

На правах рукописи

**УДК 681.587.357**

Зеленов Михаил Сергеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА И АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ  
ПОЗИЦИОННЫМ ПНЕВМОАГРЕГАТОМ**

Специальность 05.04.06 – Вакуумная, компрессорная техника и пневмосистемы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2020

Работа выполнена на кафедре вакуумной и компрессорной техники в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана (национальном исследовательском университете)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Чернышев Андрей Владимирович**

Официальные оппоненты:

Ведущее предприятие:

Защита диссертации состоится «    »    2020 г. в    на заседании диссертационного совета Д 212.141.16 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Лефортовская наб., д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Ваш отзыв на автореферат в 2 экз., заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская улица, д.5, стр.1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.16.

Автореферат разослан «    »    2020г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.141.16  
кандидат технических наук, доцент



О.В. Белова

## Общая характеристика работы

### Актуальность исследования

Применение пневмоагрегатов при решении ряда специфических задач является более предпочтительным по сравнению с использованием электрических и гидравлических агрегатов. Это связано с их характерными преимуществами в простоте конструкции и эксплуатации, в устойчивости к внешним воздействиям (ударные нагрузки, запыленность электромагнитные поля и ионизирующие излучения), низкой удельной массе и доступности сжатого воздуха. Совокупность положительных качеств делает их востребованными при разработке станков, роботизированных производственных комплексов, авиационной, биомедицинской и сельскохозяйственной техники.

Важным направлением исследований является разработка позиционных пневмоагрегатов (ППА), обеспечивающих перемещение поршня в соответствии с изменяющимися требованиями. Для сохранения простоты конструкции для позиционирования используется контролируемая подача сжатого воздуха в полости ППА. Использование традиционных линейных алгоритмов управления (П-, ПИ-, ПИД-регуляторов) при этом не позволяет получить требуемую точность перемещения при работе в широком диапазоне условий (сила внешней нагрузки, положение пневмоагрегата в пространстве). Трудности вызваны нелинейными рабочими процессами, протекающими в ППА: течения рабочей среды через проточные полости запорно-регулирующей арматуры (ЗРА), трении в уплотнительных узлах, теплообмене с окружающей средой. В связи с этим ведется поиск решений в других областях теории управления: системах переменной структуры, нечеткой логике, нейронных сетях и др. Проводились исследования, где для получения комплексного эффекта использовались гибридные алгоритмы, включающие подходы из нескольких указанных областей.

Регулирование подачи и сброса сжатого воздуха может осуществляться с помощью ЗРА различных типов. С точки зрения точности позиционирования и сохранения высоких скоростей перемещения поршня ППА актуальным является применение пропорциональных электромагнитных клапанов (далее ПК), площадь проходного сечения в которых зависит от поданного электрического напряжения. ПК рассматривается как условный дроссель, эффективная площадь проходного сечения в котором зависит от величины поданного сигнала. Материалов, опубликованных производителями ПК, недостаточно для определения эффективной площади во всем рабочем диапазоне.

Сформулированы общие требования к разработке ППА:

- ППА должен обеспечивать перемещение поршня с точностью не хуже 5% от полного хода и сохранять работоспособность в условиях заранее неопределенной силы внешней нагрузки.
- конструкция ППА должна быть простой. В ней должны использоваться штатные решения, поскольку это обеспечивает выполнение требований взаимозаменяемости.



– алгоритм управления ППА должен быть простым и настраиваться автоматически для исключения «человеческого фактора».

В качестве направления исследований выбрано управление с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС). Алгоритмы данной группы хорошо зарекомендовали себя в ряде сравнительных исследований по управлению нелинейными объектами. Принципы настройки ИНС позволяют использовать как данные математического моделирования объекта управления, так и результаты натуральных экспериментов. ИНС могут использоваться для управления ППА в изменяющихся условиях работы. Процесс их настройки может быть автоматизирован для исключения «человеческого фактора» на этой стадии.

В результате проведенного литературного обзора установлено, что на данный момент не существует метода расчета ППА с нейросетевым алгоритмом управления для работы в условиях заранее неопределенной силы внешней нагрузки. Это позволило сформулировать цели и задачи работы.

Целью работы является: разработка метода расчета и алгоритма управления позиционным пневмоагрегатом для работы в условиях заранее неопределенной силы внешней нагрузки.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие задачи:

1. Разработать метод расчета рабочих процессов в ППА, управляемом ПК.
2. Разработать и изготовить стенд для исследования зависимости эффективной площади ПК от сигнала управления и перепада давлений.
3. Разработать и изготовить стенд для определения параметров математической модели рабочих процессов в ППА и проверки ее адекватности.
4. Разработать ППА с нейросетевым алгоритмом управления (НАУ) для работы в условиях заранее неопределенной силы внешней нагрузки.

Объектом исследования является позиционный пневмоагрегат.

Предметом исследования являются рабочие процессы, протекающие в ППА, и алгоритмы управления данным устройством.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Впервые разработан метод расчета рабочих процессов в ППА, управляемом ПК, отличающийся тем, что в математической модели рабочих процессов использована ИНС для определения эффективной площади проходного сечения ПК.
2. Впервые разработан метод настройки ИНС для расчета эффективной площади проходного сечения ПК, позволяющий синтезировать расчетную зависимость на основании экспериментально определенных расходных характеристик.
3. Впервые разработаны НАУ ППА и метод его настройки, позволяющий обеспечить позиционирование в условиях заранее неопределенной силы внешней нагрузки.

Практическая ценность полученных результатов состоит в следующем:



1. Разработана программа настройки ИНС для определения эффективной площади проходного сечения ПК, позволяющая автоматически синтезировать расчетную зависимость на основании ряда расходных характеристик ПК.

2. Разработана программа настройки НАУ ППА, включающая блок подготовки данных на основе вычислительных экспериментов и обеспечивающая автоматическое определение параметров алгоритма управления ППА.

3. Разработан и изготовлен стенд, позволяющий определить параметры и проверить адекватность математической модели рабочих процессов в ППА.

4. Результаты диссертационной работы внедрены в Центре технологических разработок ФГУП «НПО «Техномаш» в рамках ОКР «Прогресс-2025».

5. Разработанный стенд внедрен в учебный процесс в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Достоверность полученных результатов исследования обеспечивается применением приборов, включенных в Государственный реестр средств измерения утвержденного типа. Теоретические исследования базируются на известных положениях в области расчетов пневматического оборудования, изложенных в работах Е.В. Герц, Г.В. Крейнина, И.Л. Кривца, Ю.Л. Арзуманова, Е.М. Халатова. Примененные подходы из теории искусственных нейронных сетей изложены в работах М.В. Буракова, С.И. Николенко, А.А. Кадурина, Е.О. Архангельской, Omatu Sigeru, Khalid Marzuki, В.М. Wilamowski. Адекватность разработанной математической модели подтверждена путем сравнения графиков перемещения и скорости поршня ППА, полученных в результате вычислительных и натуральных экспериментов. Отклонение по скорости не превышает 18%.

Положения, выносимые на защиту. Метод расчета и алгоритм управления ППА. Результаты расчетно-теоретических и экспериментальных исследований рабочих процессов в ППА.

