

Р. А. Мунасыпов, О. В. Целищев

ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКИЙ СЛЕДЯЩИЙ ПРИВОД В АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЕ ПОДРЕССОРИВАНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА

Рассматриваются вопросы автоматизации технологических процессов и систем подрессоривания мобильных роботизированных комплексов. Приводится описание конструкции, структурная и функциональная схемы. Описываются математические модели электропневматического следящего привода управляемых амортизаторов и интеллектуальной системы управления комплекса. Представлены результаты моделирования процесса работы пневмоподвески при въезде на наклонную поверхность и одновременном использовании в качестве дополнительной степени свободы промышленного робота. *Электропневматический следящий прибор; подвеска; роботизированная система; интеллектуальное управление*

ВВЕДЕНИЕ

Практически во всех областях производство все больше оснащается новейшим оборудованием – станками-автоматами, автоматическими линиями, обрабатывающими центрами и другой современной техникой.

Роботизация и автоматизация промышленности – одно из наиболее прогрессивных направлений в комплексной механизации производства, широкое применение промышленных роботов, систем автоматического управления, позволяющее создавать полностью автоматизированные участки производства, цеха, заводы.

В настоящее время прослеживается тенденция к изготовлению небольших партий разнообразных и сложных деталей. В таких условиях труднее становится прогнозировать загрузку производства, обостряется ценовая конкуренция.

Вследствие модернизации обеспечение безопасности и эксплуатационной надежности оборудования и аппаратуры можно отнести к актуальным направлениям теоретических и экспериментальных исследований, так как с каждым днем устройства становятся все более сложными, дорогостоящими и чувствительными к вибрационным воздействиям. Многочисленные разработки посвящены задачам вибрационной защиты технических объектов, мехатроники и робототехники.

Контактная информация: 8 (347) 252-65-34

Работа выполнена при поддержке грантов Минобрнауки России и РФФИ 11-08-00871_а «Исследование и проектирование интеллектуальных систем управления сложными техническими и технологическими объектами на основе гибридных технологий», 11-08-97063_р_поволжье_а «Проектирование интеллектуальных систем управления автономными многомодульными транспортными объектами, функционирующих в условиях неопределенности».

На сегодняшний день одним из наиболее эффективных средств обеспечения упругой связи между колесами и кузовом транспортного средства за счет восприятия действующих сил и гашения колебаний является пневматическая подвеска, упругими элементами которой являются пневморессоры.

Разрабатываемый мобильный роботизированный комплекс представляет собой автономную многофункциональную транспортную платформу с регулируемыми амортизаторами с автоматическим или дистанционным управлением, предназначенный для гашения колебаний и сохранения заданного уровня пола комплекса при транспортировке опасных грузов и высокоточной аппаратуры, в которых недопустимы вибрация, наклоны и раскачка, или промышленных роботов, для устранения привязки промышленного робота к стационарному рабочему месту, то есть придания роботу мобильности, и независимости положения основания робота от качества дорожного покрытия.

Область применения мобильных роботизированных комплексов с управляемыми амортизаторами определяется установленным на них оборудованием и транспортной базой. Устанавливаемое оборудование зачастую накладывает достаточно жесткие ограничения на ходовые качества платформы мобильного комплекса.

Мобильный робототехнический комплекс может использоваться также для строительных работ, саперных работ, поисково-спасательных операций, ликвидации последствий ЧС техногенного характера, работы в зонах химического и радиоактивного заражения, для механизации транспортных работ внутри цехов предприятий и складских помещений, перемещения в межстаночном пространстве, для подвоза грузов непосредственно к рабочим местам на производстве. Управляемые амортизаторы платфор-

мы позволяют увеличивать рабочую зону робота по высоте, что допускает ее использование в качестве дополнительной степени свободы и средства передвижения для промышленных манипуляторов.

1. СТРУКТУРА И ПРИНЦИП РАБОТЫ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА

Разрабатываемый мобильный роботизированный комплекс включает в себя следующие подсистемы:

- 1) силовая система (компрессорный агрегат, аккумуляторные батареи);
- 2) распределительная система (пневмораспределители);
- 3) исполнительная система (пневмоцилиндры с датчиком перемещения, пневморессоры, сервоприводы колес);
- 4) система аутригеров (стандартные пневмоцилиндры);
- 5) система управления (контроллеры, двухосевой гироскоп);
- б) дополнительное оборудование (промышленный робот).

