

Коткас

Коткас Любовь Александровна

**Методика расчета позиционного пневмопривода
мускульного типа для подъемно-транспортных
манипуляторов**

Специальность 05.04.13 - Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»).

Научный руководитель:

Жарковский Александр Аркадьевич, доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы энергетического машиностроения ФГАОУ ВО «СПбПУ»

Консультант:

Донской Анатолий Сергеевич, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Месропян Арсен Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической механики, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Труханов Кирилл Алексеевич, доктор технических наук, доцент кафедры «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика», ФГБОУ ВО «Московский государственный, технический университет МГТУ имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева», г. Ковров

Защита состоится «28» сентября 2021 года в 16.00 часов на заседании диссертационного совета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главный учебный корпус, аудитория 118).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (<http://www/spbstu.ru/>).

Автореферат разослан «___» _____ 2021 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат технических наук, доцент

Борщев Игорь Олегович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Одной из задач проектирования подъемно-транспортных манипуляторов является задача максимального упрощения управления манипулятором, что предполагает автоматизацию управления перемещением груза. Решение этой задачи на основе типовых пневмоцилиндров требует создания достаточно сложных систем управления. Применение пневмомускула позволяет значительно упростить создание подъемно-транспортных механизмов, потому что он, благодаря своим физическим свойствам, позволяет позиционировать груз строго на заданной высоте при подаче определенной величины давления. В существующих манипуляторах практически не используется это свойство пневмомускула, так как для этого необходимо выбрать соответствующую кинематическую схему манипулятора.

Кроме того, использование пневмомускула вместо пневмоцилиндра позволяет исключить неравномерность движения на малых скоростях, уменьшить вес конструкции (масса пневмомускула меньше массы пневмоцилиндра в 5–10 раз при тех же развиваемых усилиях). При этом, как и пневмоцилиндр, пневмомускул имеет низкую стоимость, возможность применения в запыленных, влажных, взрывоопасных и радиационных средах, и высокий ресурс (до 5 млн циклов).

Поэтому актуальной задачей является разработка принципов построения сбалансированного манипулятора мускульного типа, обеспечивающих автоматическое уравнивание исполнительного устройства манипулятора для мобильного захвата груза в любой точке в горизонтальной плоскости, вывод и уравнивание исполнительного устройства в любой заданной точке позиционирования по высоте в рабочей зоне, обеспечение безопасности в случае обрыва груза, а также разработка соответствующей методики расчета пневмомускула с целью получения требуемых динамических и статических характеристик.

При проектировании позиционных и следящих систем с широтно-импульсным управлением в полости пневмомускула при позиционировании груза при определенных частотах изменения входного давления могут возникать резонансные колебания газа, связанные с волновыми процессами внутри оболочки, так как пневмомускул представляет собой систему с распределенными параметрами.

Поэтому актуальной является также задача создания методики выявления нежелательных частот колебаний давления управления в зависимости от параметров пневмомускула и пневмосхемы.

Целью диссертации является разработка методики расчета позиционного пневмопривода мускульного типа для подъемно-транспортных манипуляторов.

Основными задачами диссертации являлись:

1. Вывод аналитической зависимости усилия пневмомускула от его конструктивных параметров и свойств оболочки.
2. Разработка динамической модели пневмомускула.
3. Разработка методики выявления частот управления пневмоаппаратурой в режиме широтно-импульсной модуляции, исключающих колебания груза в следящих и позиционных системах в точке позиционирования.
4. Разработка принципов управления сбалансированным манипулятором, обеспечивающим автоматический вывод груза в заданную позицию.
5. Разработка динамической модели манипулятора с приводом мускульного типа.
6. Исследование возможности корректировки погрешности позиционирования груза усилием оператора в зависимости от конструктивных параметров пневмомускула, массы груза, точки позиционирования и давления, подаваемого в оболочку.

7. Разработка методики выбора основных параметров пневмомускула при проектировании манипуляторов.

8. Исследование работы сбалансированного манипулятора при аварийных ситуациях, при внезапном обрыве груза с последующей разработкой принципа торможения исполнительного органа, исключающего аварийную ситуацию.

9. Исследование экспериментальных статических и динамических характеристик привода мускульного типа для верификации разработанной математической модели пневмомускула и полученных теоретических зависимостей.

10. Разработка алгоритмов и программ для теоретических и экспериментальных исследований пневмомускулов.

Научная новизна работы:

1. Аналитическая зависимость усилия пневмомускула от его конструктивных параметров и свойств оболочки.

2. Динамическая модель пневматического мускула FESTO с учетом изменения диаметра и длины пневмомускула, геометрии сетки корда и жесткости оболочки.

3. Методика выявления частот управления пневмоаппаратуры в режиме широтно-импульсной модуляции, исключающих колебания груза в следящих и позиционных системах в точке позиционирования.

4. Расчетные зависимости усилия оператора при необходимости корректировки положения груза в точке позиционирования от конструктивных параметров пневмомускула, массы груза и давления, подаваемого в оболочку.

5. Принцип торможения привода манипулятора, который исключает аварийные ситуации при обрыве груза.

6. Методика выбора параметров пневмомускула.

Достоверность результатов обеспечивается экспериментальной проверкой данных численного моделирования на лабораторном стенде сектора гидромашин Высшей школы «Энергетическое машиностроение» с применением измерительной аппаратуры.

Основными методами исследования являются численное моделирование и последующая верификация результатов на основе экспериментальных данных, полученных на лабораторном стенде.

Практическая значимость работы:

1. Разработана динамическая модель манипулятора с приводом мускульного типа.

2. Разработаны алгоритмы и программы для теоретических и экспериментальных исследований пневмомускулов.

3. Разработана конструкция пневмомускула со встроенным гидродемпфером для предотвращения негативных последствий в результате работы манипулятора при обрыве груза.

