



СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ НА БАЗЕ ШИРОКОПРЕДЕЛЬНЫХ СЛЕДЯЩИХ СТРУЙНЫХ ДАТЧИКОВ

Б.В. Лесной, А.С. Сергеев (Волгоградский государственный технический университет)

Рассмотрена эффективность применения широкопредельных следящих струйных датчиков для систем автоматизированного контроля. Исследованы функциональные модели пневмодатчиков в зависимости от влияющих факторов. Полученные результаты могут быть использованы для оценки переходных процессов, амплитудных погрешностей и фазовых ошибок, а также метрологических характеристик следящих пневмодатчиков, применяемых в автоматизированных системах контроля.

Ключевые слова: широкопредельный следящий струйный датчик, система автоматизированного контроля, метрологические характеристики, переходный процесс, передаточная функция, погрешность слежения.

Вопросы обеспечения качества деталей, изделий и готовой продукции не могут быть решены без применения автоматизированных систем с использованием надежных и точных методов и средств контроля. При этом точность и эксплуатационные качества систем автоматизированного контроля зависят как от выбора схем контроля, так в значительной степени и от их конструктивного исполнения. Особое внимание уделяют вопросам выбора рациональной компоновки системы в целом, а также конструктивному решению отдельных узлов.

Применение различного рода преобразователей позволяет создавать системы автоматизированного контроля, в которых датчики обеспечивают получение требуемой измерительной информации о параметрах геометрических форм и расположения поверхностей контролируемых изделий, в том числе с возможностью, например, вращения поверхностей на контрольно-измерительной позиции при автоматизации процессов контроля различных объектов.

В этом случае могут применяться дифференциальные схемы с использованием преобразователей, расположенных диаметрально противоположно и включенных в дифференциальную измерительную цепь. При этом осуществляется контроль геометрических параметров шлифовального круга, таких как: высота,

непараллельность его торцов, диаметр и овальность посадочного отверстия, диаметр и биения наружной поверхности, профиль внешней образующей, профиль посадочного отверстия в осевом сечении и т.д., что позволяет составить наиболее полную картину геометрии поверхностей контролируемого изделия.

Однако для ряда объектов со значительными отклонениями положения геометрических поверхностей, неоднородным расположением их баз, в условиях запыленности, влияния вибраций и других возмущающих факторов применение контактных и ряда бесконтактных методов и средств контроля является невозможным или недопустимым. В этих случаях эффективными могут быть методы бесконтактного контроля с применением широкопредельных следящих струйных датчиков (в дальнейшем пневмодатчиков), обладающих рядом преимуществ: бесконтактностью измерений, достаточной чувствительностью, широким диапазоном измерений, возможностью построения измерительных устройств с реализацией различных методов измерений и т.д.

В приборах для автоматизированного контроля размеров измеренные значения линейных перемещений обычно преобразовываются в другие виды энергии, удобные для дистанционных измерений, а также для связи с системами автоматического регулирования ТП. Обычно измерительный импульс преобразовывают в электрический сигнал как наиболее универсальный и удобный для управления исполнительными органами оборудования и оперативной оценки состояния ТП [1].

В этих случаях применение пневмодатчиков совместно с вторичными преобразователями с последующим подключением их к модулям аналогового ввода/вывода позволяет не только преобразовывать измерительный сигнал в электрический, но и получать информацию о параметрах объектов в цифровом виде, а также обрабатывать ее на ЭВМ.

На рис. 1 представлен один из возможных вариантов конструктивной реализации пневмодатчика. Стабилизированное давление питания P подается по каналу 8 через калиброванные ниппели 9 в измерительную

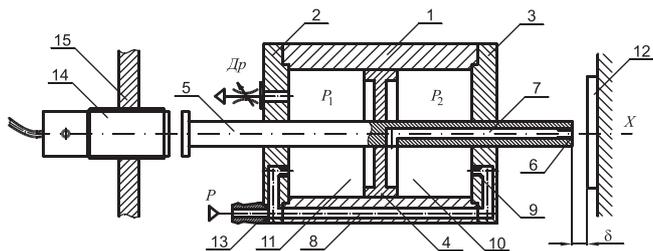


Рис. 1. Поршневой широкопредельный следящий струйный датчик,

где 1 – корпус; 2, 3 – крышки; 4 – поршень; 5 – шток; 6 – измерительное сопло; 7, 8 – каналы; 9 – калиброванные ниппели; 10 – измерительная камера; 11 – камера противодействия; 12 – измеряемая поверхность; 13 – ниппель; 14 – вторичный преобразователь; 15 – стойка