Структурная схема системы управления мобильного робототехнического комплекса представлена на рис. 1.

Компрессорный агрегат создает рабочее давление в пневмосистеме, он включается автоматически при понижении давления в ресивере до 0,8 МПа.

За выдачу управляющих сигналов на контроллер пневматического оборудования, промышленный робот и сервоприводы колес платформы отвечает контроллер платформы, в который поступает цифровой сигнал отклонения платформы от горизонтального положения с двухосевого гироскопа и в котором записана программа или алгоритм работы универсальной мобильной платформы. Цифровые сигналы управления контроллера платформы преобразуются в аналоговые и подаются на соответствующее оборудование контроллером пневматического оборудования. Контроллер пневматического оборудования обладает функциями контроллера положения (замкнутый контур) и управления позиционированием (открытый контур).

При установке платформы в горизонтальное положение аналоговый сигнал с контроллера пневматического оборудования поступает

на координатный интерфейс соответствующих управляемых амортизаторов, далее он идет на пятилинейные многопозиционные золотниковые распределители 1 с пропорциональным электромагнитным управлением.

Сигнал управления распределителя по напряжению 0 ... 10 В поступает от контроллера на электромеханический преобразователь. Золотник пропорционального распределителя плавно смещается в рабочее положение с заданной скоростью (в программе управления задается скорость движения исполнительного механизма), газ под давлением начинает поступать в полость пневмоцилиндра 1, тем самым, вызывая движение поршня цилиндра. Сигнал обратной связи поступает с датчика перемещения, механически связанного со штоком пневмоцилиндра и идет через координатный интерфейс в контроллер пневматического оборудования. При остановке платформы для выполнения ответственной или длительной технологической операции используется система аутригеров, чтобы исключить собственную вибрацию пневморессор. Один и тот же аналоговый сигнал управления с контроллера пневматического оборудования поступает на все пропорциональные распределители 2 системы аутригеров, давление подается в полости пневмоцилиндров 2 и платформа устанавливается на опоры. Давление в пневморессорах контролируется датчиками давления, сигнал с которых поступает в контроллер пневматического оборудования и регулируется в зависимости от загруженности платформы выдачей управляющих сигналов на регуляторы давления.

Схема пневматическая принципиальная мобильного роботизированного комплекса представлена на рис. 2.

Компрессор 7 с приводным двигателем всасывает воздух из атмосферы через заборный фильтр и нагнетает в ресивер 18 через обратный клапан 9 и блок подготовки воздуха 1 (фильтр-влажнотделитель, регулятор давления, фильтр грубой очистки, фильтр тонкой очистки). Воздух поступает в ресивер, который аккумулирует пневмоэнергию и сглаживает пульсацию давления. В нем происходит охлаждение воздуха и конденсация некоторого количества влаги, которая по мере накопления удаляется вместе с механическими примесями через вентиль 3. Ресивер оборудуется одним блоком обратных и предохранительных клапанов 11 и манометром 8.