4. Получены расчетные зависимости усилия оператора, позволяющие оценить возможность корректировки погрешности позиционирования груза на стадии проектирования пневматического устройства.

5. Разработана методика выбора основных параметров пневмомускула при проектировании пневматических устройств.

6. Разработаны принципы позиционирования сбалансированного манипулятора с ручным управлением: 1) Позиционирование груза с предварительной настройкой пневмосхемы на вес перемещаемых грузов: а) позиционирование по высоте с грузом и без груза – автоматически за счет настройки пневмосхемы, б) позиционирование в горизонтальной плоскости – оператором за счет особенностей выбранной кинематической схемы манипулятора типа пантограф и типа привода - пневмомускула, которые обеспечивают

уравновешивание груза в любой точке рабочей зоны в горизонтальной плоскости.
2) Позиционирование груза любого веса в любой точке рабочей зоны манипулятора с помощью пневмосхемы, отслеживающей движение руки оператора и не требующей настройки при изменении веса груза и точки позиционирования.

7. Результаты исследования внедрены в организациях: ООО «НПО Техобеспечение», ООО «ФЕСТО Рус», ООО «Рекорд-инжиниринг».

8. Результаты исследований внедрены в учебный процесс подготовки бакалавров и магистров Высшей школы «Энергетическое машиностроение» СПбПУ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Аналитическая зависимость усилия пневмомускула от его конструктивных параметров и свойств оболочки.

2. Динамическая модель пневматического мускула с учетом изменения диаметра и длины пневмомускула, геометрии сетки корда и жесткости оболочки.

3. Методика выявления частот управления пневмоаппаратурой в режиме широтно-импульсной модуляции, исключающих колебания груза в следящих и позиционных системах в точке позиционирования.

4. Принципы позиционирования сбалансированного манипулятора с ручным управлением: 1) Позиционирование груза с предварительной настройкой пневмосхемы на вес перемещаемых грузов: а) позиционирование по высоте с грузом и без груза – автоматически за счет настройки пневмосхемы, б) позиционирование в горизонтальной плоскости – оператором за счет особенностей выбранной кинематической схемы манипулятора типа пантограф и типа привода - пневмомускула, которые обеспечивают уравновешивание груза в любой точке рабочей зоны в горизонтальной плоскости. 2) Позиционирование груза любого веса в любой точке рабочей зоны манипулятора с помощью пневмосхемы, отслеживающей движение руки оператора и не требующей настройки при изменении веса груза и точки позиционирования.

5. Расчетные зависимости усилия оператора при необходимости корректировки положения груза в зависимости от длины и диаметра оболочки пневмомускула, массы груза, точки позиционирования и рабочего давления, подаваемого в оболочку, и диапазоны корректировки погрешности позиционирования.

6. Методика выбора основных параметров пневмомускула при проектировании пневматических устройств.

7. Полезная модель пневмомускула со встроенным гидродемпфером.

8. Результаты исследований экспериментальных статических и динамических характеристик пневмомускула.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: «Неделя науки СПбПУ» 13–19 ноября 2017 года; МНТК «Гидравлические машины, гидропневмоприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития 7-8 июня 2018 года», СПбПУ, 2018; 5-я ВНТК «Гидравлика» 27 ноября 2018 года, МГТУ, 2018; IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 13-14 декабря 2018; 6-я ВНТК «Гидравлика» 26 ноября 2019 года, МГТУ; 23-я МНТК «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика», МЭИ 4 декабря 2019 года; «Неделя науки СПбПУ» 18-23 ноября 2019 года; 5-я МНТК «Динамика и виброакустика машин» (DVM-2020), (Самара: СГАУ, 2020 г.).

Публикации. Основные научные результаты по теме диссертационной работы изложены в 15 публикациях, опубликованных в журналах и сборниках научных трудов, в том числе 3 – в статьях, входящих в список научных изданий, рекомендованных ВАК, 2 – в реферативной базе данных Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения и списка литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 162 страницы. Работа содержит 77 иллюстраций, 18 таблиц. Список литературы содержит 83 наименования.

Содержание работы

Во **введении** показывается, что использование пневмомускула позволяет расширить области применения пневмопривода в промышленности. Выявляются основные направления исследования, обосновывается их актуальность, формулируется цель работы, научная новизна, теоретическая и практическая ценность работы, методы исследования и достоверность результатов.

В первой главе описываются свойства пневмомускула, проводится сравнение коммерческих пневмомускулов и показывается целесообразность выбора пневмомускула фирмы FESTO в качестве двигателя для пневматического манипулятора. Проведено сравнение пневмоцилиндра с пневмомускулом и выделены преимущества привода, построенного на пневмомускулах.

Проведен анализ существующих промышленных манипуляторов, в ходе которого были определены их недостатки: использование дорогой электропневматической аппаратуры, построение сложной следящей системы для работы как в штатном, так и в аварийном режиме при обрыве груза, отсутствие автоматического вывода и уравнивания исполнительного устройства в заданной точке позиционирования. Поэтому актуальной является задача разработки принципов управления манипулятором, обеспечивающих автоматическое уравнивание исполнительного устройства и автоматический вывод исполнительного устройства в заданную точку позиционирования, не требующих дорогостоящего оборудования и построения сложной системы управления как для работы в штатном, так и в аварийном режимах.