Апробация работы. Результаты работы представлены на конференциях:

1. 15-я научно-техническая конференция «Медико-технические технологии на страже здоровья МЕДТЕХ-2013». (о. Мадейра, Португалия, 2013)

2. 16-я научно-исследовательская конференция «Медико-технические технологии на страже здоровья МЕДТЕХ-2014». (о. Кефалония, Греция, 2014);

3. Восьмая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2015);

4. Девятая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2016);

5. Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по проблемам практической реализации разработок по приоритетным направлениям развития науки и технологий (Москва, 2016);

6. XVI конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (ИКИ РАН, Москва, 2019)

Личный вклад автора заключается в разработке метода расчета и алгоритма управления ППА, разработке методики эксперимента и проведении экспериментальных исследований статических характеристик ПК и динамических режимов в



ППА, разработке программ проведения вычислительных экспериментов и настройки ИНС.

Научные работы. По материалам диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 4 работы в рецензируемых изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ., общим объемом 4,73 п. л.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 122 страницах текста, включая 37 иллюстраций, 6 таблиц и 1 приложение. Библиография насчитывает 98 наименований.

### Содержание работы

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность исследуемого вопроса, сформулирована научная проблема, определены объект и предмет исследования.

В первой главе приведены общие сведения о состоянии вопроса исследования позиционных пневмоагрегатов. Проведен обзор областей применения данных устройств. Рассмотрены типовые схемы позиционирования выходного звена: использование перемещаемых упоров, фрикционного тормоза и алгоритма управления ЗРА. Последняя схема выбрана для сохранения простоты конструкции. ППА включает в себя пневмоцилиндр, систему управления, датчик положения штока, датчики давления и 4 ПК.

Работоспособность традиционных линейных алгоритмов управления (П-, ПИ-, ПИД-регуляторы) ППА серьезно ограничена при изменяющихся внешних условиях работы. Это связано с нелинейностью рабочих процессов, протекающих в ППА. Рассмотренные исследования по сравнению интеллектуальных и гибридных алгоритмов управления показали перспективность использования искусственных нейронных сетей (ИНС).

Для первичной настройки алгоритма управления на базе ИНС используются данные математического моделирования рабочих процессов в ППА. Движение поршня и изменение термодинамических параметров состояния рабочего тела в полостях описываются дифференциальными уравнениями. При определении равнодействующей движущей силы, действующей на поршень, особое внимание уделяется определению эмпирических параметров, влияющих на силу трения в уплотнительных элементах. Материалов производителей и научно-технической литературы недостаточно для расчетов процессов истечения через ПК без дополнительных экспериментальных исследований.

В результате анализа сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке метода расчета рабочих процессов в ППА, управляемом ПК. Расчетная схема ППА состоит из пневмоцилиндра двойного действия с концевым демпфированием и четырех ПК (Рисунки 1,2). Расчетная схема включает набор полостей переменного объема, соединенных каналами постоянного и переменного сечения. На поршень со штоком действуют сила внешней нагрузки, газовая сила и сила трения. Течение рабочей среды через точную полость ПК заменено истечением сжимаемой среды через условный дрос-



сель, площадь проходного сечения в котором зависит от сигнала управления по напряжению (СУ).

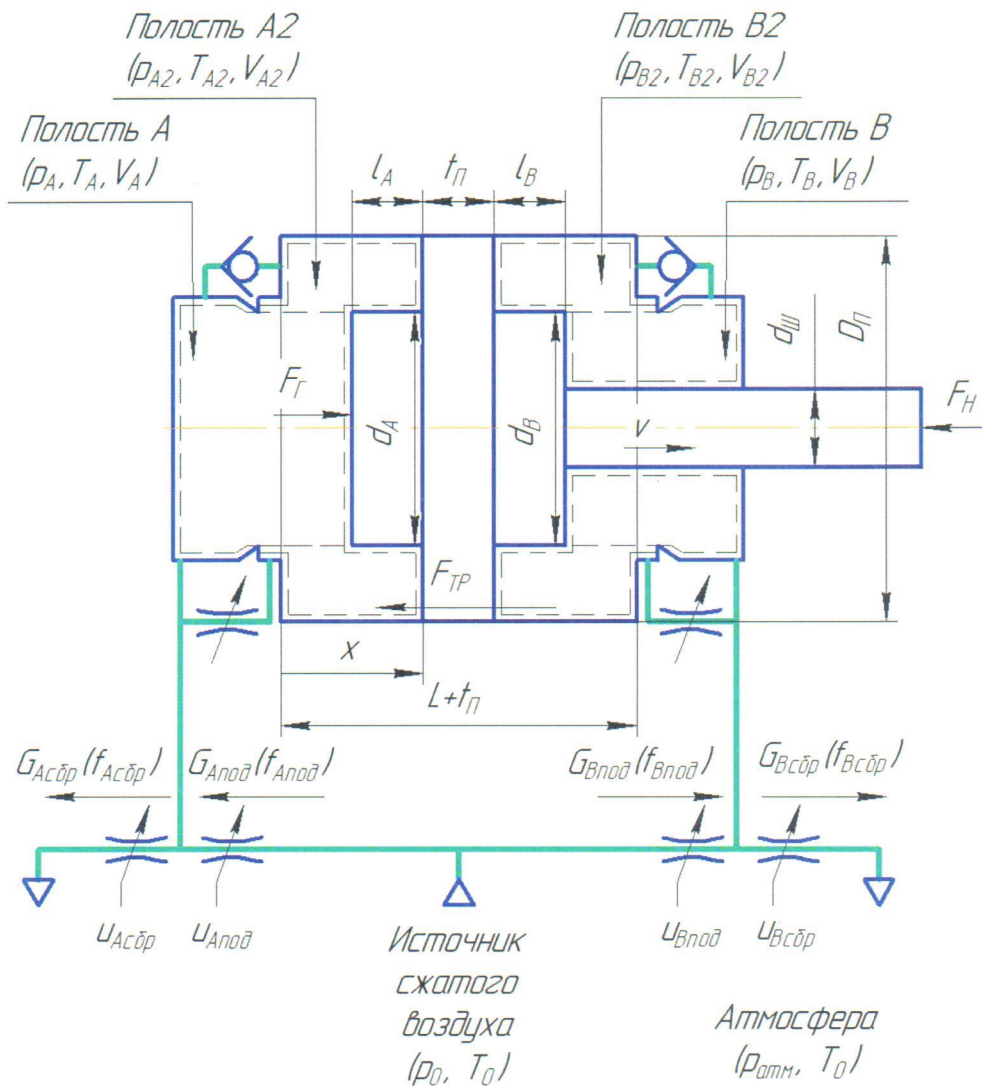


Рисунок 1. Расчетная схема ППА при  $x \in (x_1; x_2)$

Математическая модель рабочих процессов в ППА разработана со следующими допущениями:

- параметры рабочей среды изменяются одинаково во всей газовой полости и не зависят от координаты рассматриваемой точки внутри этой полости;
- рабочее тело – идеальный газ;
- термодинамические процессы квазистационарны;
- давление в источнике сжатого воздуха и атмосферное давление – постоянные.