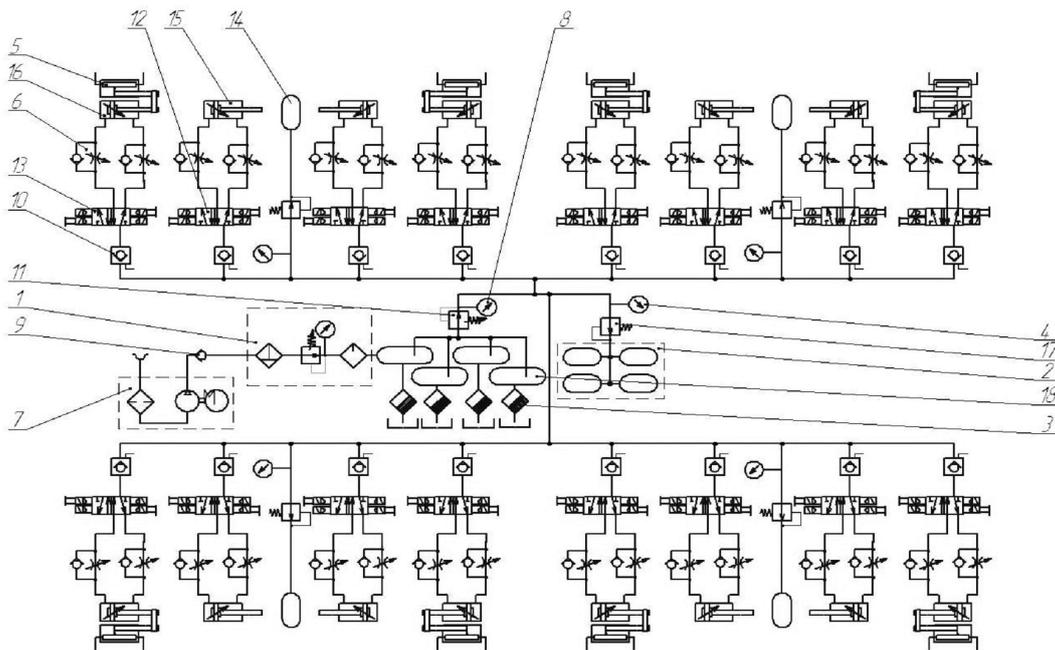


Рис. 1. Структурная схема управления мобильного роботизированного комплекса

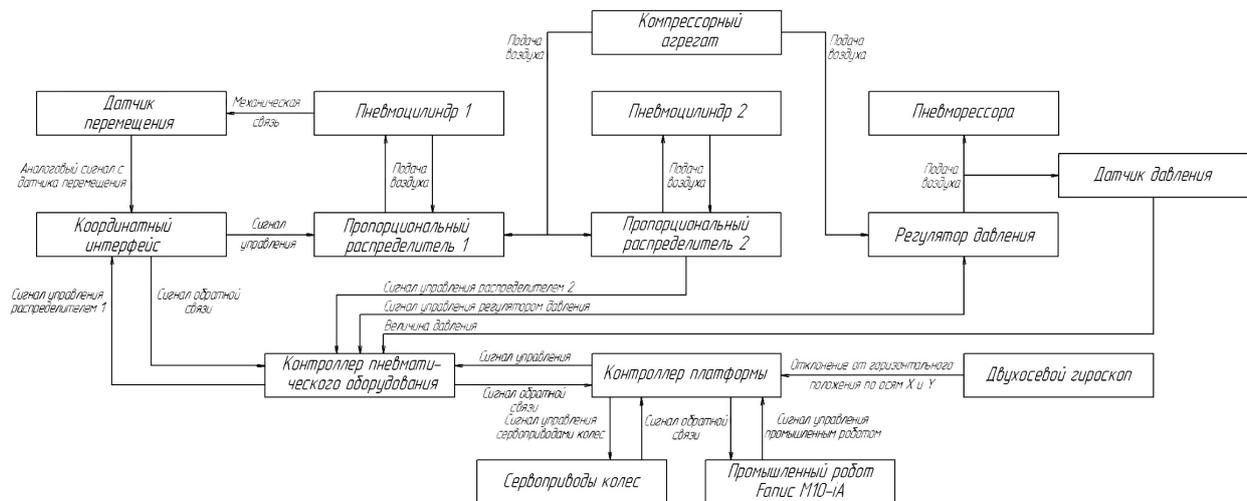


Рис. 2. Схема пневматическая принципиальная

Обратный клапан 9 исключает возможность резкого падения давления в пневмосети при отключении компрессора. Сигнал обратной связи поступает с датчика перемещения 5 и идет в контроллер пневматического оборудования. Электрические сигналы поступают на пропорциональные распределители 13. Пневмозамки 10 препятствуют самопроизвольному движению поршней цилиндров за счет внутренних утечек в распределителях. Воздух с распределителей поступает в полости пневмоцилиндров через предохранительные клапаны 6, предназначенные для защиты пневмопривода от перегрузки при резком повышении давления. После установки

