Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

На правах рукописи

Носков Евгений Игоревич

# Конструкция и методика расчета пневмоприводного вакуумного насоса

05.04.13 – Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

Д.т.н., профессор Донской А.С.

Санкт-Петербург -2015

# Оглавление

Введение	;	5
Глава 1.	Обзор современного состояния проблемы	10
1.1 Ана	ализ типов вакуумных насосов	10
1.1.1	Вакуумный эжектор	10
1.1.2	Плунжерные вакуумные насосы	11
1.1.3	Диафрагмовый (мембранный) насос	14
1.1.4	Пластинчато-роторные вакуумные насосы (ПРВН)	15
1.1.5	Двухроторные вакуумные насосы	17
1.1.6	Спиральный вакуумный насос	20
1.1.7	Винтовые насосы	23
1.2 Ана	ализ типов приводов вакуумных насосов	25
1.2.1	Механический привод	25
1.2.2	Электрический привод	25
1.2.3	Гидравлический привод	26
1.2.4	Пневматический привод	27
1.3 Ана	ализ применимости насосов	29
1.4 Ана	ализ математической модели процессов в пневмоприводном насосе	30
1.5 Ана	ализ современных программных сред	32
1.6 Вы	воды. Задачи исследований	40
Глава 2. 2.1 Раз	Синтез пневматического вакуумного насоса работка принципа построения вакуумного пневмоприводного насоса	43 43
2.1.1	Гравитационный вакуумный генератор	44
2.1.2	Дифференциальный вакуумный пневмоприводной насос	51
2.2 Раз	работка принципиальных пневматических схем вакуумного насоса	53
2.2.1	Пневмосхема гравитационного пневмонасоса	53

2.2.2	Пневмосхема дифференциального вакуумного генератора				
2.2.3	Проблемы энергосбережения в пневмоприводе	58			
2.2.4	Разработка математической модели вакуумного пневмоприводного	насоса62			
2.3 Вы	вод	65			
Глава 3.	Разработка унифицированной программы и интерфейса д	ля расчета			
вакуумно	ого пневмоприводного насоса				
3.1 Pel	шение дифференциальных уравнении в Laoview				
3.1.1	Описание функций решения дифференциальных уравнений				
3.1.2	Пример решения дифференциального уравнения методом Рунге - К	утта 76			
3.2 Бло	очное математическое моделирование привода				
3.3 Pas	вработка программы расчета пневмонасоса вакуума				
3.3.1	Разработка блока для записи уравнений	80			
3.3.2	Разработка блок направления течения газа				
3.3.3	Разработка блока пневматической аппаратуры				
3.3.4	Разработка блока площадей	101			
3.3.5	Разработка блока основ уравнений	102			
3.3.6	Разработка блока Рунге-Кутта	104			
3.3.7	Разработка блока управления	105			
3.3.8	Разработка блока крышек цилиндра	107			
3.3.9	Компоновка блоков	107			
3.4 Пр	авила работы с программой	110			
3.5 Вы	вод	112			
Глава 4.	Исследования вакуумного пневмоприводного насоса	113			
4.1 Це	ли и методы проведения исследований				
4.2 Pes	4.2 Результаты исследования двухкамерного вакуумного пневмонасоса 114				

4.2.1 Пример заполнения интерфейса и вид характеристик 114			
4.2.2 Влияние шага интегрирования на процесс			
4.2.3 Исследование влияния массы поршня на характеристики насоса 123			
4.2.4 Исследование влияния диаметра поршня на характеристики насоса 140			
4.2.5 Исследование влияния хода поршня на характеристики насоса 145			
4.3 Результаты исследования четырехкамерного гравитационного пневмонасоса 151			
4.3.1 Исследование работы насоса на «низком» вакууме 151			
4.3.2 Исследование работы насоса на «среднем вакууме» 154			
4.3.3 Исследование работы насоса на «высоком вакууме» 158			
4.3.4 Пример заполнения интерфейса и вид характеристик 161			
4.4 Результаты исследования четырехкамерного вакуумного пневмонасоса 166			
4.4.1 Исследование влияния диаметра поршня на характеристики насоса 167			
4.4.2 Исследование влияния длины гильзы на характеристики насоса 168			
4.4.3 Пример заполнения интерфейса и вид характеристик 170			
4.5 Выводы 175			
Глава 5. Экспериментальное исследование вакуумного пневмонасоса 176 5.1 Описание экспериментальной установки двухкамерного пневмонасоса 176			
5.2 Экспериментальное исследование двухкамерного пневмонасоса			
5.3 Описание экспериментальной установки четырехкамерного пневмонасоса 185			
5.4 Экспериментальное исследование четырехкамерного пневмонасоса 188			
5.5 Основная элементная база схем 190			
5.6 Выводы 191			
Заключение			
Список литературыОшибка! Закладка не определена.			

#### Введение

Актуальность темы. Активное изучение вакуума началось ещё в середине 17 века и продолжается до сих пор. Научный этап развития техники начался с 1643г., когда учеником Галилея Э.Торричелли было измерено атмосферное давление. Изобретение в 1672г. О. Герике механического поршневого насоса с водяным уплотнением позволило начать исследования свойства разряженного газа. Активное изучение и применение вакуума дало огромный толчок развития разным областям науки и техники.

Начать описание стоит именно с электронной техники, так как самое распространенное устройство, в котором использовался вакуум и которое дало искусственный свет человечеству была лампочка. Низкий вакуум использовался в осветительных приборах и газоразрядных устройствах. Высокий вакуум – в генераторных и приемно-усилительных лампах, электронных трубок и сверхвысокочастотных приборах. Вакуум активно применяется для производства полупроводников, без которых становится немыслимо существование современных городов, так как полупроводники являются неотъемлемой частью сегодняшних источников света и компьютерной техники. Компьютерная техника также обязана вакууму при производстве микросхем, в процессах нанесения тонких пленок, ионного травления, электронолитографии. Метод вакуумной пропитки признан как самый экономичный при производстве трансформаторов, электродвигателей, кабелей и т.п.

В металлургии вакуум влияет на качество металлов, удаляя из них растворенные газы, тем самым повышая прочность, вязкость и пластичность. Сварка в разряженном газе позволяет соединить материалы с различными температурами плавления. Вакуум дает возможность спекания порошков тугоплавких металлов, получения безуглеродистых сортов железа.

В машиностроении вакуум используют для нанесения упрочняющих покрытий на инструмент и износостойких покрытий на детали, транспортировки и захвате грузов на автоматических линиях, предоставляя возможность развития совершенно новой области техники – роботостроению. В химический промышленности без вакуума нам бы были недоступны целлюлоза, бумага, синтетические волокна, полиэтилен, смазочные масла, растворители, удобрения и многое другое.

В медицине вакуум применяется для получения витаминов, антибиотиков, гормонов, сывороток и других бактериологических препаратов.

За последние десятилетия вакуум из рамок промышленности все более проникает в повседневный быт человека. Вакуумные упаковки увеличивают срок хранения продукции, уменьшают занимаемый ими объем, предотвращают загрязнения и промокание. Помимо этого, в последнее время набирает популярность инновационный способ приготовления пищи – в вакуумном пакете и в вакуумном сосуде. При таком способе приготовления пища практически не теряет своих полезных свойств, внутреннего сока, цвета, нет окисления липинов в приготовляемой пищи и прогоркания. Также экономится электроэнергия, появляются возможности готовки нескольких блюд в «одной кастрюле» и получение безотходного меню.

Вакуум применяется в автомобилях для подачи топлива, в вакуумных усилителях тормозных систем. Вакуумные насосы применяют в системах кондиционирования, стеклопакетах, пылесосах и т.д.

Список областей применения, как видно, достаточно большой и его можно продолжать довольно долго. Тем самым подчеркивается, что тема вакуумной техники особо актуальна. Одним из самых распространенных направлений исследований в вакуумной технике являются способы получения вакуума. На сегодняшний день существует большая разновидность типов вакуумных насосов: механические, сорбционные, молекулярные, магниторазрядные и другие.

Однако, большинство насосов могут оказаться непригодными в условиях высоких температур, радиации, электромагнитных полей, запыленности, особых требований к пожарной безопасности (экстремальных условий). Зачастую, даже если свойства насоса позволяют осуществить эксплуатацию в экстремальных условиях, то ограничения применимости накладываются на привод насоса, который чаще всего представлен электродвигателем. Производство и эксплуатация вакуумных насосов для экстремальных условий довольна дорога и трудоемка. Ремонт или замена очень трудна, а порой даже невозможна (атомные реакторы, деревообрабатывающие цеха, производство микросхем и т.п.). Поэтому в таких условиях главными достоинствами техники являются надежность, простота и ремонтопригодность. Одними из самых отличительных свойств работы пневмопривода как раз является простота и возможность работы в экстремальных условиях.

Поэтому разработка вакуумных генераторов с пневматическим приводом для экстремальных условий является <u>актуальной задачей</u>.

При применении пневматического цилиндра в качестве привода поршневого вакуумного насоса позволяет перейти к созданию свободнопоршневых конструкций, исключив передаточные звенья в кинематической цепи «привод-генератор». В результате отсутствия внешних подвижных частей делает применение вакуумных насосов в экстремальных условиях наиболее эффективными и безопасными.

**Целью** диссертации является разработка конструкции и методики расчета пневмоприводного вакуумного насоса.

Основными задачами в диссертации являлись:

1. Анализ возможности применения вакуумных насосов для экстремальных условий;

2. Формирование принципа построения вакуумного пневмоприводного насоса для экстремальных условий;

3. Разработка принципиальной конструкции вакуумного пневмоприводного насоса;

4. Построение математической модели вакуумного пневмоприводного насоса;

5. Разработка универсальной программы для теоретических и экспериментальных исследований динамики вакуумного пневмоприводного насоса;

6. Теоретическое и экспериментальное исследование влияния основных конструктивных параметров пневмоприводного насоса на его характеристики.

#### Научная новизна работы:

1. Предложен принцип построения вакуумных насосов в виде свободнопоршневых конструкций, что позволило объединить в одном пневмоцилиндре функции пневмопривода и вакуум-генератора и полностью исключить передаточные звенья от привода к насосу (подтверждена положительным решением Федеральной службы по интеллектуальной собственности №2015130461/06(046898) от 04.09.2015);

2. Разработана математическая модель свободнопоршневого пневмоприводного вакуумного насоса, автоматически учитывающая все возможные режимы течения газа и движения исполнительного органа, работы направляющей аппаратуры и работу пневмодемпферов;

3. Разработана программа и интерфейс для выполнения теоретических расчетов и проведения экспериментальных исследований на базе программной оболочки LabVIEW;

4. Предложен принцип управления вакуумным пневмоприводным насосом без контрольной аппаратуры, за счет введения дополнительных управляющий линий;

5. Сформирована методика выбора основных параметров вакуумного пневмоприводного насоса;

6. На основе проведенных численных и экспериментальных исследований получены рекомендации по выбору основных конструктивных параметров пневмоприводного вакуумного насоса.

<u>Достоверность результатов</u> научных положений базируется на фундаментальных законах физики и экспериментальной проверке используемой методики, выполненную на экспериментальной установке СПбПУ на кафедре ТГиАД, секторе «Гидромашиностроения».

<u>Основными методиками исследования</u> в данной работе являются метод математического моделирования вакуумного пневмоприводного насоса, а также

экспериментальное исследование протекания процессов в пневмоприводе на экспериментальной установке.

#### Практическая ценность:

1) Предложен принцип конструирования поршневых вакуумных насосов с пневмоприводом на основе свободнопоршневых конструкций, в которых отсутствуют внешние подвижные части, что делает их применение в экстремальных условиях наиболее эффективными и безопасными.

2) На основе предложенного метода универсального блочного математического моделирования привода разработана программа для проектирования, а также экспериментального исследования пневмоприводного насоса;

3) Даны практические рекомендации по выбору конструктивных параметров пневмосхемы вакуумного пневмоприводного насоса.

4) Разработанная конструкция 4-х камерного гравитационного пневмоприводного вакуумного насоса может быть реализована с помощью стандартных пневмоцилиндров и аппаратуры.

#### Положения, выносимые на защиту:

1. Принцип построения свободнопоршневого вакуумного пневмоприводного насоса;

2. Унифицированная математическая модель вакуумного пневмоприводного насоса;

3. Программа расчета и интерфейс в программной оболочке LabVIEW;

4. Результаты теоретических исследований вакуумного пневмоприводного насоса;

5. Результаты экспериментальных исследований вакуумного пневмоприводного насоса.

## Глава 1. Обзор современного состояния проблемы

#### 1.1 Анализ типов вакуумных насосов

В настоящее время вакуумную технику широко используют в различных отраслях промышленности. Развитие промышленности приводит к ужесточению требований к вакуумным системам. Одним из требований является применение безмасляных насосов. При работе насосов без смазочного материала резко повышается их пожаро- и взрывобезопасность и улучшается санитарное состояние окружающей среды. Поэтому основной тенденцией является именно развитие безмасляных насосов, основные конструкции которых будут рассмотрены ниже.

#### 1.1.1 Вакуумный эжектор

Эжектор — (фр. *éjecteur*, от *éjecter* — выбрасывать от лат. *ejicio*) — устройство, в котором происходит передача кинетической энергии от одной среды (как правило, сжатого воздуха), движущейся с большей скоростью, к другой (объект откачки). Эжектор, работая по закону Бернулли, создаёт в сужающемся сечении пониженное давление одной среды, что вызывает подсос в поток другой среды, которая затем переносится и удаляется от места всасывания энергией первой среды.

Принцип работы. Сжатый воздух подается в эжектор (Рисунок 1.1) через соединение (А). Он проходит через сопло Вентури (В). Ускоренное истечение газа приводит к уменьшению статического давления (к созданию вакуума) непосредственно за соплом, поэтому через впускное соединение (D) в систему поступает воздух (от откачиваемого объекта). Смешиваясь с сжатым воздухом, прошедшим через сопло, этот воздух покидает эжектор через глушитель (С).



Рисунок 1.1. Принцип работы эжектора.

## Достоинства:

- Простота конструкции и отсутствие движущихся частей;
- Высокая надежность;
- Простое техобслуживание.

## Недостатки:

- Низкий КПД;
- Высокий уровень шума;
- Смешивание рабочей и перекачиваемой среды.

Эжектор довольно часто применяется для получения низкого вакуума и при условии наличия источника сжатого газа. В остальных случаях, основным элементом любой вакуумной системы, как правило, является механический вакуумный насос. Существует множество конструкций вакуумных насосов, основанных на различных принципах.

### 1.1.2 Плунжерные вакуумные насосы

Плунжерные вакуумные насосы применяют для откачивания воздуха, неагрессивных газов, паров и парогазовых смесей, предварительно очищенных от механических загрязнений. Предельное остаточное давление, создаваемое насосами, 1,0 ... 0,1 Па; быстрота действия в диапазоне от атмосферного давления до 150 Па в пределах 20...500 дм3/с. Плунжерные насосы, выпускаемые в одно- или двухступенчатом исполнении, используют, как правило, в качестве насосов предварительного разрежения

(форвакуумный насос). Плунжерные насосы делятся на поршневые и с вращающимися плунжерами.

1) Поршневой насос (Рисунок 1.2)

# Принцип работы:

В корпусе 1 находится поршень 2 со штоком 3. Герметичность поршня обеспечивается сменными уплотнительными

Рисунок 1.2. Схема поршневого насоса простого действия.

кольцами 4. При движении поршня вправо в рабочей камере насоса создается разряжение, нижний клапан 5 открывается, а верхний клапан 6 закрывается – происходит всасывание рабочего тела. При движении в обратном направлении в рабочей камере создается избыточное давление, которое открывает верхний клапан, а нижний закрывает.

# Достоинства:

- Простота конструкции;
- Высокая ремонтопригодность;
- Надежность конструкции.

# Недостатки:

- Низкая производительность;
- Неравномерность подачи;
- Проблема герметизации поршня;
- Низкий КПД из-за трения поршня и его кривошипно-шатунного механизма.

2) Насос с вращающимся плунжером (Рисунок 1.3).

#### Принцип работы:

В корпусе 1 одноступенчатого плунжерного насоса находится плунжер 2, который приводится в движение с помощью эксцентрика 3, расположенного на валу 4. При вращении эксцентрика вокруг центра корпуса плунжер обкатывает внутреннюю поверхность цилиндра, вследствие чего положение серповидной полости, образуемой поверхностью плунжера и внутренней поверхностью цилиндрического корпуса, непрерывно изменяется в зависимости от угла поворота эксцентрика.



Рисунок 1.3. Плунжерный вакуумный насос

Прямоугольный в сечении участок плунжера перемещается в цилиндрических направляющих 5, вращающихся вокруг оси.

При вращении эксцентрика в определенные моменты зона всасывания насоса через всасывающее окно в прямоугольном участке плунжера соединяется с рабочей полостью, которая заполняется откачиваемым газом. Всасывание заканчивается при разъединении полостей цилиндра и всасывания; при этом ротор совершает практически полный оборот. В течение следующего оборота замкнутый объем, занимаемый откачиваемым газом или парогазовой смесью, уменьшается, происходит сжатие до давления, при котором открывается нагнетательный клапан 6 и осуществляется нагнетание газа через маслоотделитель в атмосферу. Таким образом, полный цикл работы плунжерного вакуумного насоса совершается за два оборота вала.

В корпус насоса заливают вакуумное масло, которое, наряду с уменьшением трения между движущимися деталями, заполняет радиальные и торцовые зазоры, мертвый объем, способствуя повышению герметичности рабочих полостей, а также охлаждению сжимаемого газа. Наличие масла в рабочей полости определяет предельное остаточное давление, достигаемое насосом, вследствие выделения из его состава легких фракций. [63]

## Достоинства:

- высокая надежность;
- простота обслуживания;
- постоянство быстроты действия в широком диапазоне давлений всасывания.