Выполнен обзор существующих математических выражений для статического усилия пневмомускула. Показано, что выражения, полученные в ходе геометрической параметризации (Chou C.P. и Hannaford B., Tondu B. и Lopez P., Tsagarakis N. и Caldwell D.G., Шароватова В.Т. и Лошицкого П.А. и других), имеют расхождение с экспериментальными кривыми, представленными в каталоге FESTO, в некоторых случаях достигающее 50 %. Такие выражения не подходят для моделирования пневмомускулов FESTO. Эмпирические выражения авторов Sarosi J., Joupilla V.T., Hildebrandt A., Hosovsky A. содержат большое количество корректирующих коэффициентов (от пяти до двадцати одного), и не являются универсальными для любой длины оболочки и рабочего режима пневмомускулов FESTO. Сравнительный анализ существующих динамических моделей показал, что они содержат эмпирические выражения для расчета статического усилия и изменения объема, что потребовало авторам модели введения до 25 корректирующих коэффициентов или содержат выражения, не подходящие для моделирования пневмомускулов FESTO. Поэтому одной из актуальных задач является разработка аналитической зависимости статического усилия от конструктивных параметров пневмомускула FESTO и свойств оболочки, являющейся универсальной для любого диаметра, любой длины оболочки и давления питания.

Вторая глава посвящена выводу аналитической зависимости статического усилия пневмомускула от степени его сокращения, конструктивных параметров и свойств оболочки и разработке динамической модели пневматического мускула с учетом изменения геометрии сетки корда, диаметра и жесткости оболочки в процессе сокращения пневмомускула.

На рисунке 1, *a* показано, что на ячейку сетки корда пневмомускула после подачи сжатого воздуха будут действовать поперечная сила $F_{\text{поп}}$ и продольная сила $F_{\text{пр}}$. Действие

этих сил будет деформировать ячейку в поперечном направлении, растягивая высоту ячейки r_0 на величину $\Delta y_{\text{поп}}$, и в продольном направлении, сокращая длину ячейки l_0 на величину $\Delta x_{\text{пр}}$, и изменять угол укладки сетки корда α_0 .

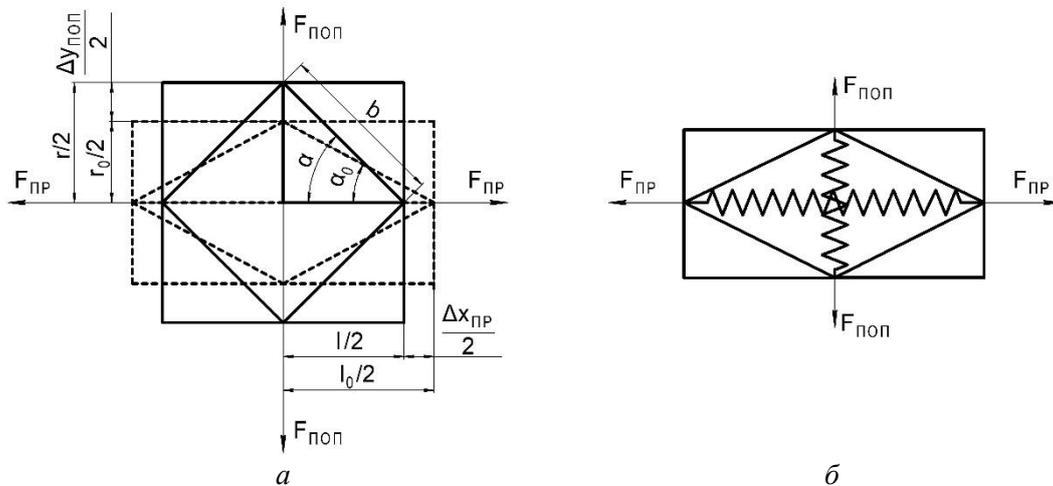


Рисунок 1 – Ячейка сетки корда пневмомускула: а) изменение геометрических размеров ячейки до и после подачи давления, б) ячейка сетки с пружинами

В отличие от существующих моделей пневмомускула, кроме поперечной и продольной сил была учтена сила упругой деформации, учитывающая жесткость материала оболочки. Для рассмотрения силы упругой деформации ячейка была представлена в виде двух пружин, расположенных перпендикулярно друг к другу (рис. 1, б). Жесткости ячейки в направлении по периметру и по длине были выражены через удельную жесткость c_0 .

При моделировании статического усилия вводились следующие допущения: пневмомускул рассматривался как оболочка идеальной цилиндрической формой с нулевой толщиной стенки, нити сетки корда принимались нерастяжимыми.

Для лучшей сходимости с результатами эксперимента, полученными компанией FESTO, была произведена адаптация разработанной аналитической зависимости путем введения корректирующих коэффициентов в уравнение, описывающее жесткость оболочки как функцию от давления $c(p)$. В результате получилась следующая модель для статического усилия пневмомускула:

$$\begin{cases}
 T = \pi D_0 \frac{\frac{(p_M - p_A) D \left(1 - \frac{x}{L_0}\right)}{2} - \frac{c(p)}{\text{tg}\alpha_0} \left[\left(1 - \frac{x}{L_0}\right) \text{tg}\alpha - \text{tg}\alpha_0 \right] - c(p) \text{tg}\alpha_0 \text{tg}\alpha \frac{x}{L_0}}{\text{tg}\alpha_0 \text{tg}\alpha} \\
 D = \frac{\pi D_0^2 (p_M - p_A)}{4 D_0 \left(1 - \frac{x}{L_0}\right) \text{tg}\alpha}, \\
 \alpha = \arccos \left[\left(1 - \frac{x}{L_0}\right) \cos \alpha_0 \right], \\
 c(p) = rp + q,
 \end{cases} \quad (1)$$

где T – усилие, развиваемое пневмомускулом, x – сокращение оболочки, D_0 – начальный диаметр оболочки, D – диаметр оболочки после подачи давления, L_0 – начальная длина оболочки, α_0 – начальный угол укладки сетки корда, α – угол укладки сетки корда после подачи

давления, $c(p)$ - жесткость оболочки пневмомускула, r и q – корректировочные коэффициенты, p_A – атмосферное давление, p_M - магистральное давление, p – давление в оболочке пневмомускула.

Динамическая модель пневмомускула представляет собой систему дифференциальных уравнений, которая состоит из уравнения движения пневмомускула и уравнения изменения давления в оболочке пневмомускула, а также уравнений, описывающих изменение следующих параметров пневмомускула: усилия, объема, диаметра, угла сетки корда, жесткости оболочки.