Основные расчетные зависимости:

Шток пневматического цилиндра (полный ход  $L$ ) диаметром  $d_{\text{Ш}}$  жестко соединен с поршнем диаметром  $D_{\Pi}$ . В торцевых крышках цилиндра расположены уплотнения, разделяющие полости A, A<sub>2</sub> и B, B<sub>2</sub>. Моментом разделения полостей является контакт втулок диаметрами  $d_A$  и  $d_B$  с манжетами ( $x=x_1$  для полостей A и

$A_2$ ;  $x=x_2$  для полостей В и  $B_2$ ). Движение поршня со штоком массой  $m$  описывается уравнением движения материальной точки

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = F_H + F_\Gamma + F_{\text{ТР}},$$

где  $F_\Gamma = f(p_A, p_{A_2}, p_B, p_{B_2}, D_\Pi, d_\Pi, d_A, d_B)$  – газовая сила;  $F_{\text{ТР}} = f(x, v)$  – сила трения;  $F_H = f(t)$  – сила внешней нагрузки, изменяющаяся на отрезке  $[-F_{H\text{МАХ}}; F_{H\text{МАХ}}]$ .

Газовая сила  $F_\Gamma$ , приводящая поршень в движение, зависит от соотношения давлений в полостях А,  $A_2$ , В и  $B_2$ .

$$F_\Gamma = \frac{\pi}{4} \cdot (p_A d_A^2 + p_{A_2} (D_\Pi^2 - d_A^2) - p_{B_2} (D_\Pi^2 - d_B^2) - p_B (d_B^2 - d_\Pi^2) - p_{\text{атм}} d_\Pi^2).$$

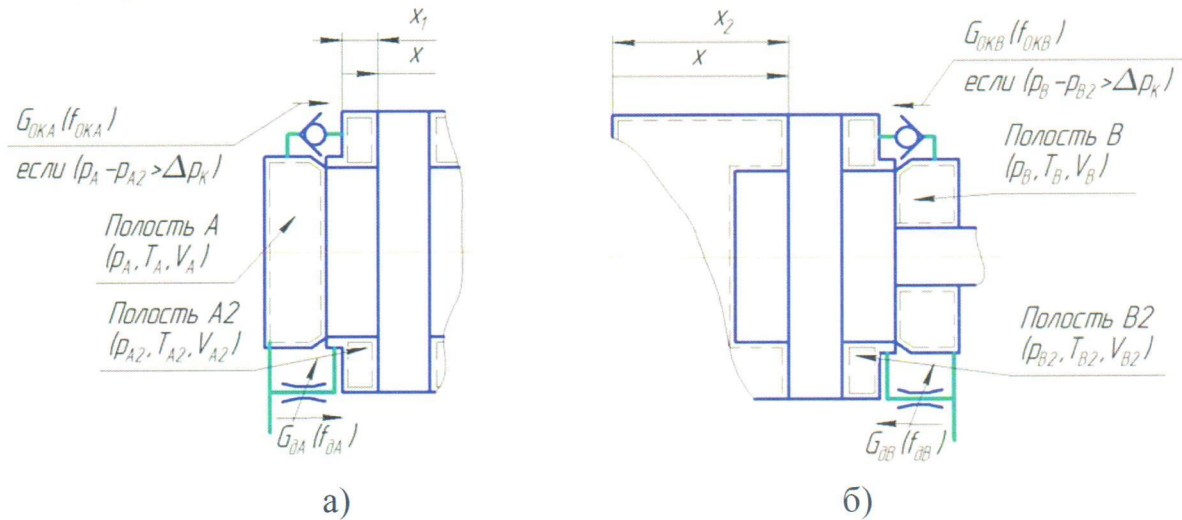


Рисунок 2. Разделение полостей при концевом демпфировании  
а) - при  $x \in [0; x_1]$ ; б) - при  $x \in [x_2; L]$

Состояние рабочего тела в каждой из полостей характеризуется параметрами давлением  $p$ , температурой  $T$  и объемом  $V$ . Объемы полостей зависят от положения поршня  $x$ .

$$V_A = V_{A\text{МО}} + \frac{\pi}{4} d_A^2 \cdot x; \quad V_{A_2} = V_{A_2\text{МО}} + \frac{\pi}{4} (D_\Pi^2 - d_A^2) \cdot x;$$

$$V_B = V_{B\text{МО}} + \frac{\pi}{4} (d_B^2 - d_\Pi^2) \cdot (L - x); \quad V_{B_2} = V_{B_2\text{МО}} + \frac{\pi}{4} (D_\Pi^2 - d_B^2) \cdot (L - x),$$

где  $V_{A\text{МО}}, V_{A_2\text{МО}}, V_{B\text{МО}}, V_{B_2\text{МО}}$  – мертвые объемы полостей А,  $A_2$ , В и  $B_2$ .

Изменение давления и температуры рабочего тела в полостях описываются уравнениями.

$$\frac{dp_A}{dt} = \frac{n_A}{V_A} \cdot \left( G_A^+ RT_A^+ - G_A^- RT_A^- - p_A \frac{dV_A}{dt} \right);$$

$$\frac{dp_{A_2}}{dt} = \frac{n_{A_2}}{V_{A_2}} \cdot \left( G_{A_2}^+ RT_{A_2}^+ - G_{A_2}^- RT_{A_2}^- - p_{A_2} \frac{dV_{A_2}}{dt} \right);$$

$$\frac{dp_B}{dt} = \frac{n_B}{V_B} \cdot \left( G_B^+ RT_B^+ - G_B^- RT_B^- - p_B \frac{dV_B}{dt} \right);$$

$$\frac{dp_{B_2}}{dt} = \frac{n_{B_2}}{V_{B_2}} \cdot \left( G_{B_2}^+ RT_{B_2}^+ - G_{B_2}^- RT_{B_2}^- - p_{B_2} \frac{dV_{B_2}}{dt} \right);$$



$$\begin{aligned}\frac{dT_A}{dt} &= T_A \cdot \left( \frac{dV_A}{V_A dt} + \frac{dp_A}{p_A dt} - \frac{RT_A}{p_A V_A} (G_A^+ - G_A^-) \right); \\ \frac{dT_{A2}}{dt} &= T_{A2} \cdot \left( \frac{dV_{A2}}{V_{A2} dt} + \frac{dp_{A2}}{p_{A2} dt} - \frac{RT_{A2}}{p_{A2} V_{A2}} (G_{A2}^+ - G_{A2}^-) \right); \\ \frac{dT_B}{dt} &= T_B \cdot \left( \frac{dV_B}{V_B dt} + \frac{dp_B}{p_B dt} - \frac{RT_B}{p_B V_B} (G_B^+ - G_B^-) \right); \\ \frac{dT_{B2}}{dt} &= T_{B2} \cdot \left( \frac{dV_{B2}}{V_{B2} dt} + \frac{dp_{B2}}{p_{B2} dt} - \frac{RT_{B2}}{p_{B2} V_{B2}} (G_{B2}^+ - G_{B2}^-) \right),\end{aligned}$$

где  $n_A, n_{A2}, n_B, n_{B2}$  – показатели политропы для процессов в полостях А, А<sub>2</sub>, В и В<sub>2</sub>;  $R$  – газовая постоянная рабочего тела; индекс «+» обозначает расход рабочего тела с температурой  $T^+$ , поступающего в полость; индекс «-» обозначает расход рабочего тела с температурой  $T^-$ , истекающего из полости.