камеру 10 и камеру противодействия 11, в которых создаются давления P_1 и P_2 соответственно. Положение поршня 4 со штоком 5 в направлении оси X определяется соотношением расходов воздуха истекающего через регулируемый дроссель Dp и дроссель, реализуемый в виде измерительного сопла 6, взаимодействующего через струю истекающего сжатого воздуха с торцом контролируемой поверхности изделия 12. Перемещение торца штока 5 отслеживается вторичным преобразователем 14, работающим по принципу преобразования значения расстояния между активной поверхностью датчика и объектом воздействия в величину токового сигнала на выходе, закрепленным в стойке 15.

При изменении положения контролируемого объекта 12 в направлении оси X давление в измерительной камере 10 изменяется, что вызывает соответствующее перемещение поршня 4 со штоком 5 в сторону меньшего давления. Таким образом, измерительное сопло автоматически следит за положением контролируемой поверхности 12 при ее перемещении. Такое состояние динамично, так как камеры 10 и 11 связаны между собой, и выравнивание давлений в этих камерах при изменении зазора δ происходит с запаздыванием на время слежения.

Степень надежности и точности систем автоматизированного контроля определяется точностными и динамическими параметрами, а также метрологическими характеристиками пневмодатчиков, применяемых при автоматизации процессов контроля.

Это означает, что средства контроля, применяемые в таких системах, должны обеспечивать требуемые показатели, определяющие эффективность функционирования всей системы автоматизированного контроля. Таким образом, встает задача отыскания и аналитического исследования моделей функционирования пневмодатчиков для решения задач выбора оптимальных режимов работы пневмодатчиков и оценки их нормируемых метрологических характеристик.

Для оценки погрешности слежения в зависимости от различных факторов составим систему дифференциальных уравнений, описывающих рабочий процесс пневмодатчика. Введем следующие упрощения для дальнейшего описания математической модели: процессы истечения воздуха через дроссели в переходном режиме являются квазистатическими, рабочее тело (сжатый воздух) подчиняется законам идеального газа, изменение параметров сжатого воздуха в камерах пневмодатчика в переходном режиме происходит по изотермическому закону, связь между параметрами сжатого воздуха в отдельных сечениях каналов принимается адиабатной.

При смещении поршня в результате внешнего воздействия, например вправо, объем измерительной камеры уменьшится, а камеры противодействия увеличится. Выведем систему уравнений, описывающих динамику процесса, обусловленную изменением емкостей камер при смещении поршня на величину X от среднего положения.

Масса воздуха m , заключенная в измерительной камере и камере противодействия, для фиксированного значения X выражается следующими зависимостями:

$$m_1 = f \cdot (H - X) \cdot \rho_1, \quad (1)$$

$$m_2 = f \cdot (H + X) \cdot \rho_2, \quad (2)$$

где f – площадь поршня ρ_1 и ρ_2 – плотность воздуха в измерительной камере и камере противодействия (переменные параметры), H – половина максимального возможного хода поршня, X – величина перемещения поршня вдоль оси x .

Продифференцировав выражения (1) и (2), получим приращения массовых количеств воздуха в каждой из камер:

$$dm_1 = f \cdot (H - X)d\rho_1 - f \cdot \rho_1 dX, \quad (3)$$

$$dm_2 = f \cdot (H + X)d\rho_2 + f \cdot \rho_2 dX. \quad (4)$$

Эти приращения выражаем через разность массовых расходов воздуха, поступающего в камеры и истекающего из них:

$$dm_1 = (M_1 - M_3)dt, \quad (5)$$

$$dm_2 = (M_2 - M_4)dt, \quad (6)$$

где M_1 и M_2 – массовые расходы воздуха, поступающие в измерительную камеру и камеру противодействия соответственно, M_3 и M_4 – массовые расходы воздуха, истекающие из измерительной камеры и камеры противодействия соответственно.

Сравнивая выражения (3), (4), (5) и (6) для одних и тех же приращений массовых количеств воздуха в каждой из камер и применяя уравнение состояния газа для изотермического закона изменения параметров состояния воздуха, получим:

$$(M_1 - M_3)dt = \rho \cdot f \left[(H - X)d \left(\frac{P_1}{P} \right) - \frac{P_1}{P} dX \right], \quad (7)$$

$$(M_2 - M_4)dt = \rho \cdot f \left[(H + X)d \left(\frac{P_2}{P} \right) + \frac{P_2}{P} dX \right], \quad (8)$$

где ρ – плотность питающего воздуха, P_1 – давление воздуха в измерительной камере, P_2 – давление воздуха в камере противодействия, P – давление питающего воздуха.

