_i(t_k)$, обеспечивающий наиболее близкое совпадение траекторий реальной и идеальной систем, минимизирующий ошибку по положению:

$$\varepsilon(k) = q_0 \cdot |\alpha(t_{k+1}) - \beta(t_{k+1})| + q_1 \cdot |\dot{\alpha}(t_{k+1}) - \dot{\beta}(t_{k+1})|. \quad (6)$$

где $\alpha, \dot{\alpha}$ — значения угла и скорости смещения ведущего элемента;

$\beta, \dot{\beta}$ — идеальные значения угла и скорости смещения ведущего элемента;

q_0, q_1 — коэффициенты, определяющие вес ошибки по позиции и скорости соответственно.

Для реализации предложенного метода следует перед началом работы определить все допустимые значения управления $u_i(t_k)$ и соответствующие им $\varepsilon_i(k)$ на интервалах $t \in [t_k; t_{k+1}]$, обеспечивающих остановку в требуемой позиции. При построении управления следует из возможных выбрать вариант с наименьшей ошибкой $\varepsilon_i(k)$.

Основное отличие изложенного выше метода от метода из работы [3] состоит в том, что выбор управления на текущем шаге t_k осуществляется сравнением реального состояния САУ не с желаемым конечным состоянием, а с текущим состоянием идеализированной линейной САУ.

Ниже представлен пример моделирования динамики колебательного шагового пневмопривода поворотного действия с программным управлением. Исследовался привод с параметрами: $m_1 = 0,522$ кг; $J_S = 0,00515$ Н·м²; $m_3 = 0,34$ кг; $r_3 = 0,1$ м; $f = 0,08$; $z_1 = 158$; $z_2 = 150$; $m_z = 0,0003$ м; $p_0 = 208$ Н; $\alpha_f = 11^\circ$.

Коэффициенты критерия качества: $Q_{11} = 10^3$; $Q_{22} = 1$; $R = 1$. Пневматический привод, исходя из его динамики, представлялся звеном, характеризующимся параметрами p_0 и λ, a_i ($i = 0, 4$). Параметры λ, a_i выбирались на основании идентификации указанного объекта, исходя из кривой переходного процесса изменения давления в его полости. Параметры работы пневмопривода, работающего на наполнение: $F_{ff} = 1$; $a_0 = -2,052$; $a_1 = a_2 = -1,47$; $a_3 = -a_4 = -7,35i$; $\lambda_0 = -414,46$; $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = -153,03 - 88,58i$, а на опорожнение: $F_{ff} = 0$; $a_0 = 2,477 \cdot 10^{-3}$; $a_1 = a_2 = 2,5$; $a_3 = -a_4 = 5,0i$; $\lambda_0 = -7972,76$; $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = -154,80 - 79,51i$.

Результаты моделирования динамики КШПП представлены на рис. 6.

Выводы

Результаты исследования наглядно доказывают возможность и эффективность применения шагового пневмопривода поворотного действия для упаковочного оборудования с роторной транспортной системой и возможностью осуществлять позиционирование в произвольной точке за счет введения обратной связи. Дополнительное использование оптимального регулятора в системе управления, позволяет уменьшить отклонения в точности позиционирования на 15–25 %.

В дальнейшем предполагается исследовать поведение КШПП в других режимах работы и с управлением, в котором принимают участие более двух мембранных приводов.

Литература

1. *Konn В.Я.* Пневматические модульные манипуляторы в сборочном производстве / В.Я. Копп // Машиностроительное производство. Сер. Автоматизация производства, гибкие производственные системы, робототехника. — М.: ВНИИТУЭМР, 1989. — Вып. 1. — С. 52.
2. *Konn В.Я.* Колебательные шаговые пневмоприводы / В.Я. Копп, Ю.А. Осинский, В.В. Полищев // Оптимизация производственных процессов: Сб. научн. тр. — Севастополь, 2007. — Вып. 10. — С. 15–20.

3. *Осинский Ю.А.* Цифровая система автоматического управления (САУ) колебательным шаговым пневмоприводом поворотного действия / Ю.А. Осинский, В.Я. Копп, Е.В. Лазарева, В.О. Филиппович // Системные технологии. — Днепрпетровск, 2011. — № 3(74). — С. 94–102.

4. *Квакернаак Х.* Линейные оптимальные системы управления / Х. Квакернаак, Р. Сиван. — М.: Наука, 1977. — 650 с.

Коливальний кроковий пневмопривід поворотної дії у пакувальній техніці

(перспективи використання)

Є.В. Лазарева, к.т.н., Ю.А. Осинський, В.Я. Копп, д.т.н.

У статті розглядається можливість реалізації повороту робочих органів пакувального обладнання на заданий кут за допомогою коливального крокового пневмопривода поворотної дії.

Ключові слова: пакувальне обладнання; коливальний кроковий пневмопривід; системи управління; програмне управління; механізм повороту каруселі.

Oscillatory step pneumatic actuator of the packaging technology (prospects of use)

K.V. Lazareva, Ph.D., Y.A. Osinsky, V.Y. Kopp, Dr.

The method of creation of an optimal automatic control system by an angle of rotation of a conducted element of oscillatory stepper pneumatic drive.

Key words: packaging equipment; oscillating step pneumatic actuator; control system; software; the mechanism of rotation carousel.



Главное событие лабораторной индустрии
Международный форум «Комплексное обеспечение лабораторий»

LABComplex 2011

4-я Международная специализированная выставка комплексного обеспечения лабораторий

27.09 – 30.09.2011

КИЕВ ЕКСПО ПЛАЗА
Киев, ул. Салютная, 2-Б (ст. метро "Ливий")

Организаторы:  

Соорганизаторы: 

При поддержке: 

LABComplex это:

- Крупнейший Международный форум, определяющий стратегический вектор развития лабораторной индустрии Украины
- Ведущая брендовая выставка Украины, объединяющая интересы операторов рынка и потребителей
- Концентрация мировых достижений и научно-технических трендов в области обеспечения лабораторий
- Бизнес-площадка для решения комплексных маркетинговых задач

Специализированные экспозиции:

- «LABComplex–Наука и Образование»
- «LABComplex–Промышленность»
- «LABComplex–Агро»
- «LABComplex–Медицина»
- «LABComplex–Фарма»

В рамках деловой программы Форума*

- Научно-практическая конференция «Современный менеджмент медицинских лабораторий»
- III Научно-практическая конференция «Новейшие разработки научного оборудования ведущих приборостроительных компаний. Развитие центров коллективного пользования в НАН Украины»
- Круглый стол «Качественное молоко от населения: возможно ли это? (организационные и технические составляющие улучшения качества молока)»
- Семинар «Лабораторные исследования как инструмент мониторинга безопасности животных и продуктов животного происхождения»
- Специализированные DEMO-ТУРЫ LABComplex-2011. Программа DEMO-ТУРОВ на сайте www.labcomplex.com

Генеральный инвестор: 

Генеральный спонсор: 

Партнеры:    

Спонсоры:       

Контактная информация: Компания LMT Corporation
Тел.: +380 44 526 94 87, Тел./Факс: +380 44 526 92 89, e-mail: sales@lmt.kiev.ua, lmt@lmt.kiev.ua

Официальный информационный сайт: www.labcomplex.com

Официальный интернет-портал: 

Информационная поддержка: 

www.labcomplex.com