В результате с учетом модели (1) была получена следующая система уравнений для описания процессов наполнения и опустошения оболочки:

$$\left\{ \begin{array}{l} Mx'' = T - Mg - hx', \\ T = \pi D_0 \frac{(p - p_A) D \left(1 - \frac{x}{L_0}\right) - \frac{c(p)}{\operatorname{tg} \alpha_0} \left[\left(1 - \frac{x}{L_0}\right) \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \alpha_0 \right] - c(p) \operatorname{tg} \alpha_0 \operatorname{tg} \alpha \frac{x}{L_0}}{\operatorname{tg} \alpha_0 \operatorname{tg} \alpha} - \frac{\pi D_0^2 (p - p_A)}{4}, \\ p' = a \left[\frac{k f_H \sqrt{RT_M}}{V \sqrt{\zeta_H}} \sqrt{p_M^2 - p^2} \right] + (a - 1) \left[\frac{k f_B \sqrt{RT_M}}{V \sqrt{\zeta_B}} \left(\frac{p}{p_M}\right)^{\frac{k-1}{k}} \sqrt{p^2 - p_A^2} \right] - \frac{kp}{V} V', \\ a = 1 \quad \text{при } p \leq p_M, \\ a = 0 \quad \text{при } p \geq p_A, \\ V = \frac{\pi D^2}{4} (L_0 - x), \\ D = D_0 \left(1 - \frac{x}{L_0}\right) \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha_0}, \\ \alpha = \arccos \left[\left(1 - \frac{x}{L_0}\right) \cos(\alpha_0) \right], \\ c(p) = rp + q, \end{array} \right. \quad (2)$$

где T – усилие, развиваемое пневмомускулом, M – масса груза, Mg – вес груза, h - коэффициент вязкого демпфирования за счет физических свойств материала оболочки, hx' – сила вязкого демпфирования, p – текущее давление в оболочке, p_A – атмосферное давление в оболочке, p_M – магистральное давление, a – коэффициент, который будет определять характер процесса в оболочке пневмомускула (при $a = 1$ происходит процесс наполнения оболочки, при $a = 0$ – процесс опустошения оболочки), k – показатель адиабаты для воздуха, f_H – площадь поперечного сечения входного отверстия ПМ, ζ_H - коэффициент сопротивления линии нагнетания, T_M – температура газа в магистрали, f_B – площадь поперечного сечения выходного отверстия, ζ_B – коэффициент сопротивления линии выхлопа, R – газовая постоянная, V – объем оболочки пневмомускула после подачи давления.

В качестве проверки модели (1) для статического усилия T были получены зависимости развиваемого усилия от относительного сокращения оболочки и выполнено сравнение с экспериментальными кривыми, представленными в каталоге фирмы FESTO (рис. 2).

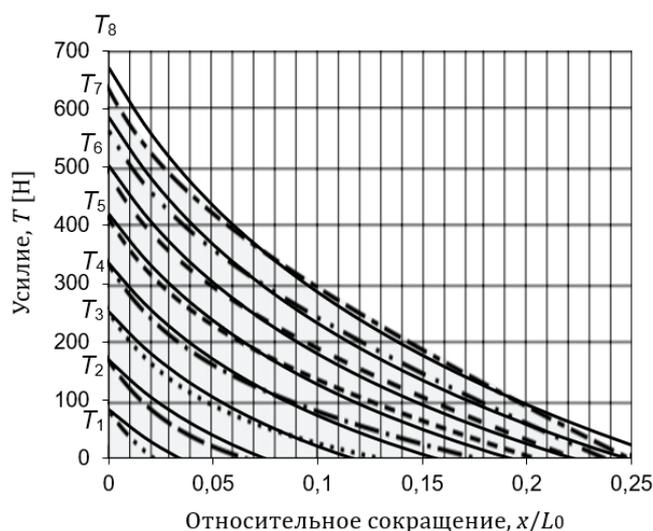


Рисунок 2 – Зависимость усилия пневмомускула от относительного сокращения для DSMP-10: штриховые кривые – эксперимент FESTO, сплошные кривые – результаты расчетов по модели (1); T_1 при $p = 0,1$ МПа; T_2 при $p = 0,2$ МПа; T_3 при $p = 0,3$ МПа; T_4 при $p = 0,4$ МПа; T_5 при $p = 0,5$ МПа; T_6 при $p = 0,6$ МПа; T_7 при $p = 0,7$ МПа; T_8 при $p = 0,8$ МПа

Из рисунка 2 видно, что расхождение с экспериментальными кривыми для типоразмера DSMP-10 лежит в пределах 10 % на режимах $p = 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$ МПа.

Полученное аналитическое выражение усилия пневмомускула отличается от разработанных другими авторами тем, что учитывает изменение угла укладки сетки корда и диаметра оболочки после подачи давления, а также учитывает жесткость материала оболочки, показывает расхождение расчетных кривых с экспериментальными данными FESTO в пределах 10 %, является универсальной для всего размерного ряда пневмомускулов FESTO вне зависимости от длины оболочки и подаваемого давления.

На основе модели (2) были разработаны алгоритмы и программы для теоретических и экспериментальных исследований пневмомускулов.

В третьей главе на основе динамической модели пневмомускула (2) была разработана математическая модель сбалансированного манипулятора, а также методика расчета основных параметров пневмомускула.

Предложены принципы позиционирования сбалансированного манипулятора с ручным управлением:

1. Позиционирование груза с предварительной настройкой пневмосхемы на вес перемещаемых грузов (рис. 3, а): а) позиционирование по высоте с грузом и без груза – автоматически за счет настройки пневмосхемы, б) позиционирование в горизонтальной плоскости – оператором за счет особенностей выбранной кинематической схемы манипулятора типа пантограф и типа привода – пневмомускула, которые обеспечивают уравнивание груза в любой точке рабочей зоны в горизонтальной плоскости.

