

УДК 62-525:681.5

***Гибадулин Руслан Рашитович,
студент, 4 курс, Институт цифровых интеллектуальных систем,
направления подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических
процессов и производств»
ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»***

Россия, г. Москва

***Сидоренко Максим Сергеевич,
студент, 4 курс, Институт цифровых интеллектуальных систем
направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»
ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»***

Россия, г. Москва

***Колесников Евгений Александрович,
студент, 4 курс, Институт цифровых интеллектуальных систем
направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»
ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»***

Россия, г. Москва

СИНХРОНИЗАЦИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО МОДУЛЯ

Аннотация: Рассматривается задача согласованного движения нескольких пневматических исполнительных механизмов производственного модуля. Предложена структура управления двумя пневмоцилиндрами с индивидуальными электропневматическими распределителями, датчиками положения и общим контроллером. Синхронизация формируется по ошибке взаимного положения штоков и дополняет локальные контуры каждой оси. Проанализированы причины рассогласования, связанные со сжимаемостью воздуха, различием нагрузок, трением, неодинаковой длиной магистралей и изменением давления питания. Сформирован алгоритм запуска, рабочего

хода, коррекции скорости и безопасного останова. Расчетный пример показывает принцип уменьшения ошибки синхронизации без заявления о проведении натурного эксперимента. Рассмотрены требования к настройке и промышленной реализации системы.

Ключевые слова: пневмопривод, синхронизация, исполнительный механизм, пневмоцилиндр, управление движением, производственный модуль, обратная связь.

Annotation: The paper considers coordinated motion of several pneumatic actuators in a production module. A control structure for two pneumatic cylinders with individual electro-pneumatic directional valves, position sensors and a common controller is proposed. Synchronization is based on the relative position error and supplements local axis control loops. Causes of mismatch related to air compressibility, unequal loads, friction, different line lengths and supply-pressure variation are analyzed. Start-up, working stroke, velocity correction and safe-stop algorithms are described. A calculation example illustrates synchronization-error reduction without claiming physical experiments.

Key words: pneumatic drive, synchronization, actuator, pneumatic cylinder, motion control, production module, feedback.

1. Технологическая постановка задачи синхронизации

Во многих производственных модулях одна технологическая операция выполняется двумя или несколькими исполнительными механизмами одновременно. Примерами являются подъем и опускание общей траверсы, параллельное перемещение зажимных элементов, подача крупногабаритной детали, раскрытие створок, позиционирование технологической оснастки. Если механизмы движутся несогласованно, возникает перекос общей конструкции, увеличение нагрузок в направляющих и ухудшение повторяемости операции.

С 1 марта 2026 года в России действует ГОСТ Р 72404-2025, распространяющийся на пневмоприводы и входящие в их состав устройства с

номинальным давлением от 0,16 до 1,6 МПа [1]. При разработке системы управления необходимо также учитывать требования безопасности ГОСТ ISO 4414-2016 для пневматических систем машин [2].

В данной работе синхронизацией считается поддержание разности координат двух исполнительных механизмов в установленном допустимом диапазоне на протяжении общего рабочего перемещения. Основным показателем принимается ошибка $e_s(t) = x_1(t) - x_2(t)$, где x_1 и x_2 - положения штоков первого и второго цилиндров.

Таблица 1.

Основные причины рассогласования пневматических исполнительных механизмов

Причина	Проявление	Способ учета
Различие внешней нагрузки	Неодинаковое ускорение цилиндров	Коррекция по положению
Трение и уплотнения	Разные скорости при одинаковой команде	Индивидуальные контуры
Сжимаемость воздуха	Запаздывание и колебательность	Ограничение темпа команды
Разная длина магистралей	Различие динамики наполнения	Настройка каналов
Колебания давления питания	Изменение доступного усилия	Контроль давления

2. Структура производственного модуля

Рассматриваемый модуль содержит два пневмоцилиндра двустороннего действия, перемещающих общую технологическую конструкцию через независимые точки приложения усилия. Каждый цилиндр оснащен датчиком положения. Управление потоками воздуха выполняется отдельными пропорциональными или быстродействующими электропневматическими распределителями.