## Недостатки:

- низкие массогабаритные характеристики;
- невозможность непосредственного соединения с двигателем;
- неуравновешенность движущихся масс;
- тихоходность.



## 1.1.3 Диафрагмовый (мембранный) насос

Рисунок 1.4. Схема мембранного насоса.

## Принцип работы:

В диафрагмовом (мембранном) насосе (Рисунок 1.4) роль поршня выполняет гибкая пластина – диафрагма (мембрана), закрепленная по краям и изгибающаяся под действием рычажного механизма или переменного давления среды. Во втором случае давление среды может создаваться сжатым воздухом, либо другим насосом. Таким образом, диафрагма может выполнять защитные функции, предохраняя плунжер или поршень насоса от контакта с попрекаемой средой.

## Достоинства:

- Возможность перекачки агрессивных и загрязненных сред;
- Простота конструкции.

## Недостатки:

- Низкая производительность;
- Неравномерность подачи;
- Износ диафрагмы.

## 1.1.4 Пластинчато-роторные вакуумные насосы (ПРВН)

Пластинчато-роторные вакуумные насосы используют для откачивания воздуха и неагрессивных газов в транспорте, металлургии, химии и нефтехимии, сельском хозяйстве, строительной технике, в установках для транспортирования сыпучих материалов, сушки бетонных покрытий, в доильных установках, а также в вакуумных системах общего назначения.

## Принцип работы:

На схеме (Рисунок 1.5) приведена конструктивная схема насоса с перепускным устройством и двумя разгрузочными кольцами. В корпусе 1 вращается ротор 2, в пазы которого свободно вставлены пластины 3. При вращении ротора пластины под действием центробежных сил прижимаются к внутренней поверхности колец.



Рисунок 1.5 Конструктивная схема насоса с перепуском газа.

Всасывание, сжатие и нагнетание газа осуществляется при изменении объемов ячеек, образованных эксцентрично расположенным ротором, пластинами, корпусом и торцовыми крышками. Между ротором, кольцами и корпусом, а также между ротором и торцовыми крышками предусмотрены минимально возможные зазоры. Перепускной канал Ж связывает ячейки наименьшего объема и ячейку начала сжатия. При этом происходит выравнивание давлений в рабочих ячейках: давление газа в ячейке наименьшего объема падает до давления выравнивания, а в ячейке начала сжатия давление возрастает с давления всасывания до давления выравнивания. Это приводит, с одной стороны, к увеличению коэффициента откачки и снижению предельного остаточного давления, с другой стороны – к увеличению удельной потребляемой на сжатие газа мощности.

Перепуск газа наиболее эффективен при больших перепадах давлений в ячейках. Поэтому его применяют обычно при давлениях всасывания менее 30 кПа у насоса с большим числом пластин (до 20).

Выход металлических пластин из пазов вращающегося ротора ограничен разгрузочными кольцами 5 и 6, вставленными свободно в корпус. Внутренний диа-

16

метр разгрузочных колец меньше диаметра расточки корпуса. Поэтому между рабочей кромкой пластин и образующей цилиндра имеется гарантированный радиальный зазор (~0,08 мм). Кольца свободно вращаются, увлекаемые силой трения движущихся пластин, вследствие чего путь скольжения пластин по кольцам меньше, чем по корпусу. При этом снижается мощность, затрачиваемая на преодоление трения пластин по корпусу, и уменьшается износ трущихся деталей, но возрастают внутренние перетекания газа через радиальный зазор. Применение разгрузочных колец для неметаллических пластин нецелесообразно, так как уменьшение потерь на трение сопровождается увеличением внутренних перетеканий газа. [63]

## Достоинства:

- Простота конструкции;
- Быстроходность;
- Возможность непосредственного соединения с двигателем;
- Хорошая уравновешенность.

## Недостатки:

- Высокие механические потери;
- Сильные перетекания газа;
- Затрудненная ремонтопригодность.

## 1.1.5 Двухроторные вакуумные насосы

## Принцип работы:

В двухроторных вакуумных насосах (Рутс) (Рисунок 1.6) в овальном корпусе 1 навстречу один другому вращаются два ротора 2 и 3. Роторы выполняют с двумя (Рисунок 1.6, а) или тремя (Рисунок 1.6, б) прямыми или винтовыми (спиральными) лопастями.



Рисунок 1.6. Схемы двухроторных вакуумных насосов.

Синхронное вращение роторов и зазор между ними обеспечиваются синхронизирующими шестернями, которые смонтированы на валах роторов. Между роторами, а также роторами и корпусом в рабочем состоянии сохраняются зазоры, отчего нет необходимости подавать смазочный материал в рабочую.

Рассмотрим откачивание газа на примере насоса с двухлопастными роторами (Рисунок 1.7).



Рисунок 1.7. Принципиальная схема действия двухроторного вакуумного насоса.

Пусть в начальный момент роторы находятся в положении, показанном на рисунке а. Полость I отсоединена от окна всасывания, но еще не соединена с окном нагнетания. В следующий момент (Рисунок 1.7, б) полость I соединяется с окном нагнетания, и газ под давлением нагнетания поступает в полость I. Процесс натекания газа из полости нагнетания в полость I продолжается до тех пор, пока давление в полости I не станет равным давлению нагнетания. После выравнивания давлений газ из полости I начнет подаваться в полость нагнетания вместе с газом, который находится в полости II (Рисунок 1.7, в). При повороте роторов на угол 90° (Рисунок 1.7, г) газ из полости I роторами продолжает вытесняться в нагнетательную полость, процесс освобождения полости II от газа заканчивается, а между ротором 2 и корпусом I образуется полость III, процессы в которой начнут происходить в той же последовательности, что и в полости I с момента, соответствующего положению (Рисунок 1.7, а). В моменты, соответствующие положениям на рисунках 5, д и е газ из полости I продолжает подаваться в нагнетательное окно, а в момент, соответствующий повороту роторов на 180°, процесс вытеснения газа из полости I заканчивается. Далее процесс повторяется, но место полости I займет полость IV, полости III – полость I, полости II – полость III, полости IV – полость I. Таким образом, за один оборот каждого ротора в нагнетательную полость ротором 2 подается газ из полостей II и III, а ротором 3 – газ из полостей I и IV.

При увеличении разницы давлений сильно возрастают перетечки из нагнетательной полости в полость всасывания вследствие наличия зазоров, поэтому двухроторные вакуумные насосы применяют как правило, в области давлений всасывания 1,33...133 Па. Поэтому такие насосы комбинируют с форвакуумными насосами. [63]

#### Достоинства:

- Отсутствие трения между роторами;
- Высокая сбалансированность;
- Отсутствие масла в рабочей камере;
- Возможность откачки агрессивных, взрывоопасных и дорогих газов;

• Высокая частота вращения.

#### Недостатки:

- Высокие обратные перетечки из-за чего требуют наличия форвакуумных насосов;
- Низкая экономичность;
- Сложность изготовления

## 1.1.6 Спиральный вакуумный насос

Этот виды насосов был изобретен ещё в 1905г. французским инженером Леоном Круа, однако в массовое производство не пошел из-за сложности технологии. Поэтому развитие эти насосы получили только с 80-х годов.

Спиральный вакуумный насос (СПВН) – это механический объемный насос внутреннего сжатия, в котором перемещение газа осуществляется за счет периодического изменения объема двух или более серповидных полостей, образованных между двумя повернутыми друг относительно друга на 180° спиралями, одной – неподвижной, второй – совершающей орбитальное движение.

## Принцип действия:

Две спирали, чаще всего эвольвентные, выполнены заодно с торцевыми дисками. Подвижная спираль 1 совершает орбитальное движение относительно центра неподвижной спирали с некоторым небольшим эксцентриситетом Е (как правило, до 5 мм). Неподвижная спираль 2 жестко соединена с корпусом насоса и имеет отверстие нагнетания в центральной части. Подвижная спираль уравновешивается противовесом 3. При движении спирали не касаются друг друга, поскольку между ними имеется небольшой зазор ~ 0,05–0,1 мм. Спирали в СПВН располагаются таким образом, что могут практически соприкасаться в нескольких точках, образуя при этом в случае однозаходных спиралей две серии серповидных объемов Б и В (Рисунок 1.8), которые при орбитальном движении подвижной спирали уменьшают свой объем от периферии спиралей к их центру.



Рисунок 1.8. Спиральный вакуумный насос: 1 – подвижная спираль; 2 – неподвижная спираль; 3 – противовес; 4 – эксцентриковый вал; 5 – противоповоротное устройство; 6 – сильфон; 7 – корпус; 8 – уплотнитель.

Процесс всасывания газа начинается с образования двух серповидных полостей на периферийной части спиралей (полости 1 Рисунок 1.8). Одновременно в насосе присутствует порция сжимаемого газа (полости 2). Процесс сжатия заканчивается объединением серповидных полостей 2 в центральной части спиралей в парную полость 3, откуда происходит нагнетание газа через отверстие в центре торцевого диска неподвижной спирали. Таким образом, в спиральном вакуумном насосе процессы всасывания, сжатия и нагнетания происходят одновременно в нескольких полостях. Причем полость всасывания отделена от полости нагнетания промежуточными полостями, что снижает перетечки между полостями высокого и низкого давления и позволяет отказаться от всасывающего и нагнетательного клапанов. Количество оборотов, за которые осуществля-



Рисунок 1.9. Взаимное расположение спиралей.

ется рабочий цикл с одной порцией газа, равняется количеству витков спирали. Захват одной порции газа осуществляется за один оборот приводного вала для всех видов СПВН. Как уже отмечалось, в качестве кривой, образующей спираль, чаще всего используется эвольвента. Также могут быть использованы спираль Архимеда, дуги окружностей и их комбинации. Элемент, герметизирующий рабочую полость СПВН, может быть выполнен в виде манжеты на приводном валу (именно так, чаще всего, поступают в спиральных компрессорах). Однако в этом случае подшипники и противоповоротное устройство, требующие смазки, располагаются в вакуумной полости насоса. Поэтому в последние годы в конструкции спирального вакуумного насоса используется эластичный упругий элемент – сильфон большого диаметра 6 (Рисунок 1.8), герметично соединяющий подвижную спираль с корпусом насоса. Благодаря такой конструкции полностью предотвращается возможность проникновения паров масла в рабочую полость насоса и откачиваемый объем, и спиральный насос становится абсолютно безмасляным. Одним из важнейших элементов СПВН является механизм преобразования вращательного движения вала в плоскопараллельное (орбитальное) движение подвижной спирали. Движение от привода к подвижной спирали передается через эксцентриковый вал 4. В конструкции насоса также предусмотрено устройство, предотвращающее поворот подвижной спирали вокруг своей оси, поскольку даже ее незначительное угловое перемещение приведет к заклиниванию спиралей. [10]

#### Достоинства:

- Наименьшие потери на всасывании, что является следствием большого раскрытия полости всасывания и соответственно малой скорости газа;
- Отсутствие мертвого пространства;
- Малый подогрев газа на всасывании за счет отсутствия контакта газа с сильно нагретыми частями;
- Высокая энегоэффективность;
- Низкий износ кольцевых уплотнений;
- Отсутствие трущихся частей в рабочей камере.

#### Недостатки:

- Сложность и дороговизна изготовления спиралей;
- Высокие требования к чистоте перекачиваемой среды;
- Невысокая быстрота действия (до 10л/мин).

## 1.1.7 Винтовые насосы

Еще одной бесконтактной машиной, «пришедшей» из компрессорной техники, является винтовой вакуумный насос (Рисунок 1.10), известный за рубежом как «Screw». Он состоит из двух винтов, левостороннего и правостороннего, которые вращаются без контакта и трения и синхронизируются через зубчатую передачу. При вращении винтов газ всасывается, сжимается и переносится к выпускному отверстию. По мере продвижения откачиваемого газа к выходу происходит его нагрев, поэтому для предотвращения перегрева и заклинивания насоса применяют водяную «рубашку». [10]



Рисунок 1.10. Схема винтового насоса: 1 – вход; 2 – выход; 3 – водяная рубашка; 4 – ротора; 5 – масло; 6 – откачиваемый газ; 7 – зубчатая передача; 8 – подшипники; 9 – манжеты; 10 – сальник.

### Достоинства:

- Нет масла в рабочей камере
- Высокая равномерность откачки;
- Высокая степень сжатия ступени;
- Полная уравновешенность.

## Недостатки:

- Сложность изготовления;
- Необходимость установки мультипликаторов, обеспечивающих частоту вращения роторов в несколько тысяч оборотов в минуту.

К недостаткам можно отнести, пожалуй, лишь сложность изготовления винтовых роторов и необходимость в установке мультипликаторов, обеспечивающих частоту вращения роторов в несколько тысяч оборотов в минуту.

Зачастую, при сравнении вакуумных насосов авторы останавливаются на рассмотрении только конструкции насосов. Однако такое рассмотрение является не полным, так как не включает основного объекта системы – привода вакуумного насоса.

## 1.2 Анализ типов приводов вакуумных насосов

Существует четыре основных вида приводов: механический, электрический, пневматический и гидравлический.

## 1.2.1 Механический привод

Механический привод – это система для передачи механической мощности от источника энергии к выходному звену с помощью механических связей (зубчатые передачи, механические тяги, рычаги, кривошипы и т.п.) и обеспечивающая необходимые параметры этого звена.

## Достоинства:

- Высокий КПД;
- Нечувствительность к радиации;
- Налаженное производство комплектующих;
- Простое техобслуживание;
- Простота осуществления различных видов движения поступательного, вращательного, поворотного.

## Недостатки:

- Незначительные расстояния передачи;
- Сложность регулирования (как правило ступенчато коробка передач).

## 1.2.2 Электрический привод

Электропривод - это управляемая электромеханическая система, предназначенная для преобразования электрической энергии в механическую и обратно и управления этим процессом. Минимально состоит, электрогенератора, линий электропередач и электродвигателя.

## Достоинства:

• Самая высокая дальность передачи энергии

- Удобство применение (высокая электрификация многих стран)
- Простое обслуживание

## Недостатки:

- Высокие требования к защите от перегрузок;
- Электрическая опасность;
- Ограниченность при работе с высокой температурой;
- Трудности осуществления поступательных движений;
- Ограниченность при работе с высокой радиацией;
- Ограниченность при работе в электромагнитных полях;
- Низкие массогабаритные показатели.

## 1.2.3 Гидравлический привод

Гидропривод – это совокупность устройств, предназначенных для приведения в движение машин и механизмов посредством гидравлической энергии. Минимально система включает насос, гидравлические линии и гидродвигатель.

## Достоинства:

- Высокие массогабаритные показатели;
- Возможность получения больших сил и мощностей при малых размерах и весе передаточного механизма;
- Простота осуществления различных видов движения поступательного, вращательного, поворотного;
- Простота управления и автоматизации;
- простота предохранения приводного двигателя и исполнительных органов машин от перегрузок;
- Надёжность эксплуатации;
- Широкий диапазон бесступенчатого регулирования скорости выходного звена;

- Самосмазываемость трущихся поверхностей при применении минеральных и синтетических масел в качестве рабочих жидкостей;
- Упрощённость компоновки основных узлов гидропривода внутри машин и агрегатов, в сравнении с другими видами приводов.

## Недостатки:

- Утечки рабочей жидкости через уплотнения и зазоры, особенно при высоких значениях давления в гидросистеме, что требует высокой точности изготовления деталей гидрооборудования;
- Пожароопасность из-за применения горючих рабочих жидкостей;
- Нагрев рабочей жидкости при работе, что приводит к уменьшению вязкости рабочей жидкости и увеличению утечек, поэтому в ряде случаев необходимо применение специальных охладительных устройств и средств тепловой защиты;
- Невозможность передачи энергии на большие расстояния;
- Необходимость обеспечения в процессе эксплуатации чистоты рабочей жидкости, поскольку наличие большого количества абразивных частиц в рабочей жидкости приводит к быстрому износу деталей гидрооборудования, увеличению зазоров и утечек через них, и, как следствие, к снижению объёмного КПД;
- Трудоемкое техобслуживание;
- Необходимость высокого уровня знаний при проектировании систем.

## 1.2.4 Пневматический привод

Пневмопривод – это совокупность устройств, предназначенных для приведения в движение частей машин и механизмов посредством энергии сжатого воздуха.

## Достоинства:

- Дешевизна и общедоступность рабочей среды;
- Не требуют возврата газа к источнику;

- Абсолютно пожаробезопасны;
- Единственный привод, который может эффективно работать при высоких температурах;
- Не чувствителен к радиации и электромагнитным полям;
- Экологически чистый привод;
- Рабочий процесс идет не только за счет подачи сжатого воздуха, но и за счет его расширения очень высокие скорости;
- Малый вес исполнительных механизмов;
- Удобство применения на крупных предприятиях, где часто имеется снабжение сжатым воздухом;
- Возможность автономной работы за чет использования баллонов со сжатым газом;
- Простое обслуживание.

### Недостатки:

- Низкая мощность из-за опасности использования высокого давления;
- Сложность в осуществлении позиционирования выходного звена;
- Шумность работы (необходимость установки глушителей);
- Необходимость поддержания смазки в трущихся частях;
- Возможность обмерзания систем и конденсации влаги в системах (необходимость подготовки воздуха - осушение).

Кроме того, важной задачей на современном этапе создания вакуумных насосов является повышение конкурентоспособности продукции. Это требует повышения качества продукции при сравнительно невысокой ее стоимости, что может быть достигнуто путем создания более совершенного, но недорогого оборудования.