В результате разработана принципиальная пневматическая схема манипулятора (рис. 3, а), которая по командам оператора нажатием соответствующих кнопок управления обеспечивает выполнение следующих функций:

1. Автоматическое уравнивание стрелы манипулятора на уровне захватываемого груза до и после захвата груза.

2. Автоматический подъем или опускание груза на заданную высоту с возможностью перемещения оператором вручную в горизонтальной плоскости в любую точку рабочей зоны.

3. Одновременное отпусканье груза захватным устройством и автоматическое уравнивание стрелы манипулятора без груза на заданной высоте.

4. Автоматическое опускание или подъем стрелы манипулятора на уровень захватываемого груза до исходного уравновешенного состояния.

II. Позиционирование груза любого веса в любой точке рабочей зоны манипулятора с помощью пневмосхемы, отслеживающей движение руки оператора и не требующей настройки при изменении веса груза и точки позиционирования (рис. 3, б).

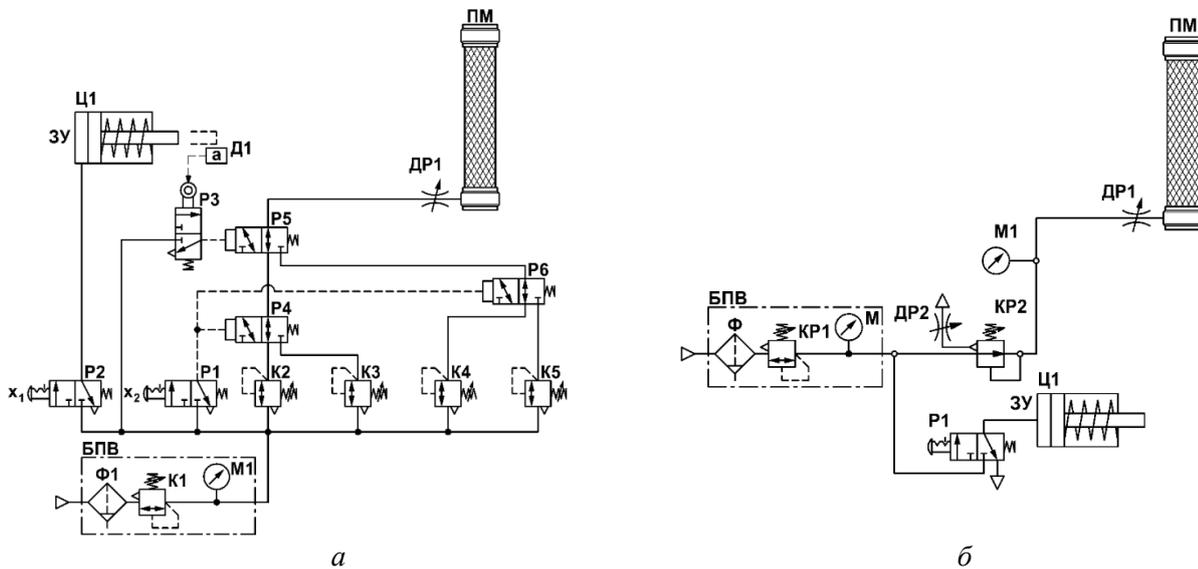


Рисунок 3 – Принципиальные пневматические схемы манипулятора: а) с предварительной настройкой на вес груза, б) не требующей настройки при изменении веса груза

С помощью динамической модели пневмомускула (2) были исследованы следующие режимы работы:

- режим позиционирования груза усилием оператора;
- аварийный режим работы манипулятора.

В рамках исследования режима позиционирования груза были получены расчетные зависимости усилия оператора в случае корректировки им положения груза по высоте от конструктивных параметров пневмомускула, массы груза, точки позиционирования груза и давления, подаваемого в оболочку. Анализ результатов показал, что в соответствии с существующими стандартами оператор сможет скорректировать погрешности позиционирования грузов в диапазоне от 5 мм до 50 мм весом от 100 Н до 1000 Н. При этом усилие оператора не будет превышать норму 50 Н.

В результате исследования работы манипулятора в аварийном режиме установлено, что при обрыве груза скорость ИУ манипулятора будет превышать допустимую даже на малой высоте подъема груза. В результате сформулирован принцип торможения исполнительного устройства манипулятора с пневмомускулом с помощью установки гидродемпфера (рис. 4).

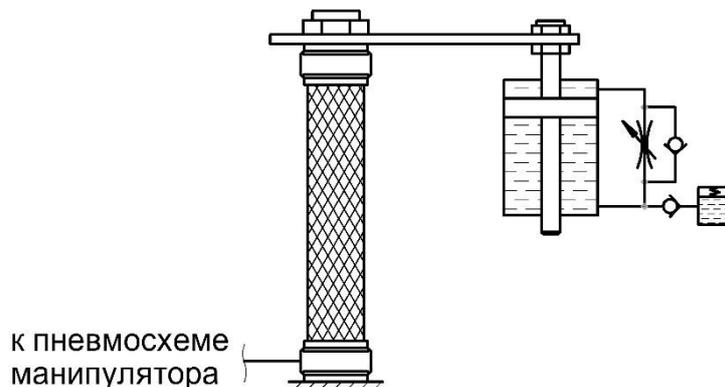


Рисунок 4 – Принципиальная схема пневмопривода с гидродемпфером

С целью уменьшения габаритов и монтажа системы «пневмомускул-гидродемпфер» разработана конструкция пневматического мускула, в состав которого входит встроенный в оболочку гидродемпфер, и подана заявка на полезную модель.