Течение рабочей среды рассчитывается по формуле для истечения сжимаемой среды через малое отверстие, предложенной Сен-Венаном и Ванцелем

$$G = f_{\text{эф}} \cdot p_1 \cdot \begin{cases} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{M}{R \cdot T_1} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{2/k} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} \right]}, & \text{при } \frac{p_2}{p_1} \geq \beta_{\text{кр}} \\ \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{M}{R \cdot T_1} \cdot \left( \frac{2}{k+1} \right)^{2/(k-1)}}, & \text{при } \frac{p_2}{p_1} < \beta_{\text{кр}} \end{cases},$$

где  $f_{\text{эф}}$  – эффективная площадь проходного сечения;  $p_1$  и  $T_1$  – давление и температура рабочего тела в контрольном объеме, из которого происходит истечение;  $p_2$  – давление рабочего тела в контрольном объеме, в который происходит истечение;  $M$  – молярная масса;  $\beta_{\text{кр}}$  – критическое отношение давлений.

Концевое демпфирование исключает удар поршня о торцевую крышку и обеспечивается сжатием рабочего тела в полостях А<sub>2</sub> и В<sub>2</sub>. Регулируемые дроссели с площадями проходных сечений  $f_{\text{дА}}$  (Рисунок 2а) и  $f_{\text{дВ}}$  (Рисунок 2б) служат для постепенного выравнивания давления. В конструкции предусмотрены обратные клапаны с площадями проходных сечений  $f_{\text{оКА}}$  (Рисунок 2а) и  $f_{\text{оКВ}}$  (Рисунок 2б).

Сила трения  $F_{\text{ТР}}$  описывается по зависимости для статического трения, предложенной Бо и Павелеску.

$$F_{\text{ТР}} = \begin{cases} \left( F_C + (F_S - F_C) \cdot e^{-\left| \frac{v}{v_s} \right|} \right) \cdot \text{sgn}(v) - k \cdot v, & \text{если } v \neq 0 \\ F_{\Gamma} + F_{\text{Н}} - m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2}, & \text{если } v = 0 \text{ и } \left| F_{\Gamma} + F_{\text{Н}} - m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} \right| < F_S, \\ F_S, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

где  $F_C$  – кулоновское сухое трение,  $F_S$  – трение покоя,  $v_s$  – характерная скорость Штрибека;  $k$  – коэффициент вязкого трения



Сила внешней нагрузки  $F_H$  является внешним параметром для разработанной математической модели. Она может изменяться произвольным образом в диапазоне  $[-F_{HMAX}; F_{HMAX}]$ .

Подача и сброс рабочего тела в полости А и В осуществляются с помощью четырех ПК. Эффективная площадь проходного сечения в каждом из них зависит от перепада давлений на клапане  $\Delta p_{ПК}$  и от СУ  $u$ . Из-за сложности протекающих в ПК газодинамических и электромагнитных процессов вместо аналитического описания используется аппроксимация на основе ИНС, включающая группу искусственных нейронов – элементарных преобразований вида

$$z = f \left( \sum_i^N w_i x_i + b \right),$$

где  $z$  – выходной сигнал;  $f$  – функция преобразования, заложенная в искусственном нейроне;  $x_i, i \in [1, N]$  – элемент вектора входных сигналов;  $w_i$  – весовой коэффициент  $i$ -ого входного сигнала;  $b$  – сигнал смещения.

Суть ИНС состоит в соединении нейронов таким образом, что выходные сигналы одних составляют вектор входных сигналов для других. Для расчета эффективной площади в ПК используется ИНС прямого прохождение, состоящая из трех слоев. В качестве входных сигналов ИНС используется вектор  $(u, \Delta p_{ПК})$ . Выходной сигнал ИНС соответствует эффективной площади  $f_{ЭФ.ПК}$ . Количество нейронов в первом и втором слоях зависит от необходимой точности аппроксимации. Нейроны первого и второго слоев включают преобразование гиперболический тангенс. Нейрон последнего слоя включает преобразование типа ReLU (от rectified linear unit – линейный выпрямитель), выбранное, поскольку клапан должен отсекал поток рабочей среды.

$$z(s) = \max(s; 0)$$

Переходы между слоями характеризуются матрицами весовых коэффициентов связей между нейронами. Данные коэффициенты и число нейронов в слоях должны быть подобраны так, чтобы обеспечить минимальное отклонение расчетной эффективной площади от фактического значения.

Условия однозначности:

Начальные условия расчета по математической модели включают значения следующих параметров  $x, v, p_{A1}, p_{A2}, p_B, p_{B2}, T_{A1}, T_{A2}, T_B, T_{B2}, u_{Апод}, u_{Асбр}, u_{Впод}, u_{Всбр}$  при  $t = 0$ . Конечным условием расчета является  $t = t_{МАХ}$ . При работе с математической моделью используются граничные условия:  $x \in [0; L]$ ;  $u_{Апод} \in [0; 100]\%$ ,  $u_{Асбр} \in [0; 100]\%$ ,  $u_{Впод} \in [0; 100]\%$ ,  $u_{Всбр} \in [0; 100]\%$ .

Программа для выполнения расчетов на основании математической модели разработана в пакете Labview. Перед выполнением расчета выбираются используемый алгоритм управления, а также закон изменения силы внешней нагрузки. Результатом расчета является таблица данных, содержащая значения  $x, v, p_{A1}, p_{A2}, p_B, p_{B2}, u_{Апод}, u_{Асбр}, u_{Впод}, u_{Всбр}$  в разные моменты времени в течение заданного периода.

В третьей главе описаны разработанные стенды, методики и результаты экспериментальных исследований параметров ППА.



ИНС для расчета эффективной площади в ПК – трехслойная, прямого прохождения. Задачей исследования являлся выбор количества нейронов на каждом из слоев и определение весовых коэффициентов. В качестве критерия качества настройки использовалось среднеквадратическое отклонение (СКО)  $C$ .

$$C = \frac{1}{2 \cdot P \cdot M} \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^M (D_{i,j} - Y_{i,j})^2,$$

где  $D$  – матрица выходных сигналов в соответствии с базой, включающей  $P$  примеров;  $Y$  – матрица выходных сигналов ИНС, полученная для всех примеров из базы;  $M$  – количество выходных сигналов ИНС.

Набор примеров соответствия входных и выходных сигналов формировался по результатам измерения расхода в зависимости от перепада давлений на ПК и величины поданного сигнала. Для исследования выбран ПК AP-7211-QR2-U711 (Camozzi). Измерение объемного расхода выполнялось по датчику PFMB7501-F04-C (SMC). Давление на входе и выходе ПК измерялось с помощью датчиков PSE530-M5-L (SMC). Для варьирования напряжения и сбора данных с датчиков давления использована плата микроконтроллера Arduino UNO R3. Изменение СУ и обработка сигналов с датчиков давления выполняются в программе, разработанной в пакете Labview.