Большую роль в решении этой задачи играют пневматические приводы. Известно [26], что стоимость пневматических приводов на единицу мощности в 3-7

раз меньше гидравлических и электромеханических. Кроме того, пневмопривод характеризуется малыми весогабаритными показателями, то есть максимальной удельной мощностью. Анализ характеристик гидравлических, пневматических и электромеханических приводов показал [24], что в диапазоне значений мощности от 30 до 800 Вт наибольшую удельную мощность имеет пневмопривод.

## 1.3 Анализ применимости насосов

Таким образом, каждый тип вакуумного насоса имеет ряд преимуществ и недостатков. Проанализировав все конструкции можно заметить одну тенденцию. Чем выше глубина вакуума, тем сложнее и дороже детали насоса. Кроме того, такие насосы менее надежны и трудны в обслуживании.

На практике зачастую не всегда требуется наличие высокого вакуума. Поэтому потребители довольно часто пользуются наиболее простыми устройствами для получения вакуума – эжекторами, не смотря на их низкую эффективность.

Не зря была затронута и тема приводов. Большинство насосов требуют электрического привода, некоторые из них дополнительно требуют промежуточных механических передач. Применение электрического привода накладывает сильные ограничения применимости насосов и приводит к необходимости защиты электропривода. Среди заменителей электропривода наиболее актуален пневматический привод, так как его можно применять в экстремальных условиях (высокая температура, радиация, электромагнитные поля, высокая запыленность, опасности возгорания и т.п.) и на больших расстояниях от источника сжатого воздуха.

Таким образом, для построения в целом вакуумной установки целесообразно применять насос плунжерного типа с пневмоприводом.

При этом следует отметить, что применение пневмоцилиндра позволяет объединить насос и привод в одной конструкции.

В результате анализа различных вариантов схем привода-генератора вакуума была принята схема на основе свободнопоршневой конструкции устройства.

Подвижные части устройства приводятся в движение сжатым воздухом, который применяется в различных технологических процессах на большинстве предприятий. Поэтому для запуска устройства не требуется специального дополнительного оборудования.

Также преимуществом устройства является простота конструкции и принципа работы. Подвижные части устройства совершают циклическое возвратно-поступательное движение. Простая конструкция устройства обеспечивает высокую технологичность изготовления его элементов и его сборки. Также возможно объединение нескольких устройств в блоки с целью повышения производительности и глубины вакуума, при этом не требуется сложной системы управления.

#### 1.4 Анализ математической модели процессов в пневмоприводном насосе

Рассмотрим типовую математическую модель пневмопривода, расчетная схема которого изображена на рисунке (Рисунок 1.11):



Рисунок 1.11. Расчетная схема пневмопривода.

В общем случае, математическая модель работы типового пневматического исполнительного устройства (пневмоцилиндра) включает следующие уравнения:

- 1) Уравнение движения исполнительного органа;
- 2) Уравнение изменения давления в полости нагнетания;

3) Уравнение изменения давления в выхлопной полости.

Как правило, особенность математической модели пневматического исполнительного устройства заключается в описании расходной функции, характеризующей изменение расхода рабочей среды в рабочих полостях устройства в зависимости от перепада давлений в пневматических линиях. Вид функции зависит от характера течения рабочей среды в пневматической линии:

 изотермического, при котором температура рабочей среды остается постоянной;

 – адиабатического, при котором отсутствуют теплообмен рабочей среды с окружающей средой и внутреннее трение рабочей среды.

Реальный процесс течения рабочей среды в пневматических линиях носит политропический характер. Однако, вычисление показателя политропы является трудоемкой задачей. Поэтому для упрощения математического моделирования процесс течения рабочей среды принимается изотермическим или адиабатическим.

Как показывает практика и теоретические исследования [17, 37], в промышленных системах в трубопроводах процесс течения газа близок к изотермическому. Кроме того, все процессы наполнения и опустошения полостей привода имеют подкритический характер. В этом случае математическая модель типового пневмопривода имеет следующий вид [18]:

$$\begin{cases} M \frac{d^{2}x}{dt^{2}} = p_{1} \cdot F_{1} - p_{2} \cdot F_{2} - p_{a} \cdot (F_{1} - F_{2}) - F_{mp} - N \\ \frac{dp_{1}}{dt} = \frac{k \cdot f_{1} \cdot \sqrt{R \cdot T_{M}}}{F_{1} \cdot (x + x_{01}) \cdot \sqrt{\zeta_{1}}} \cdot \sqrt{p_{M}^{2} - p_{1}^{2}} - \frac{k \cdot p_{1}}{x + x_{01}} \cdot \frac{dx}{dt} , \qquad (1.1) \\ \frac{dp_{2}}{dt} = -\frac{k \cdot f_{2} \cdot \sqrt{R \cdot T_{M}}}{F_{2} \cdot (x + x_{02}) \cdot \sqrt{\zeta_{2}}} \cdot \left(\frac{p_{2}}{p_{M}}\right)^{\frac{k-1}{2\cdot k}} \cdot \sqrt{p_{2}^{2} - p_{a}^{2}} + \frac{k \cdot p_{2}}{S - x + x_{02}} \cdot \frac{dx}{dt} \end{cases}$$

где  $p_1$  и  $p_2$  – давление в полостях пневмоцилиндра,  $\Pi a$ ; k – показатель адиабаты воздуха (коэффициент Пуассона) k=1,4; f – площадь проходного сечения трубопровода,  $m^2$ ; R – газовая постоянная,  $Д \mathscr{K} / (\kappa c * K)$ ; T – абсолютная температура газа, K; F – эффективная площадь поршня,  $m^2$ ; x – координата положения поршня, м;  $x_0$  – приведенная координата, характеризующая объем вредного пространства, м;  $\zeta$  – коэффициент сопротивления линии, дросселей;  $p_a$  – давление на выходе,  $\Pi a$ ;  $p_M$  – давление питания,  $\Pi a$ ; M – масса подвижных частей,  $\kappa c$ ; S – максимальный ход поршня, M; N – статическая нагрузка, H;  $F_{mp}$  – сила трения.

Система уравнений (2.41) с большой точностью отражает процессы в пневмоприводе, однако системой трудно пользоваться в приводах со сложными процессами движения поршня и изменения давлений в полостях. Использование уравнений требует от расчетчика большого внимания, умения четкого представления процессов в пневмоприводе и владения языками программирования.

Типовая модель пневмопривода описывает процессы изменения давления в двух полостях цилиндра и движение поршня. При этом считается, что в одной полости идет процесс наполнения газом, а в другой – опустошение. При этом движение происходит в одну сторону. Однако в рассматриваемых в данной работе конструкциях в одной и той же полости может происходить при движении в одном направлении как наполнение, так и истечение.

Поэтому формальное применение типовой математической модели приведет к принципиально неверным результатам. Ярким примером неправильной работы модели является неверное задание режима истечения или наполнения полости. Это происходит потому, что зачастую автор не может предвидеть изменения давлений в полостях в зависимости от многих других параметров, и поэтому основная причина этой и многих других ошибок – это человеческий фактор.

Таким образом, необходимо разработать унифицированную математическую модель привода-генератора вакуума, автоматически учитывающую все возможные режимы работы приводов.

#### 1.5 Анализ современных программных сред

На сегодняшний день существует множество программ, способных описывать гидропривод и пневмопривод. Большинство из них весьма доступны – как для человека с низким достатком, так и небольшой фирмы. В наш информационный век практически каждый сможет без труда найти такие приложения в интернете, установив которые на свой мобильный компьютер, иметь их практически «в кармане». Часть программ весьма узкоспециализированы для работы с одним – двумя частными случаями и не подходят для работы с пневмо- и гидроприводом в целом. К программам, в которых, можно наиболее объективно отразить процессы, можно отнести:

 Festo Fluidsim. Является немецкой программой фирмы Festo, занимающейся производством пневматической и гидравлической аппаратуры. Fluidsim – это комплексная программа для создания, симуляции, преподавания и изучения гидравлической, пневматической, электропневматических, электрогидравлических и цифровых схем. Пакет уникален для подготовки специалистов этой области как в учебных классах, так и самостоятельно. Версии выше 4-ой подходят для работы как с цикловыми приводами, так и со следящими.



## Рисунок 1.12. Рабочее окно программы Fluidsim 4.2

Рабочее окно программы (Рисунок 1.12) представляет собой интерфейс, схожий с большинством программ Microsoft. В центральной части находится рабочая область, в которую перетаскивают необходимые элементы из библиотеки программы (открыта слева), соединяют между собой и моделируют работу системы. В верхней части содержаться классические ссылки с выпадающими меню. Помимо тестирования работы схем есть возможность строить графики различных процессов, изменять большинство параметров каждого элемента, а также соединять программу через контроллер Easyport со стендом, тем самым получая возможность управлять и снимать определенные данные с реальных устройств.

## Достоинства программы:

1) Очень простой и доступный интерфейс, что позволяет очень быстро научиться работать в программе без специальных знаний;

2) Визуализация процесса очень упрощает работу как обучающегося, так и преподавателя;

3) Высокая степень точность расчета программы (после версии 4.2).

## Недостатки:

1) Нацеленность программы на работу с продуктами своей фирмы (большие трудности при подключении к оборудованию других фирм).

2) Ограниченность изменения параметров. Многие фундаментальные параметры модели недоступны для изменения, что приводит к неверным результатам во многих частных случаях.

3) Нет описания уравнений, по которым ведется расчет, поэтому нельзя точно оценить результат работы программы на этапе моделирования.

4) Доступна только на ведущих языках мира (нет русского).

• Amesim (LMS Imagine.Lab Amesim) – комплексная программа для моделирования мехатронных инженерно-технических задач.



Рисунок 1.13. Рабочее окно программного пакета Amesim.

Интерфейс программы (Рисунок 1.13) схож с Fluidsim: в центральной части основное рабочее окно, в правой – библиотека элементов, в верхней – стандартные выпадающие меню.

Несмотря на это, возможности программы в десятки раз шире, чем у fluidsim. Модели описываются с помощью нелинейных нестационарных аналитических уравнений для гидравлических, пневматических, тепловых, электрических и механических систем. Количество параметров в несколько раз выше (вплоть до учета модели газа и режима течения в трубопроводах пневмоприводов). Также в программе заложена возможность 3D моделирования, которое позволяет достоверно представить картину работы устройства.

#### Достоинства:

 Широкие возможности программы (сложная механика, пневматические и гидравлические системы в нормальных и высокотемпературных условиях, электрические и электронные системы и т.д.);

2) Возможность воздействия на большинство параметров систем;

- 3) Достаточно простой интерфейс;
- 4) Визуализация с помощью 3D;
- 5) Описаны уравнения моделей.

#### Недостатки:

1) Рассчитана для работы со специалистами, имеющие базовые познания в области управления и электроники (так как сигналы управления для механических систем задаются в программных электронных блоках).

2) Доступна только на ведущих языках мира (нет русского);

3) Только виртуальная модель – не возможности подключать программу к внешним устройствам.

 Mathcad – система компьютерной алгебры из класса систем автоматизированного проектирования ориентированная на подготовку интерактивных документов с вычислениями и визуальным сопровождением, отличается легкостью использования и применения для коллективной работы (Рисунок 1.14).



Рисунок 1.14. Интерфейс программы Mathcad.

Программный пакет Mathcad – это «суперкалькулятор» в котором пользователь записывает уравнения и различные данные в окне в привычной для человеческих глаз форме (Рисунок 1.14). Решения уравнений можно представить в виде равенства (х=решение) или в виде графика.

### Достоинства:

1) Понятный интерфейс;

2) Форма написания уравнений не требует сложных познаний в области программирования;

3) Удобна для написания достаточно простых программ.

## Недостатки:

1) Все уравнения моделей пользователь записывает сам, что увеличивает возможность ошибок из-за неправильного понимания модели, или по невнимательности;

2) Нет четкого представления, как считает программа. Нередки случаи появления ошибок с неверным толкованием. Уровень самодиагностики программы низкий (ошибка указывается в одной части программы, когда она находится в другой).

 MatLab – пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений и одноимённый язык программирования, используемый в этом пакете (Рисунок 1.15). MATLAB используют более 1 000 000 инженерных и научных
работников, он работает на большинстве современных операционных систем (Microsoft Windows, Linux, Mac OS).



Рисунок 1.15. Интерфейс программы MatLab

Как видно из интерфейса здесь запись осуществляется с помощью высокоуровневого языка программирования. Вывод данных легко представлять с помощью двухмерных и трехмерных графиков.

# Достоинства:

1) Программа позволяет решать очень сложные задачи различных областей науки и техники;

2) Хорошая самодиагностика программ (указание строчки с ошибкой);

3) Возможность дополнительной установки приложений для решения узкоспециализированных задач.

# Недостатки:

1) Требуются глубокие познания и опыт работы с языками программирования;

2) Сложности с подключением внешних устройств.

Исходя из вышеописанного можно сделать один общий вывод: программы, ориентированные для работы с гидро- и пневмоприводом (fluidsim, amesim) достаточно удобны в обращении, но в них невозможно изменить заложенные уравнения и основные параметры, а в программах для универсального программирования (Mathcad, matlab) довольно сложно записать уравнения привода человеку неопытному.

Эти обстоятельства приводят к необходимости, чтобы пользователь одновременно был специалистом сразу в нескольких областях: гидравлики, пневматики, электроники и программирования. Однако, такая связь знаний весьма затруднена в современном обществе, так как на неё, как правило, нет ни времени, ни средств для оплаты «суперспециалиста».

Все эти проблемы могут быть решены с помощью современного программного пакета LabVIEW.

• LabVIEW (англ. Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) — это среда разработки и платформа для выполнения программ, созданных на графическом языке программирования «G» фирмы National Instruments (США), в котором для создания приложений используются графические образы (иконки) вместо традиционного текстового кода. От пользователя пакета не требуется знаний языков программирования, но понятие об алгоритме, цикле, выходе по условию и т.п. конечно иметь нужно. Все действия сводятся к простому построению структурной схемы приложения в интерактивной графической системе с набором всех необходимых библиотечных образов, из которых собираются объекты, называемые Виртуальными Инструментами (VI).

LabVIEW используется в системах сбора и обработки данных, а также для управления техническими объектами и технологическими процессами. Идеологически LabVIEW очень близка к SCADA-системам, но в отличие от них в большей степени ориентирована на решение задач не столько в области АСУ ТП (Автоматизированная система управления технологическим процессом), сколько в области АСНИ (Автоматизированная Система Научных Исследований).

Даже из двух абзацев определения программы видны её преимущества над другими пакетами. Во-первых, это ориентирование программы именно на научные области, что позволяет разрабатывать не только математические модели, но и писать программы экспериментов и снимать данные, что и будет проделано в этой работе.

Во-вторых, это ориентация программы на пользователя-инженера, который понимает, как должна работать программа, но не имеет знаний в области программимирования. В результате нет необходимости прибегать к помощи программистов, что уменьшает материальные и временные издержки. Кроме того, программы, написанные в LabVIEW, будут и легко понятны другим людям без специализированных знаний программирования.

Таким образом, LabVIEW не просто пакет для программирования, а язык для общения специалистов различных областей, что особенно актуально в последнее время когда активно развиваются специальности междисциплинарных областей (Рисунок 1.16).



Рисунок 1.16. Интерфейс LabVIEW.

Интерфейс программы довольно прост. Сильным отличием от остальных программ является открытие сразу двух окон при создании нового документа. Одно окно (слева) – Front panel (внешняя панель), а второе – block diagram (область графического программирования). Такое разделение не случайно, также как после завершения сборки устройства (телевизор, компьютер и т.п.) нет необходимости менять электронные схемы внутри, и вся работа концентрируется на внешних панелях, так и после завершения программирования – нет необходимости редактирования большинства параметров и уравнений и программу можно скрыть, оставив возможность воздействия на несколько необходимых параметров программы.

В примере (Рисунок 1.16) Front panel находится слева на сером фоне, а block diagram справа. На лицевой части из библиотеки (вызывается правой клавишей мыши) взяты два регулятора (число 1 и 2) и 2 индикатора (стрелочный и цифровой). Предполагалось написать программу, целью которой является делить число 1 на число 2 и результат отображать на 2 индикаторах. Для выполнения этой задачи в block diagram из библиотеки вызывается иконка с изображением значка деления и 2 числа (появляются автоматически после создания в лицевой панели) линиями подсоединяются к входным коннекторам иконки деления. Выходное звено деления подсоединяют к индикаторам. Подобным же образом программируются и более сложные задачи – подсоединением линий к входам и выходам иконок.

Таким образом, наиболее функциональным программным продуктом является LabVIEW, который позволяет не только автоматизировать процессы моделирования и расчета пневмоприводов, но и осуществлять управление объектами в реальном времени. Однако он требует разработки соответствующей программы.

### 1.6 Выводы. Задачи исследований

1) На основе анализа известных конструкций вакуумных насосов для применения в экстремальных условиях рекомендована схема поршневого вакуумного насоса, которая отличается простотой конструкции и эксплуатации;

2) Показано, что наиболее эффективным приводом для применения в экстремальных условиях является пневматический привод, который характеризуется простотой конструкции, малыми весогабаритными показателями; 3) С учетом выбранных типов вакуумного насоса и пневмопривода предложена идея создания пневматического вакуумного насоса гравитационного типа, отличающаяся простотой конструкции и исключающая применение внешних подвижных частей.

4) Типовая математическая модель пневмопривода описывает процессы изменения давления в полостях цилиндра и движение поршня. При этом имеется в виду, что в одной полости идет наполнение газом, а в другой – опустошение, а движение происходит в одну сторону. В предлагаемой конструкции пневматического вакуумного насоса при движении поршня в одну сторону в полостях может происходить как наполнение, так и истечение. Поэтому формальное применение известных типовых моделей не представляется возможным.