платформы в горизонтальное положение для продолжительной работы на распределители 12 поступает дискретный электрический сигнал, в результате чего распределители 12 переключаются в крайнее левое положение и выдвигаются поршни пневмоцилиндров 15 системы ауригеров. Давление в пневморессорах 14 контролируется датчиками давления 4 и регулируется в зависимости от загруженности платформы регуляторами давления 17. Давление в блоке пневморессор 2 постоянное и зависит от массы головки компрессорного агрегата 7, оно также контролируется датчиком давления и регулируется отдельным регулятором давления.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКОГО СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА

Электропневматический следящий привод (ЭПСП) – привод, в котором выходное звено пневмодвигателя (пневоцилиндра) отслеживает изменения входного электронного сигнала. ЭПСП включает в себя преобразующий элемент, усилитель сигнала ошибки (УСО), электромеханический преобразователь (ЭМП), пневмораспределитель, пневмодвигатель, датчик обратной связи.

В ЭПСП на вход электронного усилителя сигнала ошибки поступает сигнал рассогласования в виде напряжения, U_{Σ} , которое определяется как разность входного сигнала $U_{ВХ}$ и сигнала обратной связи $U_{ОС}$.

Сигнал рассогласования (сигнал ошибки) U_{Σ} усиливается по напряжению и мощности в электронном УСО и является регулируемым сигналом, который определяет точность, скорость и напряжение движения следящего привода. Регулируемый сигнал в виде тока управления поступает в обмотки управления ЭМП, далее электрический сигнал преобразуется в давление в диагонали пневмомостика и перемещение золотника. При расчете ЭМП примем следующие допущения:

1. Петля гистерезиса в ЭМП отсутствует, и его механическая характеристика описывается линейным уравнением:

$$F_3 = K_{FI} \cdot I - K_{Fh} \cdot h,$$

где K_{FI} – коэффициент усиления силовой характеристики; I – ток управления; K_{Fh} – жесткость механической характеристики; h – перемещение якоря.

2. Уравнение перемещения золотника:

$$m_3 \frac{d^2 h}{dt^2} = F_3 - F_H - F_D,$$

где m_3 – масса золотника; F_3 – сила, перемещающая золотник; F_H – усилие нагрузки; F_D – сила демпфирования (трение и противо-ЭДС).

$$F_D = b_{\text{ЭМП}} \cdot \frac{dh}{dt},$$

где $b_{\text{ЭМП}}$ – коэффициент вязкого трения.

Сила внешней нагрузки равна:

$$F_H = C \cdot h + F_{\text{ПД}},$$

где $C \cdot h$ – позиционная нагрузка; $F_{\text{ПД}}$ – пневмодинамическая сила.

Передаточная функция ЭМП:

$$W_{\text{ЭМП}} = \frac{K_{hl}}{T_{\text{я}}^2 S^2 + 2 \xi_{\text{я}} T_{\text{я}} S + 1},$$

где $K_{hl} = \frac{K_{FI}}{K_{Fh}}$ – коэффициент передачи ЭМП;
 $T_{\text{я}} = \sqrt{\frac{m}{K_{Fh}}}$ – постоянная времени якоря;
 $\xi_{\text{я}} = \frac{b_{\text{ЭМП}}}{2 T_{\text{я}} K_{Fh}}$ – коэффициент относительного демпфирования якоря.

Основное усиление регулируемого сигнала по мощности происходит в золотниковом пневмораспределителе за счет энергии компрессора.

В пневоцилиндре энергия потока газа преобразуется в механическую энергию поршня.

Математическую модель работы пневоцилиндра разработана на основе следующих соотношений.

1. Уравнение баланса расходов между распределителем и цилиндром:

$$\mu B h(t) \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{p_{\text{п}} - p_{\text{д}}(t) \text{sign}(h(t)) - p_{\text{сл}}}{2}} = A \frac{dy(t)}{dt},$$

где μ – коэффициент расхода; B – ширина проточки в гильзе золотника (условный проход); $p_{\text{п}}$ – давление питания; $p_{\text{д}}$ – перепад давления; ρ – плотность газа в цилиндре; $p_{\text{сл}}$ – давление слива; A – эффективная площадь сечения поршня; y – перемещение поршня.