В отличие от схемы с одним распределителем и механическим делителем потока, индивидуальные управляющие каналы позволяют корректировать движение каждого цилиндра по фактической координате. Контроллер получает x_1 и x_2 , рассчитывает среднее положение $x_m = (x_1 + x_2)/2$ и ошибку синхронизации e_s .

Задание общего движения x_{ref} формируется технологическим алгоритмом. Локальная команда первого привода определяется суммой базового воздействия и корректирующего сигнала, а второго - базовым воздействием противоположной коррекции. При опережении первого цилиндра его скорость уменьшается, а команда второму увеличивается в пределах допустимых ограничений.

Таблица 2.

Функциональные элементы системы синхронизации

Элемент	Назначение	Сигнал
Пневмоцилиндр 1	Исполнительное перемещение	x1
Пневмоцилиндр 2	Исполнительное перемещение	x2
Датчики положения	Измерение координат штоков	x1, x2
Электропневмораспределители	Регулирование расхода воздуха	u1, u2
Контроллер	Расчет движения и синхронизации	e1, e2, es
Датчик давления	Контроль источника питания	p

3. Модель движения и показатель согласованности

Динамика пневмоцилиндра определяется механическим движением поршня и изменением давления в рабочих полостях. Для упрощенного анализа механическая часть может быть записана как $m_i \cdot d^2x_i/dt^2 = A_i(p_{Ai} - p_{Bi}) - F_{tr,i} - F_{load,i}$, где m_i - приведенная масса, A_i - эффективная площадь поршня, p_{Ai} и p_{Bi} - давления в полостях, $F_{tr,i}$ - сила трения, $F_{load,i}$ - внешняя нагрузка.

Даже при геометрически одинаковых цилиндрах параметры F_{tr} и F_{load} различаются. Поэтому одинаковое управляющее воздействие не гарантирует одинакового $x(t)$. Синхронизация должна строиться как замкнутая система по измеренному взаимному рассогласованию.

Для оценки качества вводятся максимальная абсолютная ошибка $E_{max} = \max|x_1 - x_2|$, средняя абсолютная ошибка $E_{mean} = (1/T) \int |e_s| dt$ и ошибка в конечной позиции $E_{end} = |x_1(T) - x_2(T)|$. Для производственного модуля допустимый предел задается исходя из жесткости общей конструкции, размеров направляющих и технологического допуска.

Помимо взаимной синхронизации обе оси должны следовать общему заданию. Поэтому полезно разделять среднюю ошибку движения $e_m = x_{ref} - x_m$ и ошибку синхронизации e_s . Такое разделение предотвращает ситуацию, когда цилиндры движутся синхронно, но оба существенно отстают от требуемой траектории.

Таблица 3.

Показатели качества согласованного движения

Показатель	Выражение	Назначение
Ошибка синхронизации	$e_s = x_1 - x_2$	Текущее рассогласование
Средняя координата	$x_m = (x_1 + x_2)/2$	Общее движение модуля
Максимальная ошибка	$E_{max} = \max e_s $	Проверка предельного перекоса
Конечная ошибка	$E_{end} = e_s(T) $	Точность завершения хода

4. Закон перекрестной коррекции

Основной принцип управления заключается в сочетании локального слежения и перекрестной связи. Для каждого цилиндра формируется ошибка относительно общего задания $e_1 = x_{ref} - x_1$ и $e_2 = x_{ref} - x_2$. Дополнительно вычисляется $e_s = x_1 - x_2$.

Управляющие сигналы можно представить в форме $u_1 = u_{base,1} - K_s \cdot e_s$ и $u_2 = u_{base,2} + K_s \cdot e_s$, где K_s - коэффициент синхронизирующей связи. Если первый цилиндр опережает второй, e_s положительна: команда первому уменьшается, а второму увеличивается.