5) Выполнен сравнительный анализ современных программных пакетов. Программы, ориентированные для работы с гидро- и пневмоприводом (fluidsim, amesim) достаточно удобны в обращении, но в них невозможно изменить заложенные уравнения и основные параметры, а в программах для универсального программирования (Mathcad, matlab) довольно сложно записать уравнения привода человеку неопытному. Наиболее функциональным программным продуктом является LabVIEW, позволяющий автоматизировать процессы расчета пневмоприводов, а также осуществлять управление объектами в реальном времени. Однако он требует разработки соответствующей программы.

С учетом сделанных выводов <u>задачи настоящей работы</u> можно сформулировать следующим образом:

- разработать конструктивную и принципиальную пневматическую схемувакуумного пневмоприводного насоса для экстремальных условий;

- разработать математическую модель пневмоприводного насоса, учитывающую все возможные режимы течения и движения привода; - разработать унифицированную программу и интерфейс для расчета динамики пневмоприводного вакуумного насоса;

- провести экспериментальные исследования, подтверждающие основные результаты теоретических исследований;

- получить рекомендации по выбору конструктивных параметров вакуумного пневмоприводного насоса.

#### Глава 2. Синтез пневматического вакуумного насоса

Из анализа, описанного в предыдущей главе, видно, что наиболее перспективным приводом для использования в экстремальных условиях является пневматический. Перед тем как переходить к построению конструкции насоса необходимо подробно описать особенности его работы.

#### 2.1 Разработка принципа построения вакуумного пневмоприводного насоса

Классически объемные поршневые насосы имеют возвратно-поступательное движение поршня, которое передается через кривошипно-шатунный механизм, как правило, от электродвигателя. Эта конструкция, обладая качествами простоты, дешевизны и удобством обслуживания зачастую применяется в двигателях, компрессорах, насосах и др.

Однако в последние 20-30 лет многие инженеры серьёзно задумались над изменением этой модели. Дело в том, что недостатком этой конструкции является пагубное влияние кривошипно-шатунного механизма на систему. Он вызывает неравномерную нагрузку на валу, имеет довольно высокую силу трения и, главное, создаёт радиальную силу на поршень, которая, в свою очередь увеличивает силу трения поршня о цилиндр, что приводит к повышенному нагреву и износу.

Идея «освобождения» поршня наиболее продумана и реализована, пожалуй, в области двигателестроения, которое привело к созданию нового подраздела науки – свободнопоршневые двигатели.

Свободнопоршневой механизм – механизм с одной кинематической парой, образуемой поршнем и корпусом, и возвратным относительным перемещением его звеньев. Из определения видно, что основой его работы, так и основной проблемой является возвратно-поступательное движение. Оно часто не позволяет напрямую подсоединять такие механизмы к классическим механическим и электрическим машинам, основным движением в которых признано вращательное. В результате анализа возможностей принятого в работе типа поршневого насоса и пневматического привода была выдвинута идея [71] создания гравитационного вакуумного генератора – типа вакуумных насосов, в которых движение вытеснителя осуществляется одну половину периода за счет силы тяжести движущихся частей, а другую – за счет давления газа.

При рассмотрении конструкций нельзя останавливаться на рассмотрении только одной конструкции, даже если одна может казаться перспективнее, чем другая. В связи с этим предложены две линейки конструкций вакуумных генераторов: гравитационные (вертикальные) и дифференциальные (независимого положения).

## 2.1.1 Гравитационный вакуумный генератор

1) Двухкамерный гравитационный вакуумный насос



А) Наиболее простая конструкция представлена ниже (*Рисунок 2.1*).

Конструкция гравитационного двухкамерного вакуумного насоса представляет собой бесштоковый цилиндр (1). Вытеснителем в нем является поршень (2), расположенный в цилиндре. Газ в верхнюю полость попадает через отверстие 3, а в нижнюю – через 4.

#### Принцип действия:

Рисунок 2.1. Гравитационный двухкамерный насоса.

Цикл работы такого насоса осуществляется по следующей схеме (Рисунок 2.2). В начальный

момент времени будем считать, что поршень находится в нижней части цилиндра, а давление в обоих полостях цилиндра – атмосферное. Через отверстие 4 в нижнюю часть подается газ под давлением в результате чего поршень начинает движение вверх (1). Вытесняемый поршнем газ из верхней полости выходит через обратный клапан и глушитель в атмосферу.



Рисунок 2.2. Принцип работы двухкамерного гравитационного насоса.

При приближении поршня к верхней крышке полость перекрывается, а нижняя полость связывается с атмосферой (2). Поршень под действием силы тяжести, а также давления в верхней полости, которое было создано за счет инерционного движения поршня, реверсируется и начинает движение вниз.

При движении поршня вниз верхняя полость через обратный клапан связывается с вакуум-накопителем, нижняя – по-прежнему, с атмосферой. Движимый силой тяжести поршень создает в верхней полости и вакуум-накопителе разрежение.

При подходе поршня к нижней крышке верхняя полость связывается с атмосферой через обратный клапан, а нижняя – с магистралью, и цикл повторяется заново.

Эта конструкция обладает сильным недостатком, которая проявляется при проектировании системы управления. Из принципа работы видно, что управление приводом осуществляется по положению поршня. Управление современных пневмоприводов осуществляется с помощью электронных датчиков положения. Применение электронных компонентов сведет на нет все достоинства пневмопривода по сравнению с электроприводом, и сделает конструкцию неприменимой для экстремальных условий. Применение механических концевых выключателей сильно снизит ресурс работы.

Автором работы разработаны особые конструкции двухкамерного и четырехкамерного вакуумный пневмонасосов и их систем управления, которые позволят длительно работать в экстремальных условиях. Главное особенностью этой системы является использование гибридного вида управления двигателем – и по положению, и по давлению.

Б) Конструкция двухкамерного насоса для экстремальных условий



Рисунок 2.3. Схема двухкамерного вакуумного пневмонасоса.

Модель схожа с моделью обычного пневмоцилиндра, за исключением наличия штока (Рисунок 2.3). Здесь 1-поршень, 2-гильза, 3-крышки, 4-стяжки крышек, 5отверстия для подвода/отвода газа, 6-отверстия для управления. Чтобы понять работу нужно рассмотреть этап подхода поршня к крышке (Рисунок 2.4).



Рисунок 2.4. Схема торможения поршня.

До подхода поршня к крышке давление в полости определяется сопротивлением линии подвода/отвода газа. После того, как втулка поршня начнет заходить в выемку крышки, верхняя полость автоматически разделится: давление, действующее на втулку площадью  $\frac{\pi \cdot D_{em}^2}{4}$  будет продолжать зависеть от сопротивления линии, а давление на оставшуюся площадь поршня  $\frac{\pi \cdot (D_n - D_{em})^2}{4}$  - от сил, действующих на поршень. Таким образом, если рассмотреть пример движения поршня вверх под действие сжатого воздуха снизу, то после захода втулки в выемку крышки давление полости 1 практически не измениться, а давление полости 2 возрастет, причем за счет разности площадей, до давления выше, чем в нижней полости.



Рисунок 2.5. Принцип работы гравитационного двухкамерного вакуумного пневмонасоса для экстремальных условий.

Рассмотрим принцип действия двухкамерного пневмонасоса (Рисунок 2.5). Будем считать, что в начальный момент поршень у нижней крышки, а давление в полостях атмосферное. В нижнюю полость подается газ под давлением, а верхняя полость связывается с атмосферой через обратный клапан. Из-за разницы давлений поршень начинает движение вверх (1).

При приближении к верхней крышки, верхняя полость из-за конструктивных особенностей перекрывается. Поршень под действием силы тяжести и давления, которое образовалось за счет инерционного движения поршня, реверсируется и начинает движение вниз (2).

После реверса поршня верхняя полость связывается с вакуум-накопителем через обратный клапан, а нижняя – с атмосферой.

При приближении поршня к нижней крышке он тормозиться за счет подушки демпфера крышки, нижняя полость связывается с магистралью, верхняя – с атмосферой и цикл повторяется заново (3).

2) Четырехкамерный гравитационный вакуумный насос

Помимо двухкамерных конструкций предложены конструкции с большим количеством камер на примере четырехкамерного вакуумного насоса. Конструкция четырехкамерного вакуумного насоса представлена ниже (Рисунок 2.6).



Рисунок 2.6. Конструкция четырехкамерного гравитационного вакуумного пневмонасоса.

Свободнопоршневой пневматический вакуумный насос содержит корпус с крышками 4, 5 и 6, в котором расположен поршень со штоком 1. Корпус состоит из верхней и нижней гильз, соединенных между собой крышкой 5.

Крышки соединены между собой стяжками 7 и 8. В крышках выполнены отверстия для подвода газа 9, 10 и 11 и отверстия 12 и 13 для подсоединений линий управления цилиндрическим золотниковым распределителем 15. Крышки 5 и 6 имеют пазы, оппозиционно расположенные друг к другу. Дополнительные цилиндрические золотниковые распределители 16 и 17 соединены последовательно, а также имеют соединения с атмосферой, с отверстиями крышек 9 и 10 и с золотниковым распределителем 15. Обратные клапана подсоединяются к отверстию 9.

**Принцип работы.** Рассмотренная выше конструкция обладает возможностью работы, при необходимости, в несколько этапов.

1) Этап создания «низкого» (относительно максимальной глубины вакуума для этого устройства) вакуума.

В начальный момент считаем, что поршень находится в нижнем положении (Рисунок 2.7). В нижнюю полость нижней гильзы подается сжатый воздух, а остальные полости свяжем с атмосферой. Поршень начнет движение вверх. При подходе в верхней крышке нижней гильзы повторится ситуация с торможением, описанная выше, в результате чего верхние полости обеих гильз свяжутся с вакуумгенератором, а нижние – с атмосферой. Поршень под действием силы тяжести устремиться вниз, разряжая и высасывая газ из вакуум-накопителя. При подходе к нижней точке поршень затормозится и реверсируется и цикл начнется заново.



Рисунок 2.7. Этап создания «низкого» вакуума.

2) Этап создания «среднего» вакуума.

Этот этап (Рисунок 2.8) отличается от предыдущего, что при движении поршня вниз (вакуумирование) вакуум-накопитель соединен только с верхней полостью верхней гильзы, а остальные соединены с атмосферой. Таким образом уменьшается площадь контакта поршня с вакуумом, позволяя увеличивать его глубину.



Рисунок 2.8. Этап создания «среднего вакуума».

3) Этап создания «высокого вакуума».

Этап (Рисунок 2.9) также схож с первыми двумя с тем исключением, что на этапе вакуумирования верхняя полость верхней гильзы соединена с вакуум-накопителем, верхняя полость нижней гильзы – с источником сжатого воздуха, а нижние полости обеих гильз с атмосферой. Т.е. сжатый воздух совершает работу на этапе вакуумирования, чего не было в предыдущих случаях, тем самым увеличивая глубину вакуума.



Рисунок 2.9. Этап создания «высокого вакуума».

#### 2.1.2 Дифференциальный вакуумный пневмоприводной насос

В отличие от вертикальных вакуумных генераторов организовать работу с двумя камерами затруднительно, так как отсутствует сила тяжести, которая возвращала поршень в исходное положение. Применение пружин для организации работы двухкамерного насоса сильно снизит длину хода, и, как следствие, производительность. Поэтому подробно будет рассмотрена только конструкция с четырьмя полостями (Рисунок 2.10).



Рисунок 2.10. Конструкция дифференциального вакуумного пневмонасоса.

Конструкция состоит из поршня 1, который расположен в корпусе 2. Корпус разделен перегородкой 3 на две части. Корпус закрыт крышками 4 и 5 с двух сторон. Крышки имеют отверстия 6 и 7 для подвода и отвода газа из поршневых полостей, и отверстия 8 и 9 для подключения линий управления к этим полостям. Отверстия 10 и 11 служат для подвода и отвода газа из штоковых полостей.

Принцип действия рассмотрен ниже (Рисунок 2.11):

В начальный момент времени считаем, что поршень находится у крышки, допустим слева. В левую поршневую полость подается газ под давлением, а правая связана с атмосферой. Левая штоковая полость связана через обратный клапан с атмосферой, а правая – через обратный клапан с вакуум-накопителем. В результате создается перепад давлений на поршне, и он начинает движение вправо.



Рисунок 2.11. Принцип работы дифференциального вакуумного пневмонасоса.

При приближении поршня к правой крышке втулка поршня заходит в паз крышки, поршень, двигаясь по инерции создает давление в правой поршневой полости.

Происходит переключение, в результате которого правая поршневая полость связывается с магистралью, левая – с атмосферой, правая штоковая – с атмосферой через обратный клапан, левая – с вакуум-накопителем через обратный клапан. Создается перепад давлений и поршень начинает движение влево.

При приближении поршня к левой крышке, втулка поршня заходит в паз крышки и в левой поршневой полости повышается давление, аналогично, как это было у левой крышки.

Разумеется, можно и использовать другую конструкцию четырёхкамерного насоса со схожим принципом работы. Выше была рассмотрена конструкция с поршневыми приводными полостями. Ниже представлена конструкция со штоковыми приводными полостями (Рисунок 2.12).

52



Рисунок 2.12. Конструкция четырехкамерного вакуумного пневмонасоса со штоковыми приводными полостями.

Поршень 1 находится в корпусе 2, который разделен перегородкой 3. Корпус закрыт крышками 4 и 5 с двух противоположных сторон. Газ в штоковые полости попадает через отверстия 6 и 7. Линии управления подключаются к отверстиям 8 и 9. В крышках выполнены отверстия 10 и 11 для подвода и отвода газа из поршневых полостей.

## 2.2 Разработка принципиальных пневматических схем вакуумного насоса

Для реализации работы насосов по принципам, описанным выше, автором были разработаны принципиальные пневматические схемы управления процессом.

#### 2.2.1 Пневмосхема гравитационного пневмонасоса

#### 1) Двухкамерный вакуумный насос

Ниже представлена разработанная пневмосхема двухкамерного пневмонасоса. В центре схемы располагается двухкамерный бесштоковый пневмоцилиндр – вакуум-генератор (Рисунок 2.13).



Рисунок 2.13. Пневматическая схема двухкамерного вакуумного пневмонасоса.

В начальный момент времени будем считать, что поршень находится в нижнем положении. Вручную переключим распределитель, сжатый воздух пойдет в нижнюю полость, создаст перепад давлений и начнет движение поршень. Воздух, вытесняемый поршнем из верхней полости будет уходить через обратный клапан и глушитель в атмосферу. При вхождении втулки поршня в полость крышки поршень, с одной стороны, начнет торможение за счет создание воздушной подушки, а с другой – подаст сигнал на распределитель, который, за счет разницы давлений полостей, переключится. После переключения нижняя полость свяжется с атмосферой, а поршень за счет силы тяжести начнет движения вниз, создавая разряжение в верхней полости. Разряженная полость будет наполнятся из вакуум-накопителя через обратный клапан. При подходе к нижней крышке создаться ситуация, аналогичная к верхней – распределитель вновь переключится и цикл повториться. Дроссель с обратным клапаном необходим, чтобы не допустить моментального переключения распределителя при появлении разряжения в верхней полости, а также дать возможность его переключения через некоторое время (задается затяжкой дросселя), если поршень не дошел до нижней точки.

- 2 обр.клапана Вакуум-накопитель 2 обр.клапана Вакуум-генератор Вакуум-генератор Компрессор Осн. распределитель Обр.клапан
- 2) Четырехкамерный вакуумный насос (Рисунок 2.14)

Рисунок 2.14. Пневматическая схема четырехкамерного вакуумного пневмонасоса.

В схеме также происходит откачка газа из вакуум-накопителя. Осуществление основного возвратно-поступательного движения происходит за счет работы основного распределителя. В левом положении основного распределителя происходит наполнение сжатым газом нижней поршневой полости, а в правом – истечение газа из этой полости в атмосферу. Управление распределителем осуществляется по той же вышеописанной схеме – при подходе поршня к верхней крышке создается перепад давлений в полостях, который заставит переключиться в левое положение, а при подходе к нижней крышке – в правое положение.

На этапе работы с «низким вакуумом» распределитель 1 и распределитель 2 находятся в положении, как показано на схеме. При движении поршня вниз распределитель соединяет нижнюю штоковую полость с вакуум-накопителем, в результате чего откачка воздуха происходит двумя полостями одновременно.

На этапе работы со «средним вакуумом» распределитель за счет понижения давления в вакуум-накопителе переключается, связав нижнюю штоковую полость с распределителем 2, который, в свою очередь, связывает эту полость с атмосферой.

На этапе работы с «высоким вакуумом» давление в вакуум-накопителе снижается так, что происходит переключение распределителя 2. В результате этого, на этапе движения поршня вниз нижняя штоковая полость будет наполняться сжатым воздухом, позволяя дополнительно снизить предельное давление вакуума.

Стоит отметить, что распределители 1 и 2 можно и не устанавливать, если к системе не предъявляются особые требования к скорости откачки, глубине, предельному остаточному давлению и экономичности работы.

2.2.2 Пневмосхема дифференциального вакуумного генератора



1) С поршневыми приводными полостями (Рисунок 2.15)

Рисунок 2.15. Пневматическая схема дифференциального вакуумного пневмонасоса с поршневыми приводными полостями.