Максимальный рабочий перепад давлений для выбранного ПК составляет 0,4МПа. Настройка перепада давлений при измерениях производилась вручную путем регулирования дросселя. Измерения расхода производились для перепадов давлений 0,386МПа; 0,297МПа; 0,201 МПа; 0,137МПа; 0,052МПа. Изменение СУ производилось в диапазоне от 0 до 100% с шагом 4%. Этап подготовки данных включал нормирование и разбиение на группы примеров. Нормирование входных сигналов проводилось к интервалу  $[-1;1]$ , выходных – к интервалу  $[0;1]$  в связи с выбором в качестве функции нейрона выходного слоя функции ReLU.

Нормированный массив разбит в соотношении 7:2:1. Первая часть – настроечная выборка, вторая – проверочная, третья – итоговая. На основании метода Левенберга-Марквардта в пакете Labview разработана программа настройки ИНС, которая в дальнейшем использована при настройке сетей, описанных в главе 4.

В результате настройки получена трехслойная ИНС. Количество нейронов на первом слое – 3, на втором – 3, на третьем – 1. Настройка остановлена при СКО на проверочной выборке  $C' = 7,9 \cdot 10^{-5}$ . На итоговой выборке получено СКО –  $8,04 \cdot 10^{-5}$ . Данное значение соответствует среднему абсолютному отклонению 0,8 %. С использованием ИНС построена поверхность расходов через исследованный ПК (Рисунок 3).



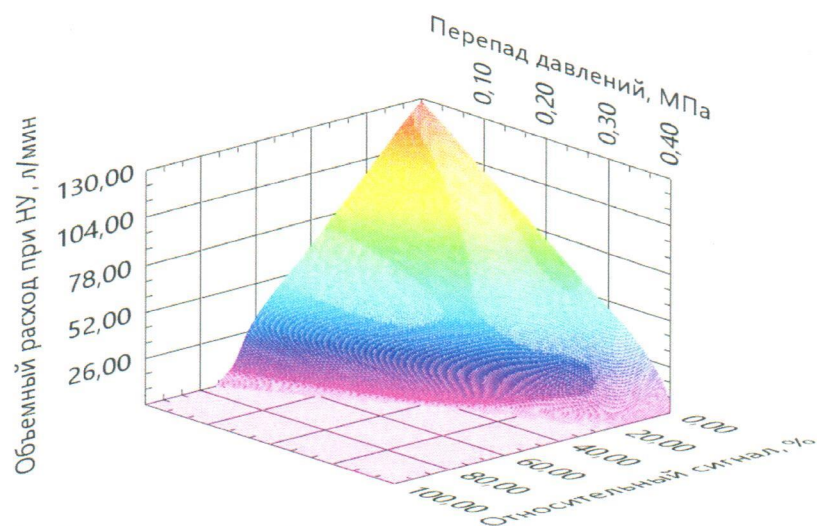


Рисунок 3. Поверхность объемных расходов, рассчитанных с помощью ИНС

Основным элементом ППА является пневмоцилиндр 61M2P050A0200 фирмы Samozzi. Для исследования рабочих параметров ППА разработан и изготовлен стенд (Рисунок 4). Конструкция состоит из пяти блоков: I. – система управления (персональный компьютер HP ProBook 430 G4, плата микроконтроллера Arduino UNO R3, два ключа RDC1-S2 N power MOSFET и блок питания); II. – система датчиков (2 датчика давления PSE530-M5-L, резистивный датчик положения КТС-275); III. – пневматический цилиндр; IV. – блок из 4 ПК; V. – блок подготовки сжатого воздуха. Взаимодействие со стендом осуществляется в программе, разработанной в пакете Labview. Все использованные датчики включены в Государственный реестр средств измерений.

На стенде проведен ряд экспериментов, направленных на идентификацию параметров математической модели: положений начала концевого демпфирования и параметров модели трения. Начало демпфирования определялись по излому графика скорости от положения. В результате исследования получены следующие характерные координаты  $x_1 = 0,02$ ;  $x_2 = 0,177$ .

Проведена серия экспериментов по возвратно-поступательному движению поршня при различных СУ для клапанов подачи и полностью открываемых клапанах сброса. Получено распределение сил трения в зависимости от значения скорости движения поршня ППА. Целью исследований было получение параметров  $F_C, F_S, v_S, \delta, k$  формулы для описания трения в зависимости от положения поршня, а также величины и направления скорости поршня. Расчет коэффициентов производился с помощью блока Nonlinear Curve Fit пакета Labview. Экспериментальное распределение и результаты расчета по формуле Павелеску и Бо приведено на Рисунке 5. Полученные параметры приведены в Таблице 1.

При расчете по методу Эйлера возникает накопленное отклонение. Для проверки адекватности исследовано соответствие между положением и скоростью поршня при возвратно-поступательном движении. На Рисунке 6, в качестве примера, представлены экспериментальные точки, полученные при возвратно-



поступательном движении при включении ПК подачи СУ 80%, и полном включении ПК сброса. Отклонение по скорости не превышает 18%.

Таблица 1

Параметры модели трения

Диапазон $x, v$	$F_C$	$F_S$	$v_S$	$\delta$	$k$
$x \in [0, x_1], v < 0$	-7,81717	43,0757	-0,046912	1,78612	-418,344
$x \in [x_1, x_2], v < 0$	-7,81717	11,7802	-0,035843	1	-418,344
$x \in [x_2, L], v < 0$	-7,81717	150,5234	-0,039714	2,58462	-418,344
$x \in [0, x_1], v > 0$	2,89608	152,52	0,06673	1,20537	-262,938
$x \in [x_1, x_2], v > 0$	2,89608	15,0432	0,0001	1	-262,938
$x \in [x_2, L], v > 0$	2,89608	35,1919	0,02697	1,89879	-262,938