В настоящее время хорошо известны методы анализа и синтеза следящих и позиционных систем, в которых исполнительный орган рассматривается как система с сосредоточенными параметрами. Однако пневмомускул представляет собой систему с распределенными параметрами. Поэтому при построении систем на базе широтно-импульсной модуляции при подаче переменного давления питания определенной частоты и при определенных конструктивных параметрах пневмомускула могут возникать нежелательные колебания давления, связанные с волновыми процессами газа внутри пневмомускула. А это может привести к нежелательным колебаниям исполнительного органа. Поэтому актуальной задачей является разработка методики определения таких нежелательных частот управления в зависимости от параметров пневмомускула и пневмосхемы.

С этой целью разработана динамическая модель пневмомускула, позволяющая рассчитать колебания давления в точке позиционирования.

При составлении данной модели пневмомускула учитывался процесс разгона массы газа внутри пневмомускула; процесс изменения величины массы газа, который приводит к изменению давления, плотности и температуры газа внутри оболочки; процесс изменения давления газа на концах пневмомускула в результате распространения волн давления.

Поскольку в точке позиционирования амплитуда колебаний исполнительного органа пренебрежимо мала по сравнению со всей длиной пневмомускула, то длина пневмомускула принималась постоянной.

В результате была получена следующая математическая модель, описывающая изменение давления на концах пневмомускула:

$$\left\{ \begin{array}{l} mv' = \frac{\pi D_0^2}{4} (p_1 - p_2^* - p_{\text{ТРЕН}}), \\ p_1' = \frac{2RT_M}{V_0} \left(m' - \frac{m}{L_0} v \right), \\ p_2^* = \begin{cases} p_{20}; & t < L_0 / c \\ p_2; & t \geq L_0 / c, \end{cases} \\ p_2' = \frac{2RT_M}{V_0} \frac{m}{L_0} v, \\ p_{\text{ТРЕН}} = \lambda \frac{L_0}{D_0} \frac{mv^2}{2V_0} \text{sign}(v), \\ m' = \frac{f_H}{\sqrt{\zeta_H RT_M}} \sqrt{(p_M^2 - p_1^2) \Phi(p_M - p_1)} - \frac{f_B}{\sqrt{\zeta_B RT_M}} \left(\frac{p_1}{p_M} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \sqrt{(p_1^2 - p_A^2) \Phi(p_1 - p_A)}, \end{array} \right. \quad (3)$$

где m – текущее значение массы газа, заключенного внутри оболочки ПМ, v – средняя скорость газа в оболочке ПМ, D_0 – начальный диаметр оболочки пневмомускула, p_1 – давление за входом в оболочку, p_{20} – начальное давление в конце оболочки ПМ, p_2^* – текущее давление в конце оболочки, p_2 – давление, характеризующее динамику сжатия газа в конце ПМ, $p_{\text{ТРЕН}}$ – потери давления на трение внутри ПМ, t – время распространения волны на входе, c – скорость звука, V_0 – начальный объем оболочки пневмомускула, L_0 – начальная длина оболочки пневмомускула, f_H – площадь поперечного сечения входного отверстия пневмомускула, ζ_H – коэффициент сопротивления линии нагнетания, f_B – площадь поперечного сечения выходного

отверстия пневмомускула, ζ_B – коэффициент сопротивления линии выхлопа, p_M – давление в магистрали, λ – коэффициент сопротивления.

Для того, чтобы объединить уравнения изменения массы газа для наполнения и опустошения в одно единое, была использована ступенчатая функция Хэвисайда $\Phi(x)$, которая имеет следующий вид:

$$\Phi(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } x \geq 0, \\ 0 & \text{при } x < 0. \end{cases}$$

Было исследовано также влияние динамики подводящего трубопровода на колебания исполнительного органа в точке позиционирования. Для этого разработана соответствующая динамическая модель пневмомускула с учетом подводящего трубопровода. При разработке данной модели в подводящем трубопроводе рассматривались те же процессы, что и в оболочке пневмомускула.

На рисунке 5 (а, б) показаны результаты расчетов изменения давления в конце пневмомускула в точке позиционирования, полученные по разным математическим моделям. Красным цветом показан расчет с учетом волновых процессов в пневмомускуле по математической модели (3), синим цветом – расчет по модели (2). Результаты получены при следующих значениях параметров пневмомускула: длина пневмомускула $L_0 = 4$ м, диаметр пневмомускула $D_0 = 0,01$ м, диаметр подводящего трубопровода $D_{TP} = 0,008$ м, коэффициент сопротивления трубопровода $\zeta_H = \zeta_B = 25$.

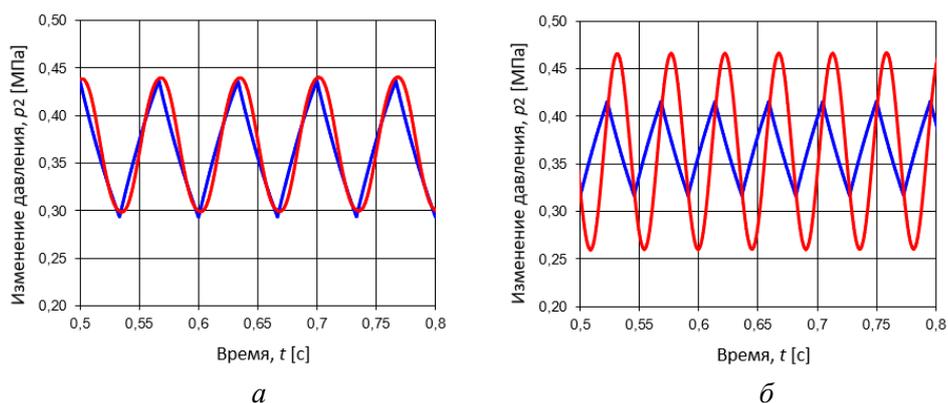


Рисунок 5 – Изменение давления в конце пневмомускула при разных частотах управляющего сигнала: а) $n = 15$ Гц, б) $n = 22$ Гц; синяя кривая – результаты расчета по модели (2), красная кривая – результаты расчета по модели (3)

Из рисунка 5 видно, что ошибка расчетов по модели (2) может достигать 110 %.