2. Уравнение движения поршня:

$$m_{\text{п}} \frac{d^2 y(t)}{dt^2} = A p_{\text{д}} - R - F_{\text{тр}} - b \frac{dy(t)}{dt} - C_{\text{пв}} y(t).$$

При моделировании переходного процесса, соответствующего перемещению поршня цилиндра на 100 мм хода, время регулирования составило 0.6 с, перерегулирование и установившаяся ошибка отсутствуют.

3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПНЕВМОПОДВЕСКОЙ

Математическая модель интеллектуальной САУ пневмоприводом управляемых амортизаторов мобильного роботизированного комплекса разработана с помощью программы *FuzzyPID* пакета *Matlab*, основанной на использовании математического аппарата нечеткой логики (рис. 3).

Нечеткая логика реализована в двух модулях: модуле оценки качества дорожного покрытия и модуле выбора управляющего воздействия на исполнительный механизм – пневмопривод управляемых амортизаторов.

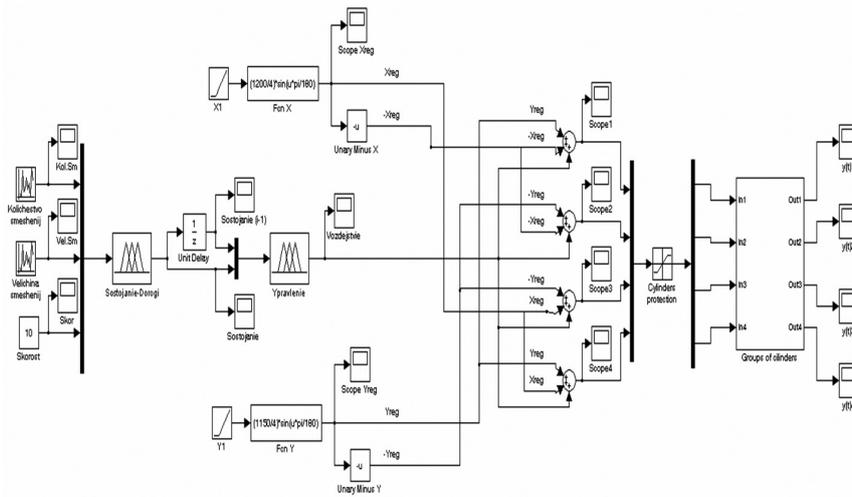


Рис. 3. Математическая модель интеллектуальной САУ пневмоприводом управляемых амортизаторов

Также в системе управления предусмотрена выдача управляющих воздействий на пневмоцилиндры управляемых амортизаторов для установки и сохранения платформы в горизонтальном положении. Сигнал отклонения платформы от горизонтального положения поступает в виде величины отклонения в градусах по двум осям с интегрального гироскопа.

Входными переменными модуля оценки качества дорожного покрытия являются: количество смещений рабочего органа амортизатора от неровностей дорожного покрытия в единицу времени, величина этих смещений и скорость движения самого мобильного комплекса. Входные данные поступают в модуль оценки качества дорожного покрытия, который на основе базы правил и аппарата нечеткой логики определяет качество дорожного покрытия. На рис. 4 изображена поверхность выхода переменной модуля оценки качества дорожного покрытия.

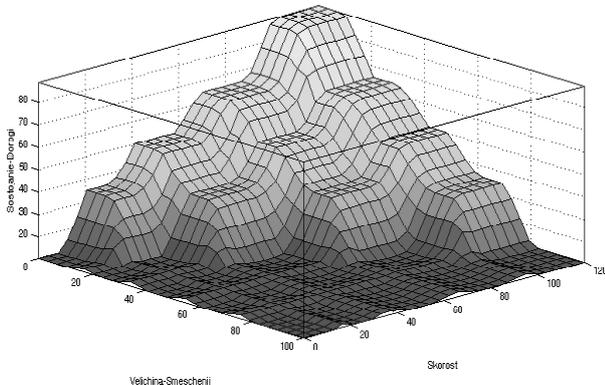


Рис. 4. Поверхность выхода переменной «Состояние дороги»

Промежуточными переменными являются данные о состоянии дорожного покрытия в те-

кущий и предыдущий моменты времени. Они, в свою очередь, поступают на вход модуля выбора управляющего воздействия, который определяет необходимый в данной ситуации управляющий сигнал. Выходной переменной модуля является управляющее воздействие на пневмопривод управляемых амортизаторов. На рис. 5 изображена поверхность выхода переменной модуля выбора управляющего воздействия в зависимости от переменных «Состояние дороги (*i-1*)» и «Состояние дороги».