В центре схемы расположена конструкция вакуумного насоса, поршень которой приводится в действие сжатым газом. Сжатый газ подводится попеременно к поршневым полостям через основной распределитель. При приближении поршня к левой крышке создается перепад давлений на распределителе, и он переключается в левое положение, а при приближении к правой в правое, тем самым меняя магистральную полость с выхлопной. Газ откачивается штоковыми полостями из вакуум-накопителя через вакуумный распределитель. При движении поршня вправо сжатый воздух после основного распределителя поступает также на вакуумный распределитель и переключает его в правое положение, в результате чего штоковая полость, где идет разрежение газа, соединяется с вакуум-накопителем, а другая штоковая полость с атмосферой через обратный клапан. При движении поршня влево схожим образом сжатый воздух переключает вакуумный распределитель в левое положение, в результате чего также штоковая полость разрежения связывается с вакуум-накопителем, а другая штоковая – с атмосферой через обратный клапан.

2) С штоковыми приводными полостями (Рисунок 2.16)



Рисунок 2.16. Пневматическая схема дифференциального вакуумного пневмонасоса со штоковыми приводными полостями.

Принцип работы дифференциального вакуум-генератора с штоковыми приводными полостями аналогичен принципу с поршневыми приводными полостями. Отличия заключаются в присоединении линий основного распределителя к штоковым полостям, а линии вакуумного распределителя – к поршневым полостям. Если основной распределитель находится в правом положении, тогда сжатый газ наполняет правую штоковую полость, а газ из левой шоковой полости выходит в атмосферу, и поршень движется вправо. Газ из магистрали переключает вакуумный распределитель в левое положение, в результате чего левая поршневая полость (полость разрежения) соединяется с вакуум-накопителем, а правая соединяется с атмосферой через обратный клапан.

При приближении к правой крышке давление в левой штоковой полости достигнет значений выше, чем в правой, что также создаст перепад давлений на основном распределителе и он переключится в левое положение. После переключения газ из магистрали начнет подаваться в левую штоковую полость, а газ из правой истекать в атмосферу, и поршень начнет движение влево. Вакуумный распределитель также переключится и свяжет левую поршневую полость с вакуум-накопителем, а правую – с атмосферой через обратный клапан.

#### 2.2.3 Проблемы энергосбережения в пневмоприводе

Этот вопрос стал наиболее актуален в последние годы. Сегодня вкладываются огромные средства в промышленность для снижения энергопотребления. Среди всех приводов, одним из самых затратных является пневмопривод. Помимо повышения экономии при работе привода понижается и количество выбросов CO<sub>2</sub>. Легко осознать, что внедрение энергосберегающих технологий является лучшей инвестицией в будущее всего человечества. Чем меньше энергии мы потребляем – тем меньше вредных веществ попадает в воздух, которым мы дышим, в воду, которую мы пьём и в продукты, которые мы едим. Ниже приведены способы снижения издержек в работе пневмопривода, которые нужно учесть при конструировании.

1) Энергосбережение для исполнительных двигателей:

• Поддерживать минимально допустимое давление в системе (чем выше давление, тем больше расходы);

Давление в системе (абсолютное)	Экономия по сравнению с 7бар (абс.)
4	43%
5	29%
6	15%

- Стараться использовать двигатели одностороннего действия, где возврат поршня в исходное положение осуществляется внешними силами (уменьшает объем потребляемого газа, уменьшает количество впускных отверстий.
- Отключать полости двигателя от магистрали, когда в этом нет необходимости или установка на двигатели зажимных устройств;
- Располагать распределитель максимально близко к двигателям или использовать двигатели с встроенными распределителями;
- Правильно подбирать размер двигателя (слишком маленький не обеспечит необходимых характеристик, а большие будут необоснованно потреблять больший объем газа);
- Использовать двигатели с круглыми поршнями (другие типы будет сложно уплотнить и это приведет к повышенным утечкам);
- Использовать уплотнения согласно условиям эксплуатации (в противном случае они будут изнашиваться быстрее, что приведет к утечкам);
- Использовать дополнительные способы для центрирования поршней и штоков (при изгибании штоков нарушается работа уплотнений и растут утечки; применение направляющих и шарниров исключает их);
- Снижать трение в двигателях (следить за состоянием смазка, стараться использовать бесштоковые цилиндры, ограждать попадание грязи внутрь двигателя и т.п.).
  - 2) Энергосбережение для распределителей:
- Правильно выбирать тип и размер распределителя (неправильный подбор увеличивает потери и расход газа);

- Подавать меньшее давление на пилоты распределителей;
- Применять бистабильные распределители (нет необходимости поддерживать питание);
- Использовать реверсивные распределители (даёт возможность работы при низком рабочем давлении в основной системе или вакууме. При такой конструкции, отработанный воздух не проходит через регулятор давления – срок службы регулятора увеличивается);
- Использование пневмоостровов;
- Отключение подачи газа при простое оборудования.
  - 3) Энергосбережение для подготовки воздуха
- Использовать регулятор давления с прямым управлением вместо пилотного управления (у него нет внутреннего потребления воздуха);
- Использовать автоматический сброс конденсата (уменьшение попадание влаги в систему);
- Использовать ресиверы;
- Своевременно заменять фильтра;
- Уменьшать давление в пневмосистеме и использовать усилитель давления для машин, требующих высокого давления.

Усилитель давления (Рисунок 2.17) увеличивает давление только для определенных устройств, экономя при этом затраты на остальных участках, где высокое давление не нужно.



Рисунок 2.17. Схема с использованием усилителя давления

- 4) Энергосбережение для вакуумной техники
- Отключать вакуумный генератор при достижении необходимого давления;
- Подавать правильное давление на вакуумные генераторы для достижения оптимальных характеристик;
- Необходимо регулярное обслуживание глушителей и вакуумных фильтров;
- Располагать вакуумный генератор вблизи от системы, потребляющей вакуум
  - 5) Энергосбережение для пневмолиний
- Уменьшать длину линий;
- Использовать быстроразъемные фитинги;
- Выбирать материал линий согласно условиям внешней среды;
- При больших объемах потребления воздуха и требованиях к высокой скорости движения частей двигателя лучше подать газ в емкость, которая находится непосредственно перед выходным устройством.

#### 2.2.4 Разработка математической модели вакуумного пневмоприводного насоса

Рассмотрим математическую модель типового пневмопривода (2.1) и выполним необходимые преобразования, которые позволяют автоматически учесть все возможные изменения режимов течения и движения, как в режиме пневмопривода, так и в режиме насоса.

$$\begin{cases} M \frac{d^{2}x}{dt^{2}} = p_{1} \cdot F_{1} - p_{2} \cdot F_{2} - p_{a} \cdot (F_{1} - F_{2}) - F_{mp} - N \\ \frac{dp_{1}}{dt} = \frac{k \cdot f_{1} \cdot \sqrt{R \cdot T_{M}}}{F_{1} \cdot (x + x_{01}) \cdot \sqrt{\zeta_{1}}} \cdot \sqrt{p_{M}^{2} - p_{1}^{2}} - \frac{k \cdot p_{1}}{x + x_{01}} \cdot \frac{dx}{dt} , \qquad (2.1) \\ \frac{dp_{2}}{dt} = -\frac{k \cdot f_{2} \cdot \sqrt{R \cdot T_{M}}}{F_{2} \cdot (x + x_{02}) \cdot \sqrt{\zeta_{2}}} \cdot \left(\frac{p_{2}}{p_{M}}\right)^{\frac{k-1}{2\cdot k}} \cdot \sqrt{p_{2}^{2} - p_{a}^{2}} + \frac{k \cdot p_{2}}{S - x + x_{02}} \cdot \frac{dx}{dt} \end{cases}$$

Первое уравнение равенства сил отражает механику исполнительного органа пневмопривода. Уравнение легко адаптировать и для других устройств объемного пневмопривода: пневмоцилиндров (с одним и более поршнями и штоками; вертикальных и горизонтальных), неполноповоротных пневмодвигателей и пневмомоторов. Стоит заметить, что множество параметров уравнения – постоянные величины, и все решение, как правило, сводится к нахождению величины давления в полостях пневмоцилиндра.

Второе и третье уравнение использовать в чистом виде удобно, пожалуй, для случаев простого управления и наличия постоянной нагрузки. Для более сложных случаев уравнения сильно усложняются, и зачастую при изменении нескольких параметров или наличию нескольких нестандартных особенностей у системы, приводит к неправильным результатам и повторной работе над моделью.

Итак, выполним следующие преобразования системы (2.1):

Для этого 2-ое и 3-е уравнение системы (2.2) объединим в одно с добавкой трех логических коэффициентов.

Математическая модель в этом случае имеет вид:

$$\begin{aligned} &M \frac{d^2 x}{dt^2} = p_{n-1} \cdot F_{n-1} + a_{dew(n-1)} \cdot f_{am(n-1)}(p_{aw(n-1)} - p_{n-1}) - \\ &-p_n \cdot F_n - a_{dew(n)} \cdot f_{aw(n)}(p_{aw(n)} - p_n) - F_{mp} - \varepsilon \cdot mg \\ \\ &\frac{dp_n}{dt} = \left[ \frac{k \cdot f_n \cdot \sqrt{R \cdot T_M}}{C(F_n \cdot X_{no3}) + V_{nos(n)}(1 - C)\sqrt{\zeta_n}} \cdot \sqrt{p_{aw(n)}^2 - p_n^2} - A_{nos} \cdot C \cdot \frac{k \cdot p_n}{X_{nos}} \cdot \frac{dx}{dt} \right] \cdot B - \\ &- \left[ \frac{k \cdot f_n \cdot \sqrt{R \cdot T_M}}{C(F_n \cdot X_{nos}) + V_{nos(n)}(1 - C)\sqrt{\zeta_n}} \cdot \left(\frac{p_n}{p_M}\right)^{\frac{k-1}{2k}} \cdot \sqrt{p_n^2 - p_{aw(n)}^2} + A_{nos} \cdot C \cdot \frac{k \cdot p_n}{X_{nos}} \cdot \frac{dx}{dt} \right] \cdot (1 - B) \\ \\ &a_{dew(n)} = 1, \text{если есть } \partialewn \phiep, a_{dew(n)} = 1, ecлu nem; \\ &\alpha = 1, ecnu npusod pacnonowcen sepmukanь no, \alpha = 0, ecnu горизонтально; \\ &X_{nos} = (S - x + x_{01}); A_{nos} = 1, ecnu nonocmь nopulnesan; \\ &X_{nas} = (S - x + x_{01}); A_{nos} = -1, ecnu nonocmь umokosans; \\ &B = 1, ecnu P_n > P_n - npoyecc ucmevenus; \\ &C = 1, ecnu cas hanonnnem / ucmekaem npusod c dsuwyuumucs vacmsmu; \\ &C = 0, ecnu cas hanonnsem / ucmekaem nocmosnhuků ofbem; \\ &x = 0; = 0, npu x \le 0, x = S; = 0, npu x \ge S \\ &\varepsilon = 1, ecnu npusod sepmukanь nu, c = 1, ecnu - copusohmanshuků. \end{aligned}$$

где

 $P_{{}_{6\!H}}$ -внешнее давление, подводимое к полости;  $P_n$ - давление внутри полости,  $f_{{}_{BT}}$  – площадь втулки демпфера.

В связи с объединением уравнения возникла необходимость условного деления полостей на поршневые и штоковые (относительно поршня), так как объем полостей удобно выражать через перемещение поршня, который у полостей общий. Это привело к появлению двух коэффициентов  $X_{non}$  и  $A_{non}$ .  $X_{non}$  – отражает положение поршня для полостей пневмоцилиндра через координату положения поршня х.  $A_{non}$  – определяет знак приращения давления в полостях за счет движения поршня.

Коэффициент *В* позволяет системе «автоматически» определять, какой режим имеет место (наполнение или опустошение), в зависимости от соотношения величин внешнего давления  $P_{e_H}$  и давления внутри полости  $P_n$ .

Коэффициент *С* позволяет пользоваться системой для приводов и емкостей постоянного объема.

Рассмотрим несколько особенностей системы (2.40) по сравнению с системой (2.39):

1) Универсальность. Как уже было сказано выше, уравнение изменения давления подходит для любой полости пневмоцилиндра независимо от того, какой процесс происходит в ней (наполнение или истечение). Выбор процесса осуществляется автоматически при сравнении давлений внешнего и внутри полости;

2) Необходимость ввода дополнительной информации об «основной» и «соседней» полостях (количество битов информации совпадает с количеством поршней пневмоцилиндра). Эту информации необходимо заносить непосредственно перед началом расчета оператору программы, или вводить дополнительную несложную программу, которая автоматически сообщит системе эту информацию (присвоит всем левым и нижним полостям статус «основная», а правым и верхним – «соседняя» и т.п.).

3) Коэффициент С с одной стороны не позволяет системе работать с мнимыми значениями (т.к. мнимые величины здесь не соответствуют механике процесса), а с другой стороны позволяет оператору вводить значения больших отрицательных давлений, тем самым создавая ситуацию «вход в полость перекрыт и давление в ней может изменяться только под действием движущегося поршня». Тем самым это позволяет избежать ввода дополнительных коэффициентов и условий.

4) Возможность разбить систему уравнений пневмопривода на блоки (см. глава 3).

#### 2.3 Вывод

- Рассмотрены основные требования по уменьшению энергопотребления, которые необходимо учесть при проектировании вакуумного пневмонасоса;
- Разработаны конструкции двухкамерного и четырехкамерного гравитационных вакуумного пневмонасоса;
- Разработана конструкция четырехкамерного дифференциального вакуумного пневмонасоса;
- Разработана пневматическая схема для двухкамерного и четырехкамерного гравитационного вакуумного пневмонасоса;
- Разработана пневматическая схема четырехкамерного дифференциального вакуумного пневмонасоса;
- 6) Разработана математическая модель, которая позволяет автоматически определять процесс течения газа в полостях, определять их количество, тип (переменного и постоянного объема) и т.д.

# Глава 3. Разработка унифицированной программы и интерфейса для расчета вакуумного пневмоприводного насоса

Для разработки унифицированной программы и интерфейса для расчета вакуумного пневмонасоса рассмотрим возможности пакета LabVIEW.

# 3.1 Решение дифференциальных уравнений в LabVIEW

Рассмотрим основные функции, представленные в программной оболочке LabVIEW, необходимые для моделирования процессов в вакуум-генераторе.

## 3.1.1 Описание функций решения дифференциальных уравнений

Как было описано выше, в основе математической модели лежит решение дифференциальных уравнений. В LabVIEW есть несколько заложенных блоков для решения дифференциальных уравнений:

1) Решатель ОДУ (ODE Solver).



Рисунок 3.1. Решатель ОДУ.

Этот полиморфный Виртуальный Прибор (ВП) (Рисунок 3.1) находит решение обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) с начальными условиями, записанными в следующей форме: X'=F(X,t). Селектор полиморфного ВП позволяет выбрать варианты реализации ВП с вводом правой части F(X,t) с помощью строкового кластера или с помощью специального ВП. На рисунке показано подключение ВП при выборе второго варианта.

- Вход. данные(data) относится к типу Вариант и может использоваться для передачи произвольных данных к ВП ОDE F(X,t).
- Вход ОДЕ F(X,t) передает ссылку строгого типа к ВП, который обеспечивает выполнение правой части ОДУ dX/dt=F(X,t). При вводе правой части ОДУ с помощью строкового кластера ODE RHS последний содержит следующие элементы:
- **F**(**X**,**t**) одномерный массив строк, представляющих правые части дифференциальных уравнений;
- Х массив строк переменных;
- время (time) строка, обозначающая временную переменную. По умолчанию это **t**.
- Вход **x0** передает вектор начальных условий ОДУ. Вход **параметры решения** (simulation parameters) определяет набор параметров, используемых для конфигурирования числового решения дифференциального уравнения.
- Выход интервалы времени (times) возвращает массив отметок времени, по которым ВП производил расчет. Выходы (outputs) являются двумерным массивом значений. Каждая строка соответствует вектору значений у, рассчитанному в определенное время. Каждый столбец у представляет временное изменение фиксированного значения у.
  - 2) Решение ОДУ методом Эйлера (Рисунок 3.2)



Рисунок 3.2. Решение ОДУ методом Эйлера.

ВП находит решение обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) с начальными условиями, используя метод Эйлера.

- Вход **X** представляет массив строк с именами переменных.
- Вход начальное время (time start) задает начальную точку решения ОДУ. По умолчанию значение время входа равно 0.
- Вход конечное время (time end) определяет конечную точку временного интервала решения. По умолчанию значение входа равно 1,0.
- Вход **h** задает величину фиксированного шага. По умолчанию его значение равно 0,1.
- Вход X0 определяет вектор начальных условий x[10], ..., x[n0]. x[10], ..., x[n0]
  Между компонентами X0 и X существует однозначное соответствие.
- Вход время(time) представляет строку, задающую переменную времени. По умолчанию в качестве переменной используется t.
- Вход F(X,t) задает одномерный массив строк, представляющих правые части дифференциальных уравнений.
- Выход интервалы времени (Times) отображает массив, представляющий интервалы времени.

Метод Эйлера использует одинаковые временные интервалы между начальным временем и временем конечным временем. конечным временем.

Выход значения X (Values) отображает двумерный массив вектора решений x[10], ..., x[10], ..., x[n]. Верхний индекс соответствует интервалам времени, определенным в массиве интервалы времени, интервалы времени нижний индекс – элементам x[10], ..., x[n]. x[10], ..., x[n].