Таким образом, применение математической модели (3), учитывающей возникновение колебаний газа в полости пневмомускула позволит при создании позиционных и следящих систем с широтно-импульсной модуляцией исключить нежелательные частоты управления.

Четвертая глава посвящена экспериментальной проверке аналитической модели для статического усилия (1) и динамической модели пневмомускула (2), а именно:

- статических зависимостей сокращения и изменения диаметра оболочки от подаваемого давления;
- статических зависимостей усилия оператора для корректировки погрешности позиционирования груза от подаваемого давления;
- динамических зависимостей перемещения груза и изменения давления в оболочке пневмомускула.

Описываются экспериментальная установка и характеристики оборудования.

Экспериментальная установка представлена на рисунке 6.

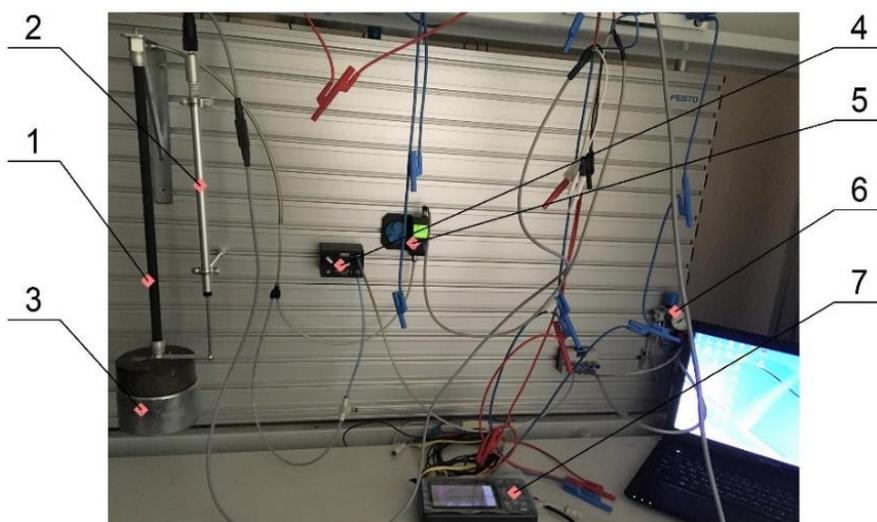


Рисунок 6 – Экспериментальная установка для исследования статических и динамических характеристик пневматического мускула

Установка имеет следующие составные части и оборудование: 1 – пневмомускул FESTO DMSP-10-400N-PM-CM, 2 – датчик движения TWK D-40041 RP 12/300, 3 – груз, 4 - пневматический распределитель FESTO DIDACTIC D: S-PSV-3/2-S-3+S, 5 – датчик давления FESTO SDE1-D10-G2-H18-C-PU-M8, 6 – блок подготовки воздуха FESTO LFR-QS4-5M-MICRO, 7 – аналогово-цифровой преобразователь. Сжатый воздух подается в систему с помощью силовой установки (компрессор JUN-AIR модель 6–25).

Расхождение экспериментальных и расчетных статических зависимостей изменения диаметра и длины оболочки пневмомускула при подъеме и опускании груза составляет не более 15 %. Также были исследованы режимы корректировки погрешности позиционирования груза усилием оператора. Расхождение расчетных кривых с экспериментальными в этом случае составило не более 11 %.

При обработке экспериментальных данных по статическим характеристикам было обнаружено явление гистерезиса при наполнении и опустошении пневмомускула (рис. 7). В результате, полученная ранее аналитическая модель для статического усилия пневмомускула (1) была скорректирована.

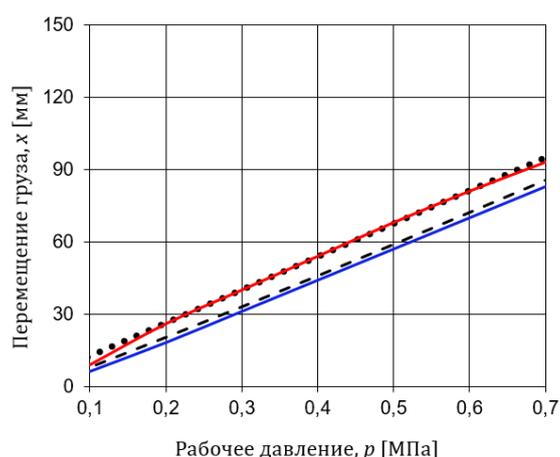


Рисунок 7 – Зависимость величины перемещения груза от давления питания при массе груза 2,5 кг: синяя и красная кривые – расчетные зависимости процесса наполнения и опустошения оболочки соответственно по ММ (2), штриховая и точечная кривые – экспериментальные кривые процессов наполнения и опустошения оболочки соответственно.

На экспериментальной установке также были проведены исследования изменения давления в оболочке пневмомускула и перемещения груза при его подъеме, фиксации в точке позиционирования и опускании. Расхождения динамических экспериментальных кривых с расчетными, полученными по модели (2), составляют не более 5 % для изменения давления и не более 13 % для перемещения груза.

Основные результаты

1. Разработана аналитическая зависимость статического усилия пневмомускула FESTO от его конструктивных параметров с учетом диаметра и длины пневмомускула, угла укладки сетки корда и жесткости оболочки. Расхождение расчетных кривых с экспериментальными находится в пределах 10 %. Разработанная зависимость является универсальной для всего размерного ряда пневмомускулов фирмы FESTO.

2. Разработана динамическая модель пневматического мускула FESTO с учетом геометрии сетки корда и жесткости оболочки.

3. Разработана математическая модель позиционного манипулятора мускульного типа с ручным управлением.