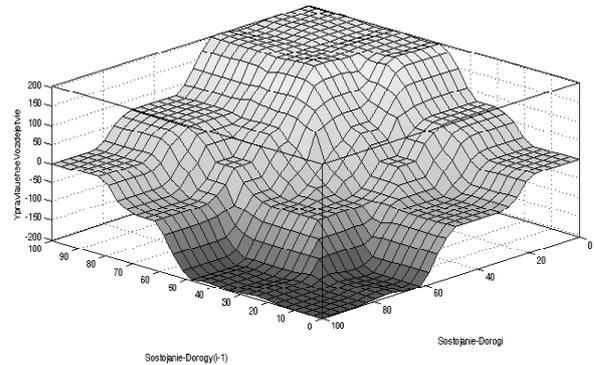


Рис. 5. Поверхность выхода переменной «Управляющее воздействие»

Смоделирован процесс работы управляемых амортизаторов в следующей ситуации:

- постепенный въезд комплекса на наклонную поверхность с перепадом высот 22 мм и 50 мм в продольной и поперечной осях платформы соответственно (рис. 6, а-б);
- использование управляемых амортизаторов в качестве дополнительной степени свободы промышленного робота: вертикальное опускание платформы на 75 мм и последующий подъем на 150 мм (рис. 7).

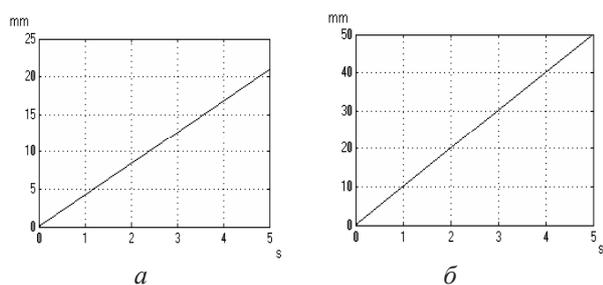


Рис. 6. Отклонение платформы от горизонтали в продольной X и поперечной Y осях

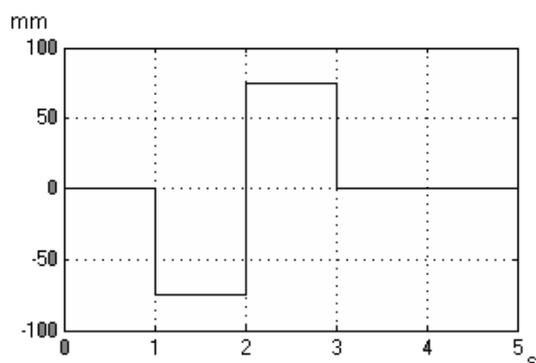


Рис. 7. Дополнительная степень свободы

Суммарное управляющее воздействие на пневмоцилиндры четырех управляемых амортизаторов представлено на рис. 8.