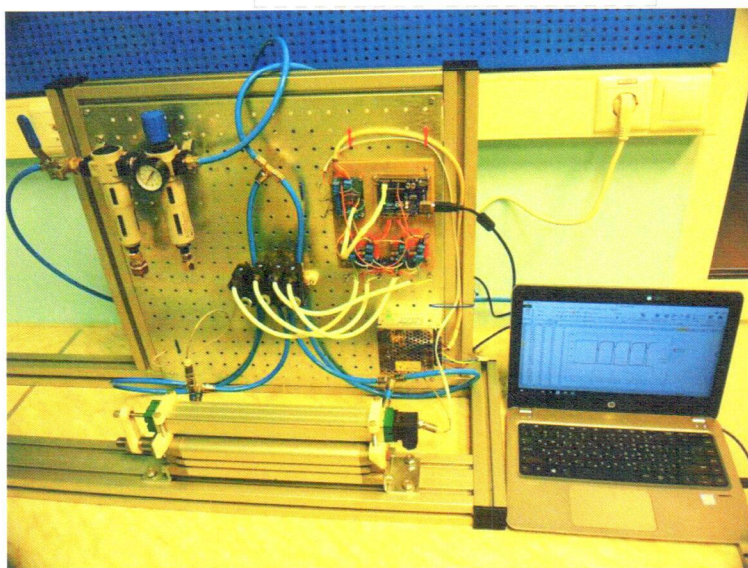
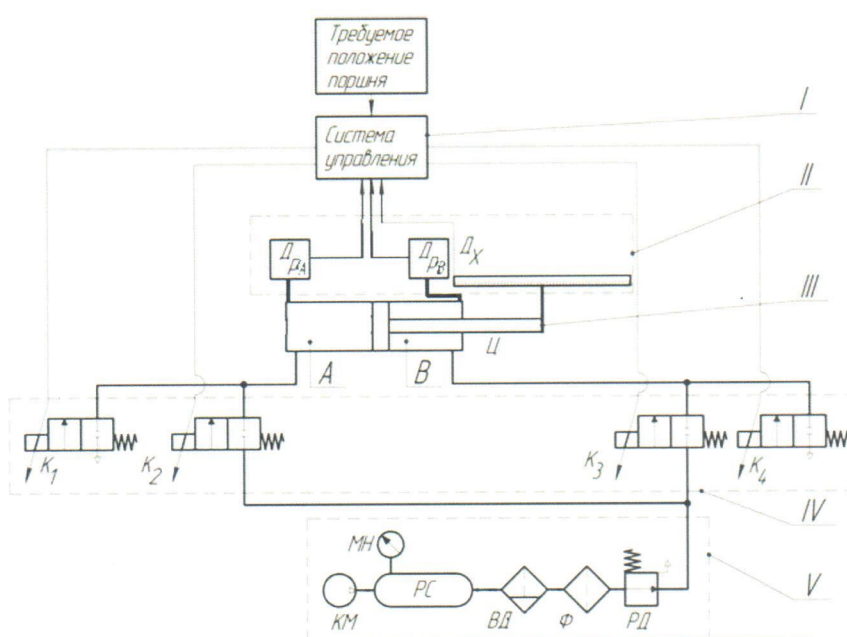


Рисунок 4. Принципиальная схема стенда и его фотография

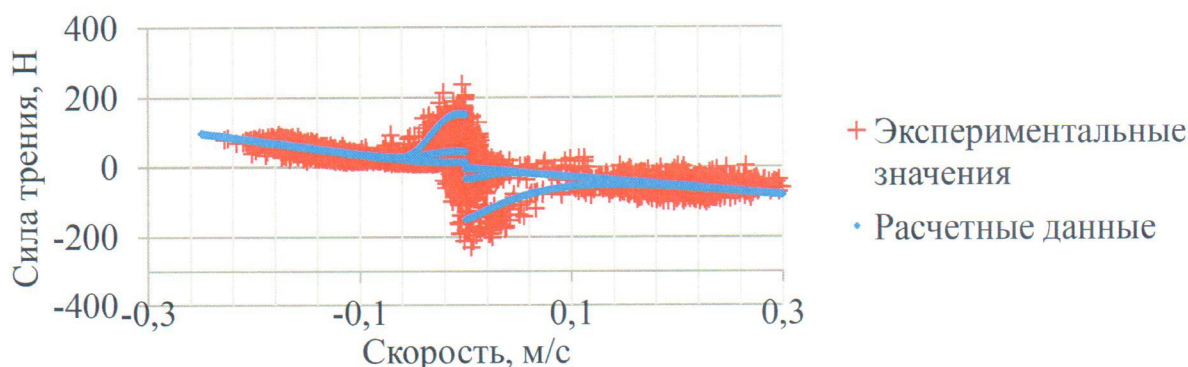


Рисунок 5. Экспериментальные значения и результаты расчета  
учетом полученных эмпирических параметров

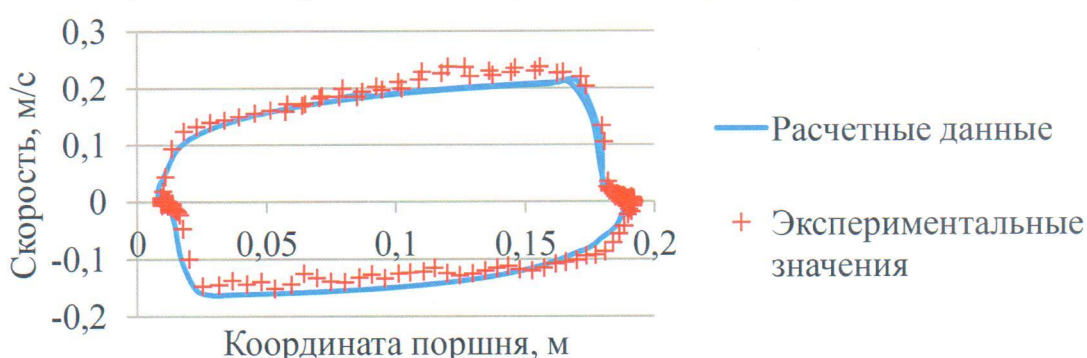


Рисунок 6. Сравнение экспериментальных значений с  
расчетными данными  $v(x)$

Представленная модель позволяет описать, в том числе, движение поршня, конечное демпфирование, срабатывание пропорциональных клапанов при подаче неполного сигнала.

Четвертая глава посвящена разработке ППА с НАУ.

Алгоритм управления позволяет рассчитать вектор СУ, который требуется подать в данный момент на ПК. Расчет производится на основании требуемого положения поршня, показаний системы датчиков и СУ, поданные ранее. Для настройки сети использована схема с нейроэмулятором (НЭ) и нейроконтроллером (НАУ) (Рисунок 7). Для этого использованы две взаимосвязанных ИНС. Первая представляет собой алгоритм управления, а вторая, НЭ, предсказывает отклик на поданный вектор СУ. Настройка НАУ включает четыре этапа: выявление отклика на случайные СУ; настройка НЭ для имитации отклика; настройка двух взаимосвязанных ИНС; проверка и эксплуатация НАУ.

На Рисунке 7 каждый оранжевый узел представляет нейрон с функцией ReLU, а зеленый узел – нейрон с функцией гиперболический тангенс. Входной вектор описывает параметры состояния и СУ на двух итерациях:  $i$ -ой и  $(i-1)$ -ой. Выходной вектор включает положение на  $(i+1)$ -ой итерации.

Проведена серия вычислительных 1000 экспериментов для выявления отклика ППА на случайные СУ и составления набора примеров для настройки НЭ. Сила нагрузки в каждом из них выбиралась случайным образом из интервала  $F_H \in [-100; 100]$  Н. Сформирована таблица с положениями поршня, давлениями



и СУ в моменты отслеживания. Нормирование входных и выходных сигналов проводилось к интервалу  $[-1;1]$ . Значения сгруппированы в примеры в соответствии со схемой. СУ для каждой пары клапанов, отвечающих за одну полость, не должны подаваться одновременно они сгруппированы следующим образом

$$u_A = u_{\text{АПод}} - u_{\text{АСбр}}; \quad u_B = u_{\text{ВПод}} - u_{\text{ВСбр}}$$

Полный набор примеров перемешан и разбит на настроечную, тестовую и итоговую выборки в соотношении 6/3/1.