Стандартная форма записи системы линейных дифференциальных уравнений первого порядка включает запись самой системы и ее начальных условий 2.1:

$$\begin{cases} \dot{x}_{1}(t) = f_{1}(x_{1}(t), \dots x_{n}(t), t) \\ \dots \\ \dot{x}_{n}(t) = f_{n}(x_{1}(t), \dots x_{n}(t), t) \end{cases} \begin{cases} x_{1}(t_{0}) = x_{10} \\ \dots \\ x_{n}(t_{0}) = x_{n0} \end{cases}$$
(2.1)

Предполагается, что функции  $f_1,...f_n$ , начальные условия  $x_{10},...x_{n0}$  и начальный момент времени заданы. Необходимо определить вид зависимостей  $x_1(t),...x_n(t)$ . Используя обозначения  $F = (f_1,...f_n)$ ,  $X = (x_1(t),...x_n(t))$  и  $X_0 = (x10,...xn0)$ , систему уравнений можно записать в векторной форме (2.2).

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = F(X(t), t) \\ X(t_0) = X_0 \end{cases}$$
(2.2)

Метод Эйлера является наиболее простым методом решения обычных дифференциальных уравнений (ОДУ). Его суть заключается в использовании при пошаговом интегрировании зависимой переменной двух первых членов ряда Тейлора. Таким образом, итерационная процедура вычисления значений  $X(t_i)$  при начальном моменте времени t0 и достаточно малом шаге интегрирования h может быть записана в следующем виде:  $X(t_0 + h) = X(t_0) + hF(X(t_0),t_0)$ ,  $X(t_0 + 2h) = X(t_0 + h) + hF(X(t_0 + h),t_0 + h)$ . Этот процесс останавливается, когда начальное время + nh <конечное время, где конечное время представляет правую конечную точку исследуемого процесса.

3) Решение ОДУ методом Рунге Кутта 4го порядка (Рисунок 3.3)



Рисунок 3.3. Решение ОДУ методом Рунге Кутта 4го порядка.

ВП решает обыкновенные дифференциальные уравнения (ОДУ) с начальными условиями, используя метод Рунге Кутта. Метод Рунге Кутта работает с фиксированным шагом, обеспечивая вместе с тем более высокую точность, чем метод Эйлера. Функции одноименных входов и выходов идентичны рассмотренному выше ВП – Решение ОДУ методом Эйлера (ODE Euler Method). Метод Рунге Кутта имеет 4ый порядок и итерационные расчетные выражения выглядят следующим образом:

$$K_{1} = hF(X)t_{n}; \quad K_{2} = hF\left(X(t_{n}) + \frac{K_{1}}{2}, t_{n} + \frac{h}{2}\right); \\ K_{3} = hF\left(X(t_{n}) + \frac{K_{2}}{2}, t_{n} + \frac{h}{2}\right); \\ K_{4} = hF(X(t_{n}) + K_{3}, t_{n} + h); \quad X(t_{n+1}) = X(t_{n}) + \frac{K_{1}}{6} + \frac{K_{2}}{3} + \frac{K_{3}}{3} + \frac{K_{4}}{6}.$$

Этот процесс останавливается при достижении условия начальное время + nh <конечное время, где конечное время представляет правую конечную точку исследуемого процесса.

4) Решение ОДУ методом Кэш Капа 5ого порядка (Рисунок 3.4)



Рисунок 3.4. Решение ОДУ методом Кэш Капа 5 ого порядка.

ВП решает ОДУ с начальными условиями с помощью метода Кэш Капа. Метод Кэш Капа работает с адаптивным шагом и в вычислительном отношении более эффективен по сравнению с методами Эйлера и Рунге Кутта. Итерационные расчетные выражения для метода выглядят следующим образом:

$$k_{1} = hF(X(t_{n}), t_{n}); k_{2} = hF(X(t_{n}) + a_{2}h, t_{n} + b_{21}k_{1});$$
  
$$k_{6} = hF(X(t_{n}) + a_{5}h, t_{n} + b_{61} + \cdots b_{65}k_{5});$$

И

$$X(t_{n+1}) = X(t_n) + c_1k_1 + \dots + c_6k_6$$
$$X^*(t_{n+1}) = X(t_n) + c_1^*k_1 + \dots + c_6^*k_6$$

c  $t_{n+1} = t_n + h$ .

Действительный размер шага  $h_{new}$  определяется с помощью выражения $h_{new} = h \left| \frac{\text{точность}}{\Delta} \right|^{\frac{1}{5}}$ , где h – предыдущий размер шага,  $\Delta = |X(t_{n+1}) - X^*(t_{n+1})|$ 

5) Решение линейного ОДУ п-го порядка в численном виде (Рисунок 3.5)



Рисунок 3.5. Решение линейного ОДУ п-го порядка.

ВП решает однородное линейное дифференциальное уравнение nго порядка в численном виде.

•Вход А представляет вектор коэффициентов различных производных функции **x**(**t**), начиная с коэффициента производной самого низкого порядка. Коэффициент при производной самой высокой степени предполагается равным 1 и не требует ввода.

•Вход **X0** представляет вектор начальных условий x[10], ..., x[n0]. Между компонентами **X0** и **X** существует однозначное соответствие.

•Вход число точек (number of points) задает число равноудаленных по времени точек между начальным и конечным временем. По умолчанию число точек равно 10.

•Входы начальное время и конечное время определяют начальную и конечную точки интервала, на котором ищется решение ОДУ. По умолчанию значения точек равны соответственно 0,0 и 1,0.

•Выход интервалы времени (Times) содержит массив значений интервалов времени.

•Выход **X** содержит вектор решений х в равномерно расположенных на оси времени х точках, заданных в массиве **интервалы времени**.

Решение линейного однородного дифференциального уравнения n-го порядка:

$$x^{(n)} + a_{n-1}x^{(n-1)} + \dots + a_1x^{(1)} + a_0x_0 = 0$$

с начальными условиями  $\mathbf{x}(\mathbf{0}) = \mathbf{x}_{00}$ ;  $\mathbf{x}^{(1)}(\mathbf{0}) = \mathbf{x}_{10}$ ; ...,  $\mathbf{x}^{(n-1)}(\mathbf{0}) = \mathbf{x}_{n-10}$  ищется с помощью разложения выражения на простые сомножители и определения его корней. При наличии **n** различных комплексных корней  $\lambda \mathbf{1}_1$ ...,  $\lambda_n$  общее решение дифференциального уравнения n-го порядка может быть записано в следующем виде:

$$x(t) = \beta_1 \exp(\lambda_1 t) + \dots + \beta_n \exp(\lambda_n t)$$

Неизвестные коэффициенты  $\beta_1$  и  $\beta_n$  могут быть определены с помощью начальных условий:

$$\begin{aligned} x(0) &= \beta_1 + \dots + \beta_n; x^{(1)}(0) = \beta_1 \lambda_1 + \dots + \beta_n; \dots x^{(n-1)}(0) \\ &= \beta_1^{(n-1)} \lambda_1^{(n-1)} + \dots + \beta_n^{(n-1)} \lambda_n^{(n-1)} \end{aligned}$$

, где 0 соответствует начальному времени (time start).

Так, например, для решения дифференциального уравнения с начальными условиями x(0) = 2 и необходимо ввести A = [2, -3] и X<sub>0</sub> = [2, 3].

6) Решение линейного ОДУ n-го порядка в символьном виде (Рисунок 3.6)



Рисунок 3.6. Решение линейного ОДУ п го порядка.

ВП решает однородное линейное дифференциальное уравнение n-го порядка с постоянными коэффициентами в символьном виде.

•Входы **A** и **X0** идентичны одноименным входам рассмотренного выше ВП Решение линейного ОДУ n-го порядка в численном виде (Linear nth Order Numeric).

•Выход формула (formula) содержит решение в символьном виде.
Общее решение дифференциального уравнения имеет следующий вид:

$$x(t) = \beta_1 \exp(\lambda_1 t) + \dots + \beta_n \exp(\lambda_n t)$$

с комплексными  $\beta_1,...,\beta_n$  и  $\lambda_{1,...}$   $\lambda_n$ .

Однако все входы ВП имеют реальные значения, соответственно и решения являются также реальными. Решение в символьном виде представляет линейную комбинацию экспоненциальных, синусоидальных и косинусоидальных функций с действительными числовыми коэффициентами.

7) Решение системы линейных ОДУ в численном виде (Рисунок 3.7)



Рисунок 3.7. Решение системы линейных ОДУ.

ВП решает систему линейных дифференциальных уравнений n-го порядка с заданными начальными условиями. Решение основано на определении собственных значений и собственных векторов базовой матрицы. Решение дается в численном виде.

•Вход А задает матрицу размером n × n, описывающую линейную систему.

•Вход **X0** определяет вектор из **n** элементов, описывающий начальные условия, x[10],...x[n0]. Между компонентами **X0** и **X** существует однозначное соответствие.

•Входы число точек, начальное время и конечное время идентичны одноименным входам рассмотренного выше ВП Решение линейного ОДУ n-го порядка в численном виде (ODE Linear nth Order Numeric). Аналогичное соответствие существует и между выходами **интервалы времени** и значения **X** этих ВП.

Данный ВП позволяет получить правильные решения практически для всех случаев действительной матрицы А, которая может иметь повторяющиеся собственные значения, комплексные А значения и т. п. Исключением является случай с сингулярными собственными векторами. Работа с такой матрицей завершается ошибкой -23016. Линейная система дифференциальных уравнений может быть записана в векторной форме:

$$\frac{dX(t)}{dt} = AX(t); X(0) = X_0$$

Здесь  $X(t) = (x_0(t), ..., x_n(t))$  и A представляет реальную матрицу размером n × n. Линейная система может быть решена с помощью определения собственных значений и собственных векторов. Пусть S представляет набор всех собственных векторов, распределенных во всем n-мерном пространстве. Тогда преобразование n Y=SX(t) приводит запись системы к следующему виду:

$$\frac{dY(t)}{dt} = SAS^{-1}Y(t); Y(0) = SX_0$$

Матрица SAS-1 имеет диагональную форму, поэтому решение очевидно. Решение может быть получено путем обратного преобразования  $X(t) = S^{-1}Y(t)$ .

8) Решение системы линейных ОДУ в символьном виде (Рисунок 3.8).



Рисунок 3.8. Решение системы линейных ОДУ.

ВП решает систему линейных дифференциальных уравнений n-го порядка с заданными начальными условиями. Решение основано на определении собственных значений и собственных векторов базовой матрицы. Решение дается в символьном виде.

•Вход А задает матрицу размером n × n, описывающую линейную систему.

•Вход X0 определяет вектор из n элементов, описывающий начальные условия, x[10],...x[n0]. Между компонентами X0 и X существует однозначное соответствие.

•Выход формула (formula) представляет строку с решением системы линейных уравнений в стандартной формульной записи LabVIEW. Элементы вектора решения разделены символом «возврат каретки». Линейное дифференциальное уравнение, описанное следующей системой:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -7 - 6 & 4 & -1 \\ -6 & 2 & 1 & -2 \\ 4 & 1 & 0 & 2 \\ -1 - 2 & 2 & -7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix}$$
с начальными условиями 
$$(x_1(0) = 1)$$
$$(x_2(0) = 2)$$
$$(x_3(0) = 3)$$
$$(x_4(0) = 4)$$

имеет решение:

 $(1,62*\exp(-12,46*t)-1,28*\exp(-6,30*t)+0,63*\exp(1,34*t)+0,04*\exp(5,42*t))+(0);$   $(0,84*\exp(-12,46*t)-0,29*\exp(-6,30*t)+1,51*\exp(1,34*t)-0,06*\exp(5,42*t))+(0);$   $(-0,73*\exp(-12,46*t)+0,01*\exp(-6,30*t)+3,69*\exp(1,34*t)+0,02*\exp(5,42*t))+(0);$ 

 $(+0.87 \exp(-12.46 \pm t)+2.67 \exp(-6.30 \pm t)+0.45 \exp(1.34 \pm t)+0.01 \exp(5.42 \pm t))+(0).$ 

Для получения решения необходимо ввести следующие значения: **A**: [-7,-6,4,-1;-6,2,1,-2;4,1,0,2;-1,-2,2,-7], **X0**[1,2,3,4] [6].

#### 3.1.2 Пример решения дифференциального уравнения методом Рунге - Кутта

Описание и реализация функций решения дифференциальных уравнений в LabVIEW довольно сложные, однако нет необходимости серьезно разбираться в каждом методе. Достаточно иметь базовые представления о каждом методе решения и понимать какой тип данных нужно подключить в Виртуальному Прибору(ВП).

В качестве примера (Рисунок 3.9) рассмотрим решение простых дифференциальных уравнений для движения тела с постоянным ускорением (допустим падение тела в вакууме на поверхности Земли), которое описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} a = 9,8; \\ V = adt; \\ x = Vdt. \end{cases}$$

где а – ускорение свободного падения, V – скорость, х – перемещение.



#### Рисунок 3.9. Block diagram примера свободного падения груза.

Для этого поместим в окно block diagram ВП Runge Kutta и подсоединим к его свободным концам входы и выходы по умолчанию (правая кнопка мыши – create – control/indicator). Входы шаг, время начала и окончания представляют собой десятичные числа. Вход начальные данные  $X_0$  – это массив чисел (ряд, каждое число которого записывается в отдельную строчку столбца). Х (имена переменных) и F(x,t) – это массивы строк (запись в виде текста), что позволяет записать в строки не только числа, но и буквы переменных и математические функции. Выход ВП представляет собой двумерный массив (матрицу) в котором каждый столбик является решением каждого уравнения. Так как наибольший интерес представляют значения скорости и перемещения, то с помощью функции Index агтау выделим из матрицы только 1 и 2 столбцы (отсчет столбцов в программе начинается с значения 0).



Заполняем Front panel следующим образом (Рисунок 3.10):

Рисунок 3.10. Front panel примера свободного падения.

Время начала классически устанавливают 0. Время окончания находится эмпирически (для данного примера 5с). Шаг – 1мс. Имена переменных а, V, х – ускорение, скорость и перемещение соответственно (очень важно, чтобы все строки всех параметров совпадали). Начальные данные X0 – -9,8, 0, 100, что означает, что вначале объект находится под действием ускорения свободного падения со скоростью 0 и на высоте 100м. Правые части уравнений F(X,t) следующие: 0 – ускорение принимаем неизменным, а – скорость есть интеграл от ускорения, V – перемещение – это интеграл от скорости. В результате получаем линейное изменение скорости и квадратичное для перемещения, что и ожидалось. Время касания Земли составляет около 4,5с.

Стоит заметить, что расчет дифференциальных уравнений останавливается только по значению конечного времени, что для многих задач неудобно: в примере удобнее остановить расчет при достижении объектом поверхности Земли и не решать далее, создавая неверные отрицательные значения координаты. Аналогично и в пневмоприводе – границами расчета являются такие параметры как движение поршня, течение газа в полостях и т.п. Поэтому этот блок необходимо будет немного изменить (будет рассмотрено ниже). Для того, чтобы понять, как нужно изменить этот блок, требуется понять, что же будет представлять собой программа.

#### 3.2 Блочное математическое моделирование привода

Как отмечалось выше, одной из основных проблем при создании моделей гидро- и пневмопривода являлась нацеленность на человека, имеющего специализированное образование. Это сильно осложняет возможность помощи специалистов из других областей, без которых вышеуказанные привода не получили бы современного развития. Также и наоборот – специалист гидравлик или пневматик испытывает большие трудности по внедрению в привод новейших достижений, скажем из области управления и электроники. Поэтому зачастую многие инновации не доходят или внедряются в гидро- и пневмопривода очень медленно, так как основное время тратиться на разбор имеющихся систем уравнений, их анализ, а не на само внедрение.

Выше рассматривалось изменение уравнений системы, в результате которого подчеркивалась их универсальность. Это свойство было рассмотрено не случайно, так как оно позволяет представить уравнения в виде элементарных единиц – бло-ков.

Блок – это универсальная единица математической модели, служащее только для определенной задачи. Блок может использоваться для всех математических моделей типовых и сложных пневмоприводов без влияния волновых процессов. В результате такого метода можно разделить основную программу (Виртуальный Прибор) на несколько подпрограмм (Виртуальных Подприборов): Блок механики течения газа, Блок механики пневмоцилиндра, Блок направляющей аппаратуры, Блок управления и т.д.

С точки зрения визуального восприятия и применения метода блочного моделирования данный пакет очень удобен, так как в нем есть возможность создания «прибора» - блока, который удобно копировать и вставлять в различные программы.

Одним из серьезных этапов проектирования подобных программ является этап связывания блоков, требующий особой внимательности. Опыт показывает, что этот этап не вызывает проблем, если все авторы пользовались одинаковыми обозначениями при проектировании блоков, а также старались или убрать, или пояснить «особые» параметры их блоков (которые вводил сам автор или которые он брал из своей области знаний). Соединятся блоки согласно своей задаче в системе.

Не трудно догадаться, что из элементарных блоков можно построить очень сложные модели приводов. С другой стороны, можно заранее связать несколько часто используемых систем блоков, такие как пневмоцилиндр одностороннего и двухстороннего действия, с одним и двумя штоками, с одним и более поршнями и т.п. и вести настойку привода лишь выставляя несколько галочек. Таким образом, благодаря такому проектированию, есть возможность создания широкой библиотеки элементов, отличающуюся высокой прозрачностью для пользователя и легкостью пополнения элементов, необходимых в работе. Кроме того, открывается возможность работы со сложной программой несколькими авторами одновременно, обмолвившись предварительно связью между блоками. Каждый блок можно собрать независимо от другого и полностью протестировать до соединения в общей программе.

#### 3.3 Разработка программы расчета пневмонасоса вакуума

Кратко основную цель программы можно описать следующим образом:

Программа должна моделировать процессы в линейном пневмоприводе (пневмоцилиндре) и емкостях постоянного объема с учетом различных направлений течений газа (наполнение и истечение), различной направляющей аппаратуры, различных давлениях, сопротивлениях линий и т.п. Изменение основных параметров геометрии пневмоцилиндра также должно быть доступно.