С целью упрощения дальнейших выводов в работе [2] предлагается определить массовые расходы воздуха, входящие в уравнения (7) и (8), по приближенным формулам. Однако систему уравнений (7) и (8) можно решить аналитическим путем, применяя уравнение Менделеева-Клапейрона [3]:

$$P \cdot V = m/\mu \cdot R \cdot T, \quad (9)$$

где V – объем, занимаемый массой газа μ – молярная масса воздуха R – универсальная газовая постоянная T – абсолютная температура.

Выражая параметры состояния воздуха с помощью формулы (9) для каждой из камер пневмодатчика и подставляя их в уравнения (7) и (8) составим систему дифференциальных уравнений:

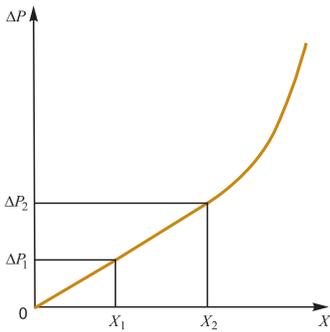


Рис. 2. График зависимости разности давлений ΔP от перемещения поршня X

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{P_1}{P} \right) = A \cdot \frac{P_1}{P} + \frac{1}{H-X} \cdot \frac{P_1}{P} \frac{dX}{dt}, \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{P_2}{P} \right) = A \cdot \frac{P_2}{P} - \frac{1}{H+X} \cdot \frac{P_2}{P} \frac{dX}{dt}, \quad (11)$$

где $A = \frac{P\mu}{\rho \cdot R \cdot T \cdot t}$.

Решая систему дифференциальных уравнений (10) и (11) получим:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 2 \cdot H \cdot P \cdot \frac{X}{H^2 - X^2} \cdot e^{\frac{P \cdot \mu}{\rho \cdot R \cdot T}}. \quad (12)$$

Выражение (12) характеризует закон изменения давлений в камерах пневмодатчика в функции перемещения поршня (рис. 2).

Рассмотренная модель не позволяет исследовать динамические параметры переходных процессов пневмодатчика. С этой целью рассмотрим модель пневмодатчика в виде колебательной системы с двусторонней упруго-демпферной подвеской, в которой упругие свойства системы (жесткость κ_1 и κ_2) определяют изменение давлений в полостях измерительной камеры P_1 и камеры противодействия P_2 , а демпферные свойства системы определяют коэффициент демпфирования b , характеризующий скорость перераспределения рабочей среды между камерами пневмодатчика при перемещении поршня (рис. 3).

Сила F характеризует силу взаимодействия измерительного сопла с контролируемой поверхностью и является возмущающей силой. Рассмотрим простейший случай с возмущающей силой F изменяющейся по гармоническому закону.

Уравнение движения системы имеет вид:

$$\ddot{x} + 2 \cdot \eta \cdot \dot{x} \omega_0^2 \cdot x = \frac{F}{M} \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t),$$

где η – коэффициент затухания колебаний, ω_0 – собственная частота колебательной системы, M – масса подвижных частей пневмодатчика, n – номер гармоники, ω – частота возмущающей силы, t – время.

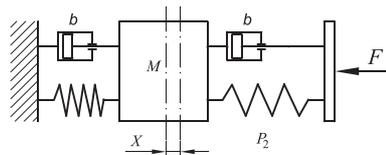


Рис. 3. Модель следящего пневмодатчика

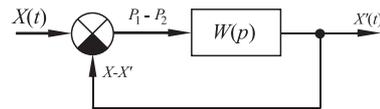


Рис. 4. Следящая замкнутая система пневмодатчика

При этом коэффициент затухания колебаний η определяется как:

$$\eta = b/2M,$$

где b – коэффициент демпфирования.

Зная коэффициент затухания колебаний η , можно найти время переходного процесса (время слежения) системы $t_{пер}$ в зависимости от изменения массы подвижных частей датчика M , однако это время будет найдено весьма приблизительно. В работе [2] предлагались варианты упрощенного решения систем уравнений, описывающих динамику пневмодатчика на аналоговой вычислительной машине численным методом за счет подбора постоянных коэффициентов соответствующих определенному режиму работы пневмодатчика.