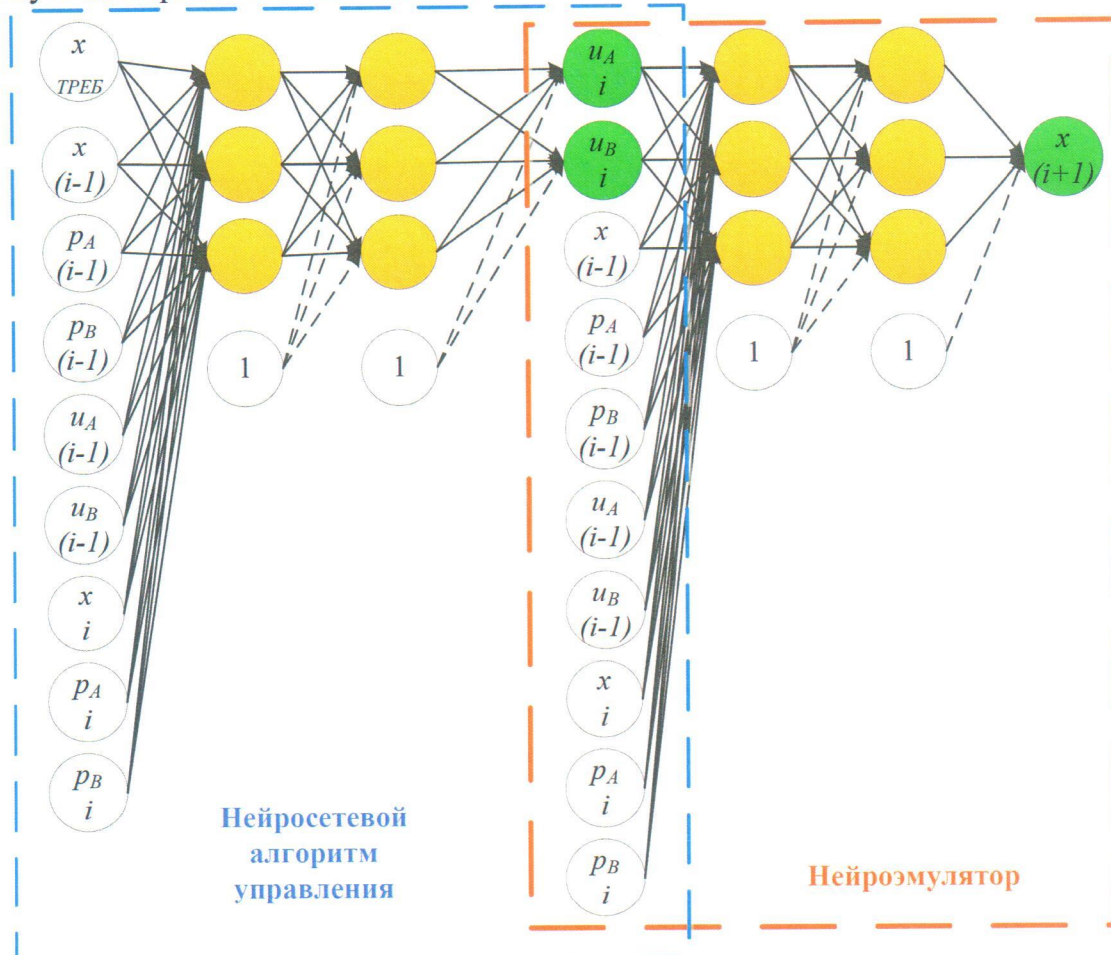


Рисунок 7. Совокупная ИНС, включающая НЭ и НАУ

Для разработки НЭ выбрана трехслойная ИНС прямого прохождения. Количество нейронов по слоям: первый – 14; второй – 11; третий – 1. Настройка выполнена в программе из Главы 3, и завершена по достижении СКО на тестовой выборке –  $8,91 \cdot 10^{-5}$ . СКО на итоговой выборке –  $9,57 \cdot 10^{-5}$ .

Для разработки НАУ использована совокупная ИНС, часть слоев которой представляет уже настроенный НЭ. СУ стали выходными сигналами нейронов промежуточного слоя (зеленые узлы). Для преобразования в соответствующих нейронах использовался гиперболический тангенс. В оранжевых узлах использована функция ReLU. Весовые коэффициенты совокупной ИНС определялись в программе из главы 3. При настройке коэффициенты, относящиеся к НЭ, не изменялись. Входной вектор включал параметры состояния ППА на  $i$ -ой и  $(i-1)$ -ой итерациях, СУ с  $(i-1)$ -ой итерации, а также требуемое положение. Выходной век-



тор соответствовал выходному вектору НЭ. В качестве требуемого положения при составлении примеров было выбрано положение с (i+1)-й итерации.

Для разработки НАУ выбрана трехслойная ИНС прямого прохождения. Количество нейронов по слоям: первый – 20; второй – 20; третий – 2. Настройка была завершена при среднеквадратическом отклонении на тестовой выборке –  $7,65 \cdot 10^{-5}$ . Среднеквадратическое отклонение на итоговой выборке –  $8,23 \cdot 10^{-5}$ .

Проведена проверка НАУ ППА по перемещению поршня из одного статического положения ( $x=0,1$  м) в другое ( $x=0,16$  м) при различных значениях силы нагрузки (Рисунок 8 а). После торможения при всех нагрузках отклонение положения от заданного не превышает 2 мм, то есть 1% от полного хода.

Проведена проверка НАУ по динамическому отслеживанию заданного синусоидального закона (Рисунок 8 б). Подтверждена возможность отслеживания положения. После выхода на заданную траекторию локальное отклонение от уставки не превышает 7,3 мм, что составляет 3,66% от полного хода.