С точки зрения данных, на вход программы должны подаваться значения диаметров поршней, штоков и длин их хода, начальных давлений в полостях, скоростей и координат положений поршня, начального и конечного времени. Одной из основных задач является возможность создавать различные условия эксплуатации привода, при которых при заданных обстоятельствах (координаты и скорость поршней) будут автоматически выбираться заданные величины подключаемых давлений к полостям, а также диаметры условных проходов и сопротивлений подводящих линий. На выходе программы должен быть получен массив данных, которые будут отражать процессы изменения давлений в полостях, координат и скоростей поршней.

Для достижения такое работы программы автор предлагает следующее деление на блоки:

### 3.3.1 Разработка блока для записи уравнений

Начать обзор модели удобнее практически с конца. Так как решение дифференциального уравнения находится в центре модели, то Виртуальный Прибор (ВП) решения дифференциальных уравнений считается основой. Из примера, описанного выше уже известны основные входные и выходные сигналы. Выходной сигнал решения – это и есть частный результат работы модели – её назначения. Для подачи входных сигналов необходимо создать отдельный Подприбор, который обеспечит правильность поступления на него уравнений и имен переменных – Блок создания уравнений (Рисунок 3.11).



Рисунок 3.11. Блок записи уравнений.

Для описания привода необходимо иметь уравнения давлений газа в полостях, а также параметры перемещения движущихся частей (поршней) – ускорения, скорости, координаты, которые находятся из уравнения сил, действующих в приводе. Исходя из этого, уравнения условно можно разделить на уравнения движения газа и уравнения движения механических частей. Это разделение отражается и в модели – Подприбор «Блок создания уравнений» содержит два Подприбора «Механики газа» и «Механики пневмоцилиндра». Результаты работы этих подприборов объединяются функциями insert into array так, что уравнения и имена переменных газа записываются в начале массива, а уравнения сил – в конце.



## 1) Блок Механики газа (Рисунок 3.12)

Рисунок 3.12. Блок механики газа.

В блоке рассмотрены различные варианты течения газа:

- Полость с постоянным (ресивер) или переменным объемом (полость пневмоцилиндра);
- Полость перекрыта или связывается с внешним давлением;
- Идет процесс наполнения или истечения из полости.

В программе LabVIEW эти условия записать довольно просто, используя функцию Case Structure (Рисунок 3.13). Если выполняется булево условие A (сигнал true – правда), то программа выполняет часть программы, записанную внутри прямоугольна True, если условие ложно, то выполняется часть в прямоугольнике False (ложь) (Здесь функции True и False показаны рядом для удобства, в LabVIEW они находятся друг под другом и переключаются стрелками в верхней части).



Рисунок 3.13. Case Structure.

С помощью блок схемы эта часть программы представлена на Рисунок 3.14. В начале программа определяет постоянный или переменный объем («Это ресивер»), далее определит есть ли взаимосвязь в внешним давлением или полость перекрыта («полость перекрыта?»), в завершение определяется процесс течения газа по отношению к полости – наполнение или истечение («Наполнение?»).



Рисунок 3.14. Блок схема уравнений газа.

В результате обработки информации в этой части программы возможно получить 6 различных решений – уравнений давлений в полостях:

$$\begin{cases} \frac{dP}{dt} = 0 - ypaвhehue 1\\ \frac{dp_n}{dt} = \frac{kf_n \sqrt{RT_m}}{V_{pecusepa} \sqrt{\xi_n}} \sqrt{p_{en}^2 - p_n^2} - ypaвhehue 2\\ \frac{dp_n}{dt} = -\frac{kf_n \sqrt{RT_m}}{F_n X_{non} \sqrt{\xi_n}} \left(\frac{p_n}{p_M}\right)^{\frac{k-1}{2k}} \sqrt{p_n^2 - p_{en}^2} - ypaвhehue 3\\ \frac{dp_n}{dt} = -A_{non} \frac{kp_n}{X_{non}} \frac{dx}{dt} - ypashehue 4\\ \frac{dp_n}{dt} = \frac{kf_n \sqrt{RT_m}}{F_n X_{non} \sqrt{\xi_n}} \sqrt{p_{en}^2 - p_n^2} - A_{non} \frac{kp_n}{X_{non}} \frac{dx}{dt} - ypashehue 5\\ \frac{dp_n}{dt} = -\frac{kf_n \sqrt{RT_m}}{F_n X_{non} \sqrt{\xi_n}} \left(\frac{p_n}{p_M}\right)^{\frac{k-1}{2k}} \sqrt{p_n^2 - p_{en}^2} - A_{non} \frac{kp_n}{X_{non}} \frac{dx}{dt} - ypashehue 6\end{cases}$$

Уравнение 1 – полость постоянного объема перекрыта;

Уравнение 2 – наполнение полости постоянного объема;

Уравнение 3 – истечение из полости постоянного объема;

Уравнение 4 – поршневая полость перекрыта;

Уравнение 5 – изменение давление поршневой полости при наполнении;

Уравнение 6 – изменение давление поршневой полости при истечении;

Здесь обозначения аналогичны уравнениям, рассмотренным в предыдущей главе. Под употребляемым здесь термином поршневая полость стоит понимать, что переменность объема обусловлено движением поршнем и имеет мало общего с обще употребляемыми терминами поршневых и штоковых полостей.

Формирование всех этих уравнений в LabVIEW выглядят следующим образом (Рисунок 3.15-Рисунок 3.20):







Рисунок 3.16. Наполнение полости постоянного объема.







Рисунок 3.18. Перекрытая полость поршневой полости (переменного объема).







Рисунок 3.20. Истечение из поршневой полости.

В результате для работы программы нужно 3 булевых сигнала «Перекрытие полости?», «Это ресивер?» и «Наполнение». Кроме этого понадобятся численные значения подсоединяемого внешнего давления к полости и основ уравнений (значение заранее проведенных алгебраических действий с параметрами  $k, f_n, R, T_M, F_n, \zeta_n$ ).

Так как полостей несколько, а действия подпрограммы схожи для каждой полости, то сигналы подаются на вход блока массивами чисел, и чтение этих сигналов происходит построчно с помощью функции for loop (Рисунок 3.21), которая работает столько циклов, сколько строк в массиве. При этом она индексирует входные и выходные сигналы, в результате чего за каждый новый цикл читается по одному новому значению из каждого массива, а после всех операций все решения собирается в один массив.



# Рисунок 3.21. Функция For Loop

При составлении уравнений очень важную роль стоит уделить правильной расстановке коэффициентов параметров (на практике здесь возникает наибольшее количество ошибок). Для этого этот процесс автоматизируется в этом блоке с помощью следующей части программы (Рисунок 3.22):



Рисунок 3.22. Подпрограмма деления на «поршневую и штоковую полости».

Значок I – порядковый номер цикла функции for loop (начиная с 0). Так как цикл читает массивы полостей, то для каждой отдельной полости этот номер будет свой. В результате для первой полости везде будет автоматически расставлен коэффициент 0, для 2-ой – 1, 3-ей – 2 и т.д. В результате переменные давлений получат свой номер, совпадающий с номером полости.

Еще важный момент этой части – автоматическое деление на поршневую и штоковую полость. Так как получается, что каждая вторая полость условно штоковая, то с помощью функции проверки кратности и функции саse structure задается, что все нечетные (правда – true) полости являются поршневыми и имеют в знаменателе вид ( $x + x_{01}$ ) со знаком «минус», а четные (ложь - false) – штоковыми с знаменателем ( $S - x + x_{02}$ ) со знаком «плюс».

Коэффициент перемещений и скоростей (х и v) изменяется только при нечетных значениях полостей (один поршень окружают 2 полости), поэтому значение меняется, когда появляется новая поршневая полость. Если поршни соединены между собой, образуя одну движущуюся часть, то коэффициент скорости и перемещения остается всегда постоянным. Эта часть программы отражена на Рисунок 3.23.



Рисунок 3.23. Расстановка коэффициентов для скорости и перемещения пориней.



Блок-схема этой части показана на Рисунок 3.24.

Рисунок 3.24. Блок-схема для расстановки индексов скорости и перемещения.

Работу блока можно проверить (Рисунок 3.25):

					блок механики	rasa.vi Front Panel *	
<u>File Edit View P</u> 강 & ●	oject Operate Tools V	Vindow I					2 F
	Это ресивер?		енешнее давления Ран3 Ран4 Ран5 Ран6	e) o	уравнения полостей 0 основа2"sqtt(abs(Peн2^2-p1^2))*sign(Peн2^2-p1^2) -основа3"sqtt(abs(Peн2^2-Peн3^2)))*((p2/10000)^0,0222)*sign(p2^2-(Peн3^2)) +(1,4*p3*t)(1,000-x1+0,01)) социасБласта (x400))Sign (Pan52,2 (x400)) (x410-x10) (x410-x10))		
¢) o	наполнение?	<u>*</u> )0	основы уравнений основа1 основа2 основа3 основа4		основа3 здицебурн -основа6*sqrt(abs(p5/	2-(Pa+62))) sign(psh3-2-(Pa+62))*((r+0,0)-(r,4 pa 4/)(x(+0,0)))      2-(Pa+62)))*sign(p5/2-(Pa+62))*((p5/10000)^0,0.222)/(1,000-x1+0,01)+(1,4*p5*v1/(1,000-x1+0,01)))     имена переменных полостей     p0     p1     p2     p3     p4     p5	
÷ 0	Перекрытые полости			кол-во ци т) 1	илиндров		

Рисунок 3.25. Front panel блока механики газа.

В проверке были введены различные значение булевых сигналов, которые позволяют получить все вышеописанные уравнения. Все получаемые уравнения и имена давлений полостей соответствуют заданным условиям (можно проверить по скриншоту программы). Здесь и далее, по аналогии со школьными обозначениями, х – перемещение, V – скорость, а – ускорение движущихся частей.



2) Блок механики пневмоцилиндра (Рисунок 3.26):

#### Рисунок 3.26. Блок механики пневмоцилиндра.

«Блок механики пневмоцилиндра» записывает уравнения сил, действующие на движущиеся части пневмоцилиндра. Блок предусматривает работу с пневмоцилиндрами, которые в своей конструкции имеют демпфера в конце хода (отсюда необходимость иметь булевы сигналы демпфера и значения площадей втулок f<sub>вт</sub>). В этой версии программы есть возможность работы с приводами с раздельными и соединенными в один поршнями (определяется оператором «вид цилиндра»).

Для работы программы также нужно иметь следующие входные величины: m – масса движущихся частей, В<sub>вяз</sub> – коэффициент вязкого трения, F<sub>n</sub> – эффективные площади поршней, Р<sub>вн</sub> – внешнее давление полостей, f<sub>вт</sub> площади втулок.

Функция For Loop (слева) в данном случае работает с данными каждой гильзы пневмоцилиндра (поршневая и штоковая полости) – каждый новый цикл обрабатывается новая гильза. Результат работы – запись уравнения сил давления, действующих на поршень.

Организованный в верхней части функции for loop сдвиговый регистр автоматически расставляет коэффициенты переменным уравнений.

После получения уравнений сил давлений на поршень происходит или их сложение, если поршни соединены между собой, где скорость и перемещение рассматривается только для первого поршня, или запись уравнений как системы уравнений, в которой каждый поршень имеет свой индивидуальный индекс (Рисунок 3.27).



Рисунок 3.27. Блок механики пневмоцилиндра.

Блок механики пневмоцилиндра.vi Front Panel *						
dit <u>V</u> iew <u>P</u> roject <u>O</u> p	perate <u>T</u> ools <u>W</u> in	dow Help				
5 관 🖲 🖬 15pt	t Application Font					3
	En 🖉 🕞 En					
		1				
		2				
		4				
	, i i i i i i i i i i i i i i i i i i i	4	уравнения механики		имена переменных механики	
	ВН	ешнее давление полостей	0 (p0*F1-p1*F2-M*9,8-Ввяз*v0)/М	5	0 10	
	÷ 0	Рен1	(p2*F3+fвт3*(Рвн3-p2)-p3*F4-fвт	4*(Рвн4-р3)-М*9,8-Ввяз*v1)/М	v1	
M	F	Рвн2	v0		x0	
Ввяз	F	Рвн3	v1		x1	
Ввяз	F	Рен4				
			<b>_</b>			
	2 0 F	вт1				
	f	BT2				
	f	вт3				
	f	вт4	кол-во цил	индров		
	0	емпфер	2			
	÷) 0					
		$\bigcirc$				
		$\bigcirc$				

Результат работы блока (Рисунок 3.28):

Рисунок 3.28. Front panel блока механики пневмоцилиндра.

В проверке продемонстрировано составление уравнений для двух пневмоцилиндров. В одном конструкция без демпферов, в другом – верхний и нижний (правый и левый) демпфера сработали одновременно (частный случай). Видно, что программа составила уравнения правильно (два – уравнения сил в пневмоцилиндрах и два – правая часть дифференциального уравнения перемещения поршней). Имена переменных скорости и перемещения также составлены верно с учетом коэффициентов (см. скриншот программы).

# 3.3.2 Разработка блок направления течения газа

Для работы предыдущего блока требуется множество сигналов. Которые весьма трудно задать неподготовленному пользователю.

Основная задача «блока направления течения газа» (Рисунок 3.29) заключается в определении давлений подключаемого к полости и внутри полости и определение режима течения газа: наполнение или истечение. Вторая важная задача, которую осуществляет этот блок, является создание возможности рассчитывать

привод, в котором есть возможности связывать полости переменных объемов между собой. Для этого оператору будет достаточно вместо постоянного значения давления в графе внешнего давления записать номер полости со знаком минус. Второстепенная задача блока – преобразовать значение внешнего давления в формат строки, так как это требуется для следующего блока.



Рисунок 3.29. Блок направления течения газа.

Функция for loop считывает значения внешнего и последнего (оно же и начальное) значения давлений из двух массивов. Затем происходит сравнение с нулем, в результате которого программа определяет какое внешнее давление рассчитывается (постоянное или переменное).

В случае постоянного давления произойдет сравнение внешнего давления с последним значением (номера строк массивов совпадают с номерами полостей привода). Если внешнее давление больше или равно, чем внутри полости, то происходит наполнение (сигнал наполнение –верно), если наоборот – то истечение (наполнение – ложь). Значение внешнего давление преобразуется в строковый выходной сигнал без изменений. В случае переменного давления (Рисунок 3.30), порядковое значение полости сравнивается с давлением полости, номер которой указал пользователь (значение давления берется из массива последних значений). Если внешнее давление больше или равно, чем внутри полости, то происходит наполнение (сигнал наполнение верно), если наоборот – то истечение (наполнение – ложь). При записи строкового выходного сигнала внешнего давления программа перед номером полости добавит букву р (в итоге получатся имена полостей с переменным объемом – p1, p2, p3...).



Рисунок 3.30. Случай переменного давления.

В формате блок схемы эта часть программы выглядит следующим образом (Рисунок 3.31):



Рисунок 3.31. Блок схема блока направления течения газа.

Результат работы блока отражен на Рисунок 3.32.



Рисунок 3.32. Front panel блока направления течения газа.

На скриншоте экрана продемонстрированы случаи когда Р<sub>вн</sub>≥Р<sub>посл</sub>, Р<sub>вн</sub><Р<sub>посл</sub> и Р<sub>вн</sub><0. Результатом, как видно является наполнение полости для первого случая, и истечение для остальных (для последнего Р<sub>3</sub>>Р<sub>1</sub> – истечение). Строчное значение для первого и второго случая преобразовалось без изменений, а для последнего, где Р<sub>вн</sub><0 – с прибавлением символа р, что является верным.

## 3.3.3 Разработка блока пневматической аппаратуры

Известно, что течение в гидро- и пневмоприводе обуславливается не только перепадом давлений в полостях, но и наличием гидравлической или пневматической аппаратуры. Исходя из этого, недостаточно иметь только один «блок направления течения газа». Необходим еще один блок учитывающий эту аппаратуру (Рисунок 3.33).

Блок позволяет работать встроенными в линии дросселями, обратными клапанами, дросселями с обратными клапанами, перекрытыми линиями, а также с пневмоцилиндрами в конструкцию которых входит пневмодемпфер.



Рисунок 3.33. Блок пневматической аппаратуры.

Все эти виды аппаратуры оператор может задать с помощью двух параметров – площади и сопротивлений пневмолиний:

Положительное значение площади линии означает, что в линию встроен дроссель с заданным сопротивлением.

Нулевое значение площади – что линия перекрыта.

Отрицательное – что в линии есть обратный клапан.

При этом предполагаются различные варианты установки обратного клапана:

1) обратный клапан, установленный в направлении к пневмоцилиндру (только наполнение);

2) обратный клапан с установкой от пневмоцилиндра (только истечение);

3) обратный клапан и дроссель в направлении пневмоцилиндра (наполнение с минимальным сопротивлением, истечение с заданным);

4) обратный клапан и дроссель с установкой от пневмоцилиндра (наполнение с заданным сопротивлением, истечение – с минимальным).

Реализация происходит по следующему алгоритму:

За один цикл с помощью функции for loop считываются значения площадей и сопротивлений пневмолиний и предполагаемый процесс течения газа из предыдущего блока.

Затем программа проверяет выполнение условия f≥0. Если верно, то это случай с дросселем (при выполнении условия f=0 дроссель полностью перекрыт) имеющий заданные величины площади и сопротивления (f, ζ).

При условии f=0 и  $\zeta = \infty$  система воспринимает этот случай как пневмодемпфер (полость при этом изолирована, внешнее давление действует только на втулку демпфера). Если f<0, то это условие наличия обратного клапана:

При  $\zeta = \infty$  это просто обратный клапан, при остальных – дроссель с обратным клапаном.