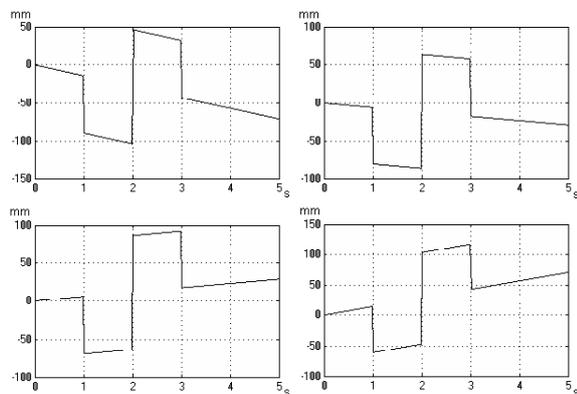


Рис. 8. Суммарное управляющее воздействие

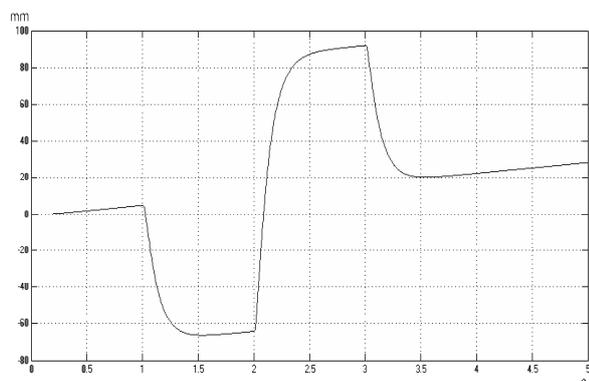


Рис. 9. Перемещение поршня третьего управляемого амортизатора

Как видно из рисунка, управляющие воздействия на 4-х управляемых амортизатора различны, что объясняется одновременным выравниванием платформы в горизонтальное положение. Процесс работы одного из управляемых амортизаторов представлен на рис. 9.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы разработаны математические модели пневмопривода управляемых амортизаторов и интеллектуальной САУ пневмоприводом управляемых амортизаторов, конструкция роботизированного комплекса.

Платформа роботизированного комплекса позволяет сохранять заданный уровень пола комплекса при перемещении по неровному и наклонному профилю дороги, преодолевать вертикальные препятствия высотой, определяемой максимальным ходом амортизаторов, реконфигурировать платформу под конкретную задачу и наращивать бортовое оборудование. Максимальная нагрузка на платформу определяется конструкцией амортизаторов и их количеством, величина дорожного просвета регулируется автоматически в зависимости от скорости движения и качества дорожного покрытия и не зависит от массы перевозимого груза и расположения его центра тяжести на платформе.

Частота оценки качества дорожного покрытия и выдачи управляющих воздействий – 1 Гц. Максимальная частота выдачи управляющих воздействий для данной конструкции определяется временем отклика всех элементов и тактовой частотой вычислительного устройства и составляет 5 Гц.

Мобильный роботизированный комплекс является автономным (до 10 ч.) с возможностью подключения к централизованному энергоснабжению с целью экономии заряда аккумуляторных батарей.

При данной конструкции комплекс обеспечивает горизонтальный уровень пола при угле наклона дорожного покрытия 25° и максимальную скорость передвижения 7.24 км/ч.

Несомненный плюс разработанной платформы – ее модульная конструкция, позволяющая легко и быстро модифицировать платформу:

- благодаря универсальному крепежному инструменту на платформу комплекса можно устанавливать практически любой объект, даже с весьма сложной геометрией, что существенно упрощает работу;

- наличие промышленного робота со сменным инструментом позволит резко сократить количество промышленных роботов и транспортных линий, обслуживающих технологическое оборудование, благодаря мобильности платформы;

- возможность изменения габаритов платформы позволяет увеличить разнородность и количество перевозимых грузов;

- возможность установки систем видеонаблюдения без существенной потери качества изображения вследствие несовершенства дорожного покрытия, высокоточного и хрупкого оборудования;

Все это существенно расширяет область применения таких роботизированных комплексов и круг потенциальных покупателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Герц Е. В.** Пневматические приводы. Теория и расчет. М.: Машиностроение, 1969. 359 с.

2. **Ильясов Б. Г., Мунасыпов Р. А., Сайтова Г. А., Челушкина Л. П., Распопов Е. В.** Исследование пе-

риодических движений в многосвязных системах управления с нечеткими регуляторами в сепаратных подсистемах // Ж. Мехатроника, М.: Машиностроение, 2004. № 8. С. 24–29.

3. **Пегат А.** Нечеткое моделирование и управление. М: Бином, Лаборатория знаний, 2009. 798 с.

4. **Попов Д. Н.** Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1987. 464 с.

5. **Рабинович Л. В., Петров Б. И., Терсков В. Г., Сушков С. А., Панкратьев Л. Д.** Проектирование следящих систем. М.: Машиностроение, 1969. 375 с.

6. **Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: пер. с польск. И. Д. Рудинского. М.: Горячая линия -Телеком, 2006. 452 с.

ОБ АВТОРАХ

Мунасыпов Рустэм Анварович, проф. каф. техн. кибернетики. Дипл. инженера (УАИ). Д-р техн. наук по системному анализу и управлению (УГАТУ). Иссл. в обл. робототехники.

Целищев Олег Владимирович, асп. той же каф. Дипл. инженера (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. робототехники.