Для предотвращения чрезмерной реакции на шум датчиков вводится зона нечувствительности $|e_s| < e_0$. Внутри нее перекрестная коррекция не изменяется либо плавно стремится к нулю. Максимальная величина коррекции ограничивается, чтобы синхронизация не нарушала общий технологический скоростной профиль.

При больших ошибках синхронизации приоритет меняется: вместо попытки быстро догнать опережающий цилиндр система снижает общую скорость. Это уменьшает механический перекося и оставляет запас расхода воздуха для отстающего канала.

Таблица 4.

Режимы перекрестной коррекции по величине ошибки

Условие	Режим	Действие
$ es \leq e0$	Согласованное движение	Коррекция минимальна
$e0 < es \leq e1$	Рабочая коррекция	Изменение $u1$ и $u2$
$e1 < es \leq e2$	Повышенное рассогласование	Снижение общей скорости
$ es > e2$	Недопустимый перекос	Останов и диагностика

5. Алгоритм технологического цикла

- 1) перед запуском контроллер проверяет давление питания, сигналы датчиков положения, состояние распределителей и исходные координаты цилиндров;
- 2) если начальное рассогласование превышает допустимое значение, выполняется выравнивание на пониженной скорости;
- 3) после подтверждения готовности формируется общий профиль перемещения с ограничением ускорения;
- 4) в каждом цикле управления считываются $x1$ и $x2$, вычисляются e_m и e_s ;
- 5) локальные регуляторы формируют базовые команды, а перекрестный канал добавляет синхронизирующую коррекцию;
- 6) при росте $|e_s|$ выше предупредительного порога общая скорость уменьшается;
- 7) при превышении аварийного порога движение прекращается, распределители переводятся в предусмотренное безопасное состояние;
- 8) в конечной точке проверяются положение обоих цилиндров и остаточное рассогласование;
- 9) после подтверждения позиции разрешается следующая технологическая операция.

При вертикальном перемещении общей траверсы безопасное состояние должно определяться отдельно с учетом потенциальной энергии груза. Простое снятие электрического сигнала с распределителя не всегда означает безопасную фиксацию механизма. Требования ГОСТ ISO 4414-2016

предусматривают анализ опасностей, связанных с пневматической системой, и меры предотвращения опасных движений [2].

Рассмотрим условный расчетный цикл перемещения двух цилиндров на 400 мм. Данные используются только для иллюстрации алгоритма и не являются результатом натурных испытаний. На участке рабочего хода второй цилиндр из-за повышенной нагрузки начинает отставать. Без перекрестной связи его отставание нарастает; при включении коррекции скорость первого канала уменьшается, второго - увеличивается.

Таблица 5.

Расчетное изменение ошибки синхронизации

Момент времени, с	x1 без коррекции, мм	x2 без коррекции, мм	es , мм	es после коррекции, мм
0,5	72	70	2	1,5
1,0	151	146	5	2,8
1,5	232	223	9	3,4
2,0	311	299	12	3,0
2,5	400	385	15	1,2

В расчетном примере максимальное рассогласование без синхронизации достигает 15 мм. При условно выбранной перекрестной коррекции ошибка ограничивается значением около 3,4 мм и уменьшается к завершению хода. Эти значения не следует трактовать как универсальную характеристику пневмопривода: результат зависит от диаметра цилиндров, нагрузки, давления, расхода распределителей и коэффициентов регулятора.

Для реальной верификации необходимо измерять координаты обоих штоков при нескольких сочетаниях нагрузок и давлений питания. По результатам определяются $E_{\max}$, E_{mean} и время переходного процесса, после чего настраиваются K_s , зона нечувствительности и пороги защитной логики.

Первичная настройка выполняется при одинаковой нагрузке на цилиндры. Проверяются нулевые смещения датчиков, фактический ход, соответствие направлений движения и симметрия управляющих сигналов. Затем вводится контролируемая разность нагрузок, характерная для реального производственного модуля.