В настоящей работе предлагается исследовать динамические параметры переходных процессов пневмодатчика за счет построения его модели на основе непрерывной автоматической следящей замкнутой системы с отрицательной обратной связью по перемещению (рис. 4).

Перемещение поршня под действием разности сил давления воздуха описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$M \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + f \cdot v \frac{dx}{dt} + C \cdot x = f \cdot (P_2 - P_1), \quad (13)$$

где v – коэффициент вязкого трения, C – механическая жесткость системы ($C = \kappa_2 - \kappa_1$).

Применяя преобразование Лапласа, с учетом выражения (13) находим передаточную функцию системы $W(p)$:

$$W(p) = \frac{\frac{f}{C}}{\frac{M}{C} p^2 + \frac{b}{C} p + 1} = \frac{\kappa}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}.$$

При этом жесткость системы (рис. 4) определяется из ранее найденной зависимости (12):

$$C = \kappa_2 - \kappa_1 = \frac{\Delta P_2 - \Delta P_1}{X_2 - X_1} \cdot f.$$

Резюмируя вышеизложенное следует отметить, что применяя модель пневмодатчика в виде непрерывной следящей замкнутой системы, задавая необходимые параметры пневмодатчика, можно исследовать передаточную функцию выходного звена.

Эта модель дает возможность построения переходных (рис. 5) и амплитудно-фазовых характеристик (рис. 6), определить время переходных процессов, амплитудные погрешности и фазовые ошибки, а сама методика определения сводится к расчету основных параметров выходного звена и последующему исследованию передаточной функции системы на ЭВМ.

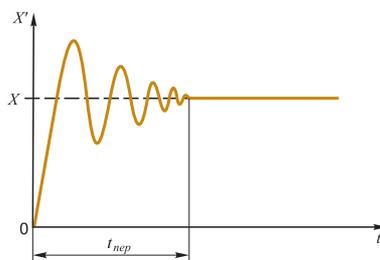


Рис. 5. Переходная характеристика системы

Для исследования статических, динамических и оценки нормируемых метрологических характеристик в лаборатории кафедры "Автоматизация производственных процессов" Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ) была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка (рис. 7). Целью проведения

экспериментальных исследований являлась проверка адекватности теоретических моделей и оценка сходимости экспериментальных данных с теоретическими. Базовыми элементами установки являются: следящий пневмодатчик 1, закрепленный на стойке 2, двигатель постоянного тока 6 модели СЛ-267, редуктор 7 с эксцентриком 8. Воздух от компрессора (на рис. 9 не показан), через блок подготовки воздуха 9, подается по трубопроводам 10 к следящему пневмодатчику 1. Давление в камере подпора регулируется дросселем 11. Обороты двигателя задаются латером 12, при этом напряжение питания двигателя фиксируется вольтметром 13. В качестве вторичного преобразователя используется бесконтактный датчик положения 3 ДПА-М30-76У-1110-Н с аналоговым выходом, который в свою очередь через модуль аналогового ввода/вывода 4 модели ADB13x140 подключается к ПК 5, в результате вся информация отображается на экране. Эксцентрик 8 представляет собой подшипник с эксцентричной установкой относительно оси вращения, при этом амплитуда, воспроизводимая эксцентриком 8 при его вращении от двигателя 6 через ременную передачу и редуктор 7 может регулироваться поворотом подшипника относительно своей оси. С помощью дросселя 11 меняется давление в камере подпора, что позволяет устанавливать технологические зазоры между соплом пневмодатчика и контроли-



Рис. 7. Экспериментальная установка, где 1 – широкопредельный струйный датчик; 2 – стойка; 3 – бесконтактный датчик положения ДПА-М30-76У-1110-Н с аналоговым выходом (индуктивный); 4 – модуль аналогового ввода/вывода ADB13x140; 5 – ПК; 6 – двигатель постоянного тока СЛ-267; 7 – редуктор; 8 – эксцентрик; 9 – блок подготовки воздуха; 10 – трубопроводы; 11 – дроссель; 12 – латер; 13 – вольтметр

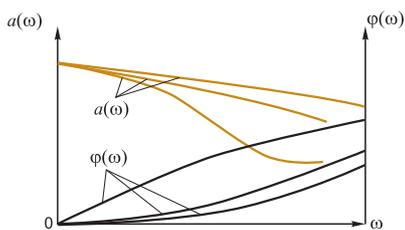


Рис. 6. Амплитудно-фазовые характеристики системы

руемой поверхностью, и проводить исследования при различных значениях этих зазоров.