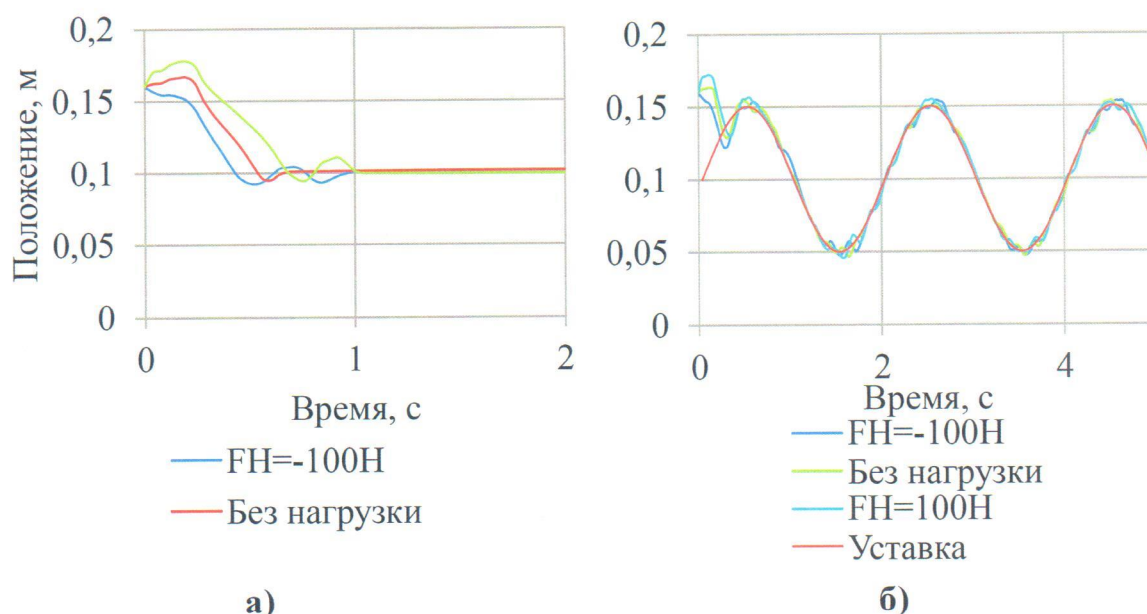


Рисунок 8. Результаты проверок ППА с НАУ

- а) - графики перемещения между статическими положениями  
 б) - графики отслеживания синусоидального закона

Полученные результаты отвечают комплексу требований, предъявляемых к ППА в части точности позиционирования (не менее 5% от полного хода) при различных значениях силы внешней нагрузки. Разработанный ППА имеет простую конструкцию выполненную из стандартных комплектующих. Разработанный метод настройки НАУ автоматизирован для «исключения человеческого фактора». Результат второй серии экспериментов позволяет утверждать о возможности динамического отслеживания заданного закона перемещения при изменении силы внешней нагрузки.

Разработанная программа расчета эффективной площади в запорно-регулирующей арматуре с помощью искусственной нейронной сети внедрена в комплекс математического моделирования пневмогидравлических систем Центра технологических разработок ФГУП «НПО «Техномаш». Результаты дис-



сертационной работы использованы при разработке эскизного проекта на вакуумную напылительную установку для нанесения износостойких и высокоэлектропроводных покрытий в рамках ОКР «Прогресс-2025», включенной в Федеральную космическую программу России на 2016-2025 годы.

### **Основные результаты, выводы и заключение**

1. Разработан метод расчета рабочих процессов в ППА, управляемом пропорциональными ПК. Впервые для определения эффективной площади в пропорциональных ПК на основании сигнала управления и перепада давлений использована ИНС.

2. Разработан и изготовлен стенд для исследования зависимости эффективной площади пропорционального ПК от сигнала управления и перепада давлений. Полученные экспериментальные данные были использованы в методе расчета и программе, разработанных для определения структуры и весовых коэффициентов ИНС. В результате получена трехслойная ИНС прямого прохождения для расчета эффективной площади выбранного пропорционального ПК при СУ в диапазоне от 0 до 100% и при перепаде давлений в диапазоне от 0 до 0,4 МПа.

3. Разработан и изготовлен стенд для определения параметров математической модели рабочих процессов в ППА и проверки ее адекватности. Экспериментальные исследования позволили определить параметры модели трения, разработанной на основании кривой Штрибека. Для проверки адекватности проведено сравнение графиков скорости поршня от его положения, полученных в результате эксперимента на стенде и в результате расчета по математической модели. Максимальное отклонение по скорости не превышает 18%.

4. Разработан ППА с НАУ. Разработан метод настройки НАУ на основании результатов вычислительных экспериментов по моделированию рабочих процессов в ППА. Проведены две серии экспериментальных исследований ППА с НАУ при различной силе внешней нагрузки. В первой серии экспериментов осуществлен перевод поршня ППА между двумя статическими положениями. Обеспечено отклонение итогового положения от заданного не превышает 1%. Во второй серии экспериментов осуществлено динамическое отслеживание заданного синусоидального закона перемещения. После выхода на заданную траекторию локальное отклонение от уставки не превышает 3,66% от полного хода.

5. Результаты диссертационной работы внедрены в Центре технологических разработок ФГУП «НПО «Техномаш» в рамках ОКР «Прогресс-2025».

6. Разработанный стенд внедрен в практику учебного процесса в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Перспективы дальнейшей разработки темы:

1. развитие полученных результатов с целью дальнейшего повышения точности позиционирования за счет уточнения математической модели рабочих процессов и использования ИНС других типов;

2. использование результатов исследования при проектировании приводных систем с использованием ППА.



**Основное содержание диссертации опубликовано в работах**

1. Зеленов М.С., Чернышев А.В., Крылов И.В. О принципах разработки нейросетевых регуляторов для позиционных пневматических приводов // Компрессорная техника и пневматика. 2017. № 4. С.28-33. (0,58 п.л./0,46 п.л.)
2. Зеленов М.С., Чернышев А.В., Атамасов Н.В. Применение концепции киберфизических систем в проектировании газового оборудования нового поколения // Компрессорная техника и пневматика. 2018. № 2. С.19-22. (0,28 п.л / 0,14 п.л.)
3. Зеленов М.С., Чернышев А.В., Атамасов Н.В. К вопросу моделирования динамики пневмомеханического устройства // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2018. № 6. С.20-33.(0,81 п.л /0,5 п.л.)
4. Зеленов М.С., Чернышев А.В. К вопросу построения нейросетевой математической модели для оценки объемного расхода сжатого воздуха через пропорциональный клапан // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2019. №.6. С.41-49 (1,04 п.л./1,04 п.л.)
5. Зеленов М.С. Разработка микродозировочного модуля для автоматизированного комплекса пробоподготовки //Молодежный научно-технический вестник. 2013. №3. 13с. (1,5 п.л. /1.5 п.л.)
6. Зеленов М.С. Разработка математической модели позиционного электропневматического привода // Восьмая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России»: сб. тр. Союз машиностроителей России, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. С.609-611. (0,12 п.л./0,12 п.л.)
7. Зеленов М.С. К использованию нейронных алгоритмов для контроля положениявыходного звена пневмопривода // Девятая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России»: сб. тр. Союз машиностроителей России, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана. Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. С. 440-442.(0,17 п.л./0,17 п.л.)
8. Зеленов М.С., Чернышев А.В. Система управления микродозировочным модулем для автоматизированного комплекса пробоподготовки // 15-я научно-техническая конференция «МЕДТЕХ-2013».: Тез. докл. о. Мадейра, Португалия. 2013. С. 155-158 (0.23п.л/ 0.23п.л.)
9. Зеленов М.С., Чернышев А.В. Расчетно-теоретическое исследование рабочих процессов в микродозировочном модуле при дискретном раскапывании жидкости//16-я научно-исследовательская конференция «МЕДТЕХ-2014». Тез. докл. о. Кефалония, Греция. 2014., С. 230-232. (0,17 п.л./0,17 п.л.)
10. Зеленов М.С. Разработка нейросетевой математической модели для оценки объемного расхода через пропорциональный клапан // XVI конференция молодых ученых, посвященная дню космонавтики «Фундаментальные и прикладные космические исследования». Сб.тр. М.: ИКИ РАН, 2019. с.56 . (0,17 п.л./0,17 п.л.)