Слишком высокий коэффициент K_s способен вызвать взаимные колебания: цилиндры поочередно опережают друг друга, а регулятор непрерывно меняет коррекцию. Поэтому синхронизирующая связь должна быть медленнее внутренних контуров распределителей и согласована с механической динамикой.

Изменение давления источника также влияет на максимальное усилие и скорость. Если давление падает ниже допустимого уровня, контроллер должен не пытаться компенсировать ошибку только увеличением команды распределителя, а снизить скорость или остановить цикл.

Общие методы испытаний пневмоприводов регламентированы ГОСТ 29014-91 [4]. Для предлагаемого модуля стандартные проверки целесообразно дополнить специальными испытаниями на синхронность при асимметричной нагрузке.

Таблица 6.

Последовательность настройки синхронизирующего контура

Этап	Проверяемый параметр	Результат
Калибровка	Датчики x_1 , x_2	Единая координатная база
Одиночный ход	Динамика каждого цилиндра	Локальные настройки
Совместный ход	e_s при равной нагрузке	Базовый K_s
Асимметричная нагрузка	$E_{\max}$, $E_{\min}$	Коррекция K_s и порогов
Пониженное давление	Запас устойчивости	Защитные ограничения

Синхронизация пневматических механизмов не должна существовать изолированно от технологического алгоритма. Контроллер производственного модуля передает подсистеме движения номер операции, требуемую конечную координату, допустимую скорость и условие завершения.

После окончания перемещения в верхний уровень передаются статусы «позиция достигнута», «синхронизация в допуске» и «давление в норме». Только при одновременном выполнении этих условий разрешается, например, зажим, сборочная операция, обработка или передача детали следующему механизму.

Предложенный подход хорошо соответствует объединению мехатроники и автоматизации: объект включает механическую систему, пневматические исполнительные устройства, датчики и электропневматические преобразователи, а требуемое качество обеспечивается программным алгоритмом обратной связи.

Рассмотрена задача синхронизации двух пневматических исполнительных механизмов производственного модуля. Показано, что одинаковые управляющие команды не обеспечивают согласованного движения при различии нагрузок, трения, параметров магистралей и давления питания. Предложена система с индивидуальными электропневматическими распределителями и датчиками положения. Управление разделено на локальное слежение по общей траектории и перекрестную коррекцию по разности координат цилиндров.

Сформирован алгоритм запуска, рабочего движения, ограничения скорости при росте рассогласования и защитного останова. Расчетный пример иллюстрирует возможность уменьшения максимальной ошибки синхронизации при введении обратной связи, однако реальные коэффициенты должны определяться экспериментально для конкретного модуля.

Для промышленного применения необходимо учитывать требования действующих стандартов к пневмоприводам, монтажу, утечкам и безопасности. Дальнейшее развитие работы может быть связано с адаптивной настройкой синхронизирующего коэффициента и оценкой состояния пневматических каналов по тренду ошибки движения.

Использованные источники:

1. ГОСТ Р 72404-2025. Пневмоприводы. Общие технические требования. - М.: Российский институт стандартизации, 2025.
2. ГОСТ ISO 4414-2016. Пневмоприводы. Общие правила и требования безопасности для систем и их компонентов.

3. Lebkowski P. J., Wesierski L. N. A system of two pneumatic cylinders with synchronizing valve controlled by fluidic amplifier // Proceedings of the 2nd International Symposium on Fluid Power. 1989. P. 339-343.

4. ГОСТ 29014-91. Пневмоприводы. Общие методы испытаний.

5. Стрижак М. Г. Использование пневмоагрегата со встроенным резервуаром в ударных механизмах клеймения металлопроката // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-pnevmoagregata-so-vstroennym-rezervuarom-v-udarnyh-mehanizmah-kleymeniya-metalloprokata> (дата обращения: 16.08.2026).

6. ГОСТ Р 52869-2007. Пневмоприводы. Требования безопасности.

7. Герц Е. В. Пневматические устройства и системы в машиностроении: справочник. - М.: Машиностроение, 1981.

8. Пневматические приводы и системы управления / под ред. Е. В. Герц. - М.: Машиностроение, 1971.