Учитывая значительное число факторов и широкие пределы их изменения, определяющие возможные рабочие режимы следящих пневмодатчиков, которые в свою очередь влияют на их метрологические и динамические характеристики, в таблице приведены

основные характеристики и показатели точности измерения одной из конструктивных реализаций следящего пневмодатчика для оптимальных его рабочих параметров (давление в питающей магистрали $P = 0,15$ МПа, измерительный зазор $\delta = 150$ мкм, температура $T = 20$ °С).

Более подробные результаты экспериментальных исследований, включающие исследование основных характеристик, показателей точности измерения и определение нормируемых метрологических характеристик следящего пневмодатчика данной конструктивной реализации для всего диапазона основных рабочих параметров, будут приведены в следующей публикации.

Установка для комплексного контроля геометрических параметров шлифовальных кругов $\varnothing 750 \dots 1060$ мм, нормируемых ГОСТ 2424-83 (наружный диаметр, диаметр посадочного отверстия, смещение оси отверстия относительно номинального расположения, радиальное биение, торцовое биение и др.), построенная по схеме рис. 8 с применением следящих пневмодатчиков, апробировалась на Волжском предприятии ОАО "Волжский Абразивный Завод" и показала эффектив-

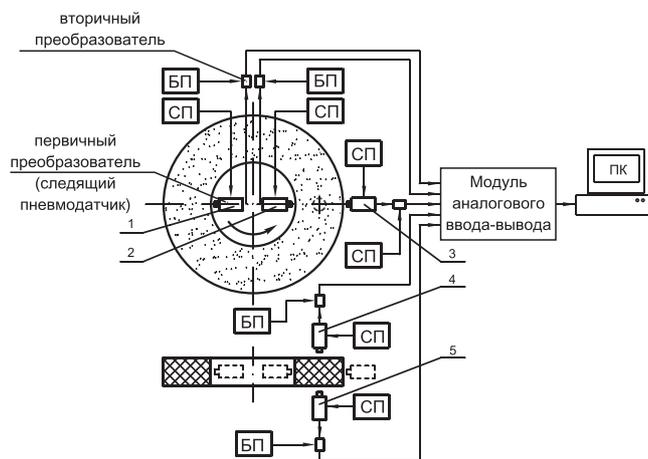


Рис. 8. Схема автоматизированного контроля геометрических параметров шлифовального круга, где БП – блок питания вторичного преобразователя, СП – схема питания следящего пневмодатчика, 1, 2, 3, 4, 5 – следящие пневмодатчики

Таблица. Основные характеристики и показатели точности измерения следящего пневмодатчика

Диапазон измерений, мм	Порог чувствительности, мм	Минимальная абсолютная погрешность, мкм	Минимальная основная приведенная погрешность, %	Минимальная относительная погрешность, %
12	0,005	4	0,5	0,31

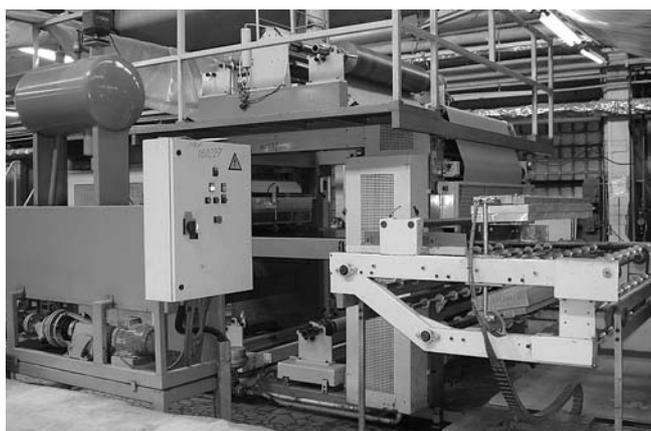


Рис. 9. Автоматическая линия производства древесно-стружечных плит Bison

ность своего применения. На предприятии остро стоял вопрос обеспечения надежной работы первичных преобразователей в условиях запыленности, влияния вибраций и других возмущающих факторов, возникающих в процессе доводки кругов. Мониторинг геометрических параметров шлифовальных кругов осуществлялся с помощью оптических преобразователей, которые в свою очередь не обеспечивали надежную работу установок ввиду наличия указанных выше факторов. Применение следящих пневмодатчиков позволило решить эту проблему.