4. Получены расчетные зависимости усилия оператора, позволяющие оценить возможность корректировки погрешности позиционирования груза на стадии проектирования пневматического манипулятора.

5. Разработана методика выбора основных параметров пневмомускула при проектировании пневматических устройств.

6. Предложена методика выявления частот управления пневмоаппаратуры в режиме широтно-импульсной модуляции, исключающих колебания груза в следящих и позиционных системах в точке позиционирования. Методика включает в себя разработанные динамические модели пневмомускула, учитывающие влияние колебаний воздуха в пневмомускуле на его характеристики.

7. Предложен принцип торможения привода манипулятора, который исключает аварийные ситуации при обрыве груза. Разработана конструкция пневмомускула со встроенным гидродемпфером и подана заявка на полезную модель.

8. Разработаны принципы позиционирования сбалансированного манипулятора с ручным управлением: 1) позиционирование манипулятора с предварительной настройкой пневмосхемы на вес перемещаемых грузов: а) позиционирование по высоте с грузом и без груза – автоматически за счет настройки пневмосхемы, б) позиционирование в горизонтальной плоскости – оператором за счет особенностей выбранной кинематической схемы манипулятора типа пантограф и типа привода – пневмомускула, которые обеспечивают уравнивание груза в любой точке рабочей зоны в горизонтальной плоскости. 2) позиционирование груза любого веса в любой точке рабочей зоны манипулятора с помощью пневмосхемы, отслеживающей движение руки оператора и не требующей настройки при изменении веса груза и точки позиционирования.

9. Разработан экспериментальный стенд для проведения исследований статических и динамических характеристик пневматического мускула, с помощью которого была проведена валидация разработанных математических моделей.

10. На основе полученных экспериментальных данных по гистерезису статических характеристик пневмомускула при подъеме и опускании груза была выполнена корректировка аналитической зависимости статического усилия пневмомускула.

**Публикации по теме диссертации
В изданиях Перечня ВАК**

1. Донской А.С., Коткас Л.А. Математическое моделирование статических характеристик пневматического мускула // Вестник УГАТУ. - 2018. - № 4. - С. 48-55.
2. Коткас Л.А., Донской А.С., Жарковский А.А. Математическое моделирование пневматического манипулятора мускульного типа // Известия МГТУ "МАМИ". - 2019. - № 3. - С. 47-56.
3. Коткас Л.А., Донской А.С., Жарковский А.А. Исследование позиционирования привода мускульного типа усилием оператора при вертикальном перемещении груза // Известия МГТУ "МАМИ". - 2020. - № 1. - С. 65-72.

В изданиях, индексируемых Scopus:

1. Donskoj A.S., Kotkas L.A., Salova T.P., Barilovich V., Girshov V., Mertens K.K., Cherkesov G., Fokin G., Akmetova I.G. Modelling the static and dynamic characteristics of pneumatic muscle // IOP Conference Series: Earth & Environmental Science. - November 2019. - Vol. 337. - Issue 1.
2. Kotkas L., Zhurkin N., A. Donskoy, A. Zharkovskij Mathematical Modelling of Balanced Manually Operated Pneumatic Artificial Muscle Manipulator in Matlab/Simulink environment // Proceedings of IEEE International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines, DVM. - 16-18 September 2020. - Samara, Russian Federation.

В прочих изданиях:

1. Донской А.С., Коткас Л.А. Математическая модель пневматического мускула // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. - 13-19 ноября 2017 г. - Институт энергетики. СПб.: Политех-Пресс, 2017. - С. 135-137.
2. Донской А.С., Коткас Л.А. Моделирование статических и динамических характеристик пневматических мускулов фирмы FESTO // Гидравлика. Электрон. журн. 2019. №7. URL: <http://hydrojournal.ru/images/JOURNAL/NUMBER7/DonskoyKotkas.pdf>
3. Донской А.С., Коткас Л.А. Динамические характеристики пневматического мускула // Гидравлические машины, гидропневмоприводы и гидропневоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития: сборник научных трудов международной научно-технической конференции. - СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2018. - С. 344-354.
4. Донской А.С., Коткас Л.А. Математическая модель пневматического мускула // Гидравлические машины, гидропневмоприводы и гидропневоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития: сборник научных трудов международной научно-технической конференции. - СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2018. - С. 297-306.
5. Донской А.С., Коткас Л.А. Исследование динамических характеристик промышленного манипулятора мускульного типа // Гидравлика. Электрон. журн. - 2019. - № 9. URL: <http://hydrojournal.ru/images/JOURNAL/NUMBER9/Kotkas.pdf>
6. Донской А.С., Коткас Л.А. Экспериментальное исследование характеристик привода мускульного типа // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. - 18–23 ноября 2019 г. - Институт энергетики. СПб.: Политех-Пресс, 2020. - С. 233-235.
7. Журкин Н.А., Коткас Л.А. Донской, А.С. . Моделирование пневматического мускула в среде ANSYS Mechanical APDL // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. - 18–23 ноября 2019 г. - Институт энергетики. СПб.: Политех-Пресс, 2020. - С. 238-241.
8. Журкин Н.А., Коткас Л.А. Математическое моделирование пневматического привода в среде Matlab Simulink // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. - 18–23 ноября 2019 г. - Институт энергетики. СПб.: Политех-

Пресс, 2020. - С. 242-244.

9. Журкин Н.А., Коткас Л.А. Моделирование пневматических мышц методом конечных элементов [Электронный ресурс] // XXIII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» (Москва, 4 декабря 2019 г.). Материалы конференции. - М.: Мир науки, 2019. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - С. 143-149.

10. Донской А.С., Коткас Л.А. Методика расчета пневматического привода мускульного типа [Электронный ресурс] // XXIII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» (Москва, 4 декабря 2019г.). Материалы конференции. - М.: Мир науки, 2019. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - С. 164-171.