Установка функционирует следующим образом: шлифовальный круг вращается на контрольно-измерительной позиции вокруг своей оси, при этом следящие пневмодатчики 1 и 2 осуществляют контроль диаметра посадочного отверстия, пневмодатчик 3 – контроль наружного диаметра, следящие пневмодатчики 2 и 3 – радиальное биение и смещение оси отверстия относительно номинального расположения, пневмодатчики 4 и 5 – ширину шлифовального круга и торцовое биение. Следует отметить существенное преимущество реализации такой схемы контроля шлифовальных кругов, поскольку она не требует точного базирования шлифовального круга на измерительной позиции, так как следящие пневмодатчики 1-2, 2-3 и 4-5 работают по дифференциальной схеме измерения.

Минимальная стоимость реализации предлагаемой системы измерения (одной единицы) в установке для контроля шлифовальных кругов составила 34000 руб., при этом годовая экономия производственных затрат при использовании систем данного рода составила 184000 руб.

Кроме того, широкая универсальность следящих пневмодатчиков позволила апробировать их на предприятии ОАО "Волгоградмебель", завод им. Ерманна, применительно к контролю и сортировке древесно-стружечных плит в соответствии с требованиями ГОСТ 10632-89 (размеры плиты, допуск по

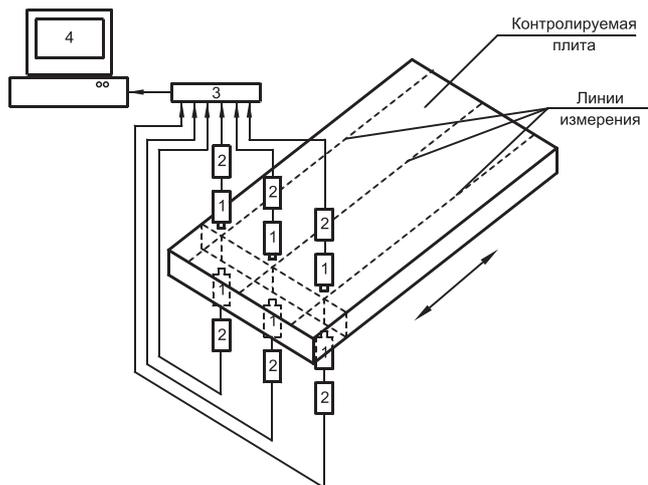


Рис. 10. Схема реализации контрольно-сортировочных операций древесно-стружечных плит с применением следящих пневмодатчиков, где 1 – следящий пневмодатчик, 2 – вторичный преобразователь, 3 – контроллер, 4 – дисплей оператора

длине, ширине, толщине, разность диагоналей, выступы, царапины, сколы кромок, выкрашивание углов, дефекты шлифования, включения коры, включения крупной стружки и др.) на автоматической линии Bison (рис. 9). До этого момента контроль и сортировка древесно-стружечных плит производилась вручную.

Схема реализации контрольно-сортировочных операций с применением следящих пневмодатчиков представлена на рис. 10 и включает шесть следящих пневмодатчиков 1 и шесть вторичных преобразователей 2, расположенных на трех линиях измерения с дифференциальной схемой их включения снизу и сверху плиты. Сигналы от датчиков поступают на контроллер 3 и считываются по программе с выводом информации на дисплей оператора 4.

Минимальная стоимость реализации предлагаемой системы измерения (одной единицы) применительно к контролю и сортировке древесно-стружечных плит составляет 76150 руб., при этом годовая экономия производственных затрат при использовании систем данного рода составляет 138000 руб.

Список литературы

1. Волосов С.С., Педь Е.И. Приборы для автоматического контроля в машиностроении. Учеб. пособие. М.: Машиностроение. 1970.
2. Карнак Б.В., Карнак Ж.В. Некоторые вопросы динамики широкопредельных пневматических следящих датчиков // Автоматизация производственных процессов в машиностроении и приборостроении. 1967. № 7.
3. Герц Е.В., Кудрявцев А.И., Ложкин О.В. Пневматические устройства и системы в машиностроении: справочник. Под ред. Герц Е.В. М.: Машиностроение. 1981.

Лесной Борис Васильевич – канд. техн. наук, доцент,
 Сергей Александр Сергеевич – аспирант кафедры автоматизации производственных процессов
 Волгоградского государственного технического университета.
 Контактный телефон (8442) 32-55-53. E-mail: sergeevapp@mail.ru