Если  $\zeta>0$  обратный клапан направлен к пневмоцилиндру (только наполнение для обратного клапана или наполнение с минимальным сопротивлением и истечение с заданным для дросселя с обратным клапаном). Для остальных значений  $\zeta$  считается, что обратный клапан направлен от пневмоцилиндра (только истечение для обратного клапана или наполнение с заданным сопротивлением и истечение с минимальным для дросселя с обратным клапаном).

Случаи с обратным клапаном показаны на Рисунок 3.34 и Рисунок 3.35.

В заключение, блок выполнит преобразование, согласно формулам изменения давлений в полости ( $\frac{f_n}{\sqrt{\zeta_n}}$  \* основа, где основа =  $k\sqrt{RT_m}$ ).



Рисунок 3.34. Случай дроссель с обратным клапаном.



Рисунок 3.35. Случай с обратным клапаном.

В виде блок схемы подпрограмма выглядит следующим образом (Рисунок 3.36):



Рисунок 3.36. Блок схема блока пневматической аппаратуры.

# 100

8		_		Блок обратного кл	апана.vi Front Panel *		
Eile Edit View P	roject <u>Operate</u> <u>T</u> ools 15pt Application Fo	Window Help	- <b>()</b> -				<u></u>
	0 0   0 0   0 0   0 0   0 0   0 0   0 0   0 0   0 0   0 0   0 0   0 0   0 0   0 0   0 0   0 0   0 0   0 0   0 0   0 0	dizta 0 0 2 0 4 0 4 0 4 0 4 0 4 0 0 0 1 0 4 0 1 0 4 0 4 0 0 0 1 0 4 0 1 0 4 0 4 0 0 0 1 0 4 0 4 0 4 0 1 0 4 0 4 0 4 0 1 0 4 0 4 0 1 0 4 0 1 0 4 0 1 0 4 0 1 0 4 0 1 0 4 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1		астоянные уравнений 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4		основы уравнений 4.00000 0.000000 2.000000 1.788554 1.788554 0.126491 1.788854 1.788854 1.788854 1.788854 1.788854	
<							,

Проверка работоспособности отражена на Рисунок 3.37.

# Рисунок 3.37. Front panel блока пневматической аппаратуры.

Первая строчка данных описывает случай дросселя, вторая – полость перекрыта, третья – пневмодемпфер, четвертая и пятая – дроссель с обратным клапаном, направленным от пневмоцилиндра с случаями наполнения и истечения, шестая и седьмая – дроссель с обратным клапаном, направленным на пневмоцилиндр с случаями наполнения и истечения, восьмая и девятая – обратный клапан направленный от пневмоцилиндра с случаями наполнения и истечения, десятая и одиннадцатая – обратный клапан, направленный на пневмоцилиндр с случаями наполнения и истечения.

### 3.3.4 Разработка блока площадей

В блоке площадей вычисляются эффективная площадь поршня и площадь втулки (Рисунок 3.38).



Рисунок 3.38. Блок площадей.

Вычисление идет согласно следующим формулам:

$$\begin{cases} F_{\Im \phi} = \frac{\pi \left( d_{\Pi \text{орш}}^2 - d_{\Pi \text{тока}}^2 \right)}{4} \\ f_{\text{BT}} = \frac{\pi d_{\text{BT}}^2}{4} \end{cases}$$

# 3.3.5 Разработка блока основ уравнений

Блок основ уравнений (Рисунок 3.39) производит необходимые математические операции неизменных параметров газа и конструкций пневмопривода и ресиверов.



Рисунок 3.39. Блок основ уравнений.

Газовые постоянные (показатель адиабаты для воздуха процесса k=1,4; температура воздуха при нормальных условиях  $T_m$ =293К и удельная газовая постоянная для сухого воздуха R=287Дж/кг\*К) преобразуются по формуле  $k\sqrt{RT_m}$ .

После этих предварительных вычислений данные поступают на функции for loop: один для основ уравнений газа пневмоцилиндра, другой – ресиверов. Так как эффективные площади поршней необходимо задавать для каждой полости, то количество этих площадей совпадает с количеством полостей. Поэтому в итоге количество основ уравнений для полостей будет равно количеству полостей. Внутри функции for loop для полостей происходит деление преобразованных газовых постоянных на эффективную площадь для каждой полости. Внутри функции for loop для ресиверов происходит деление приведенных газовых постоянных на объем ресивера для каждого ресивера. После преобразования функции for loop создают 2 массива основ для полостей пневмоцилиндра и для ресиверов. С помощью функции insert into array объединяются 2 массива так, чтобы ряд для полостей был вначале, а для ресиверов в конце.

Вторая функция этого блока – создания массива булевого сигнала «это ресивер?», который позволяет программе понимать, когда она рассчитывает ресивер, а когда полость. Для создания этого сигнала используются вышеописанные функции for loop, в которых устанавливаем постоянное булево значение false (ложь) и на выходе получаем массив нулевых (ложных) значений для полостей, а для ресиверов устанавливаем постоянное значение true (правда) и получаем массив единичных (правдивых) значений сигнала «это ресивер». В завершении эти массивы объединяются тем же способом, как и массивы постоянных уравнений – для полостей в начале, для ресиверов – в конце.

В завершении, в блоке функция number to fractional string переведет число массив эффективной площади в массив строк.

103

# 3.3.6 Разработка блока Рунге-Кутта

Отличием блока Рунге-Кутта от классического является изменение структуры for loop на while loop, что позволяет прерывать расчет дифференциальных уравнений не по времени, а по условиям (положение и скорость поршня, давления полостях) (Рисунок 3.40). С появлением структуры while loop необходимо подавать сигнал для остановки цикла, в связи с этим появился блок Stop.



Рисунок 3.40. Отличие блока Рунге-Кутта от классического.

# Блок Stop

Блок Stop проверяет соответствие решения протекаемому процессу течения газа, направлений скоростей и положений поршней (Рисунок 3.41).



Рисунок 3.41. Блок Stop.

Если изменилось направление движения поршней (булев сигнал «положительная скорость» и v>0 имеют противоположные значения) – определяется функцией «исключающее или не». Или координата не соответствует расчетному диапазону [X<sub>min</sub>;X<sub>max</sub>] (запись через функцию «И»). Или изменение направления течения газа (P<sub>вн</sub>>0 и «Наполнение?» имеют разные знаки) - определяется функцией «исключающее или не». При любом из этих условий решение дифференциального уравнения прервётся для записи решения, соответствующего всем условиям.

### 3.3.7 Разработка блока управления

Блок управления (Рисунок 3.42) определяет в каком диапазоне находятся поршни и в каком направлении движутся и назначает такие параметры системы (диаметр подводящих линий и их сопротивление, внешнее давление), которые пользователь задал в интерфейсе программы для этого диапазона. Таким образом, входящими величинами являются массивы данных максимальное и минимальное

105

положение поршней X<sub>max</sub>, X<sub>min</sub>, диаметр условного прохода и сопротивление линий d<sub>f</sub>, ζ, булево значение направление скорости «положительная скорость?» и начальные данные из которых будет взята информация о положении и значении скорости.



Рисунок 3.42. Блок управления.

В начале программы из начальных данных считываются положение и скорость (в примере используется только 1 поршень, поэтому считываются только последнее значение положения и предпоследнее скорости) и подаются на вход структура while loop вместе с остальными массивами (двумерный массив). При каждом цикле while loop считываются данные для каждого отдельного условия (одномерный массив). Внутри while loop находится структура for loop, которая из одномерных массивов прочитает данные для каждой полости. Внутри for loop происходит сравнение текущего положения и направления движения с границами условий. Если текущие значения совпадают с условием, то цикл прерывается и дальнейший расчет происходит только с теми значениями параметров системы, которые соответствуют этому условию.

### 3.3.8 Разработка блока крышек цилиндра

Блок крышки служит фильтром решений дифференциальных уравнений. Если в решении будут присутствовать значения координаты поршня лежащей за пределами крышек пневмоцилиндра, то эти значения будут округлены до координаты ближайшей крышки, а скорость обнулена (Рисунок 3.43). Таким образом, в этом блоке создается условие абсолютно неупругого удара.



Рисунок 3.43. Блок крышки.

3.3.9 Компоновка блоков

В компоновке блоков представлены все вышеописанные блоки. Так как имена переменных во всех блоках одинаковое, то соединять линиями нужно входы и выходы с одинаковыми названиями (Рисунок 3.44).



Рисунок 3.44. Компоновка блоков.

Начальные данные, блок площадей и блок основ уравнений целесообразно разместит вне цикла (чтобы один и тот же расчет не велся каждый цикл).

После запуска программы расчет будет проходить по следующей схеме:

 Начальные данные образуются путем соединения массивов давлений в полостях и ресиверах, скоростей и положений поршней (данные располагаются друг за другом) – разделение было сделано для удобства ввода данных пользователем.

2) Используя данные диаметров поршней, штоков и втулок пневмодемпферов будут рассчитаны эффективные площади поршней и демпферов в «блоке площадей».

3) В «блоке основ уравнений» пройдет математическое преобразование неизменных величин для полостей и ресиверов.

4) Запустится цикл while loop. В «блоке управления» пройдет анализ положения и направления движения поршней и системе будут назначены такие параметры, которые пользователь задал для этого направления и положения.

5) В «блоке направления течения» газа пройдет сравнение давлений и определение характера течения газа (наполнение или истечение).

6) В «блоке пневматической аппаратуры» произойдет корректировка течения газа и параметров линий при наличии пневматической аппаратуры.

7) Исходя из вышеописанных преобразований, «блок создания уравнений» запишет дифференциальные уравнений давления газа в полостях, уравнение баланса сил, скорости и перемещения поршней и подаст на входы блока Рунге-Кутта.

8) Блок Рунге-Кутта будет решать эти уравнения до тех пор, пока движение поршней соответствует движению, заданное пользователем и течению газу, определенному блоками «направления течения газа» и «пневматической аппаратуры».
9) После прерывания расчета «блока Рунге-Кутта» массив решения от фильтруется «Блоком крышки».

10) Решения запишутся к остальному массиву решений (или начнут записываться, если цикл первый).

11) Если время моделируемого привода больше времени, указанным пользователем или была нажата кнопка Stop, то цикл while loop прервется, и программа остановится. Если нет – то цикл начнется заново.

Вид конечного интерфейса имеет следующий вид (Рисунок 3.45):

В параметрах пневмоцилиндра задаются диаметры поршней, штоков и втулок пневмодемпферов для каждой полости (таким образом можно моделировать различные типы цилиндров), длины хода, массы и коэффициенты вязкого трения поршней, тип цилиндра (в этой программе поршни, соединённые штоками и раздельные). Ресиверы характеризуются параметром объема ресиверов. В начальных данных давление полостей записывается для каждой полости в отдельной строчке. А аналогично записывается и давление в ресиверах. В оставшихся столбцах вводятся значения начальной скорости и положения всех поршней.



Рисунок 3.45. Front panel компоновки.

В параметрах интегрирования задаются начальное и конечное время, а также шаг интегрирования в секундах.

Наиболее внимательно нужно относится к заполнению таблицы условий. Здесь все параметры системы (давление полостей, площадь и сопротивление линий) каждого отдельного условия должны записываться в одну строчку. Каждый новый столбец – это полость, вначале заполняются для цилиндров, затем для ресиверов. Массивы заполняются согласно подписям – давлениями, площадями и сопротивлениями линий.

# 3.4 Правила работы с программой

- Выбрать вид цилиндра (в этой версии программы только поршни раздельные и соединенные штоками в один);
- 2) Заполнить параметры пневмоцилиндра:

Для удобства нужно рассматривать все поршни с каждой стороны отдельно (справа-слева; сверху-снизу) и записывать все параметры. В одну строку записывают параметры с каждой стороны поршня (диаметры поршня, штока и втулки демпфера – в мм); значение 0, если нет объекта. Здесь и далее, начинать следует с нижней полости, если привод находится не в горизонтальном положении. Нумерация полостей должна сохранятся на протяжении всей программы одна!

- Вписать значения длины гильзы (в м), массы движущихся частей (в кг), коэффициента вязкого трения и объемов ресиверов (м<sup>3</sup>) (для отдельного ресивера в отдельной строчке);
- 4) Заполнить начальные данные:

Давление в полостях пневмоцилиндра (в Па);

Давление в полостях ресиверов (в Па);

Положение и скорости поршней приводов (м и м/с). Для одного и того же поршня строки должны совпадать;

- Выставить параметры интегрирования: начальное и конечное время, шаг интегрирования (в секундах);
- 6) Заполнить условия и параметры для них:

Записать границы движения поршней в рамках одного условия. Начальное значение записывается в матрице X<sub>min</sub>, конечное – X<sub>max</sub>. Если поршень один, то все записывается в один столбец. Здесь и далее в массивах, каждая строчка означает одно условие, а каждый столбец – одну полость. Поэтому все записанные значения в одной строке будут соответствовать указанному диапазону.

Далее заполняется таблица направления движения. Она необходима для того, чтобы была возможность записать два различных условия для одного и того же диапазона движения поршней, но различных направлений. Если привод имеет не горизонтальное расположение, то за положительную скорость необходимо брать движение вверх.

После условий следуют таблицы параметров пневматической системы. Они заполняются по тем же правилам (в строку условия, в столбец полости).

Особое внимание уделяется заполнению таблиц с площадями и сопротивлениями линий, так как с помощью специальной записи этих параметров можно промоделировать работы некоторой пневматической аппаратуры:

- Дроссель. Площадь (f<sub>n</sub>) линии и сопротивления (ζ<sub>n</sub>) имеют положительные реальные значения. f<sub>n</sub>>0, ζ<sub>n</sub>>0.
- Перекрытая линия  $f_n=0; \zeta_n \neq \infty$ .
- Работа пневмодемпфера  $f_n=0; \zeta_n=\infty.$
- Обратный клапан направленный на полость (только наполнение)  $f_n < 0; \zeta_n = \infty$ .
- Обратный клапан направленный от полости (только истечение)  $f_n < 0; \zeta_n = -\infty$ .
- Дроссель с обратным клапаном направленный на полость (только наполнение) f<sub>n</sub><0; ζ<sub>n</sub>>0. (ζ<sub>n</sub> сопротивление дросселя).

- Дроссель с обратным клапаном направленный от полости (только наполнение) f<sub>n</sub><0; ζ<sub>n</sub><0.</li>
- 1) Нажать кнопку run, программа произведет расчет и постоит графики в правой части программы.

# 3.5 Вывод

- 1) Показаны методы решения дифференциальных уравнений в LabVIEW;
- 2) Предложен блочный метод моделирования систем пневмопривода;
- Разработана программа расчета вакуумного пневмонасоса, детально расписана работа её отдельных блоков;
- 4) Разработаны рекомендации по работе с программой расчета вакуумного пневмонасоса.

#### Глава 4. Исследования вакуумного пневмоприводного насоса

### 4.1 Цели и методы проведения исследований

Математическая модель создавалась для получения информации о динамике работы свободнопоршневого пневматического вакуум-генератора. Основное внимание уделялось определению влияния основных конструктивных параметров (масса, диаметр и длина хода поршня), магистрального давления на процесс работы устройства с целью нахождения оптимальных параметров. Одной из основных задач являлось определение оптимальных параметров работы насоса и создание методики расчета подобных устройств.

Исследования проводились для следующих начальных условий:

- Начальное давление во всех полостях насоса атмосферное;
- Поршень в начальный момент покоится в нижней части корпуса;
- Коэффициент вязкого трения поршня принимаем 15 Н · с/м (вычислен с помощью экспериментальной установки);
- Силой трения покоя пренебрегаем, считая, что поршень постоянно движется;
- Крайние точки для торможения поршня выбирались опытным путем равнялись 0,1м от крышек цилиндра (эта величина обеспечивает безударную работу устройства при максимальном ходе поршня);
- Коэффициент сопротивления линий принимается 15 для истечения газа из полости через глушитель и 30 – для всех остальных случаев (данные получены из практики эксплуатации пневмоприводов [5]);
- Объем вакуум-накопителя принимается равным 1л для гравитационных насосов и 10л для дифференциальных.

#### 4.2 Результаты исследования двухкамерного вакуумного пневмонасоса

Исследования проводились при различных длинах хода поршня, массах и диаметрах поршней. В ходе эксперимента были получены зависимости значений давлений в вакуум накопителе. Расчеты показали, что существует величина минимального магистрального давления, обеспечивающая надежную работу устройства. Зависимость от диаметра поршня приведена ниже (Рисунок 4.1). Такая скорость выбрана для возможности работы с распространенными полиуретановыми уплотнениями. При использовании более износостойких уплотнений скорость привода может быть увеличена.



Рисунок 4.1. Давление питания для 2-камерного вакуумного пневмонасоса.

### 4.2.1 Пример заполнения интерфейса и вид характеристик

При каждом расчете получены следующие зависимости: изменение координаты и скорости поршня, изменение давлений в полостях насоса и вакуум-накопителе. Наибольший интерес представляет характеристика изменения давления в вакуум-накопителе, поэтому она будет приводиться для каждого эксперимента. Остальные характеристики представлены только в одном примере.

В качестве примера взят привод со следующей геометрией: диаметр поршня d<sub>п</sub>=20мм, диаметры нижней и верхней демпфирующих втулок d<sub>вт1</sub>=5мм, d<sub>вт2</sub>=10мм, длина гильзы 1м, объем ресивера 1л, масса движущихся частей М=4кг. Границы нижнего и верхнего торможения установлены на значениях 0.08м и 0.92м. Давление в магистрали Р<sub>м</sub>=2.4бар (абсолютных, или 1.4бар относительных). Заполнение этих данных довольно простая задача в интерфейсе программы. В последней версии программы трудности может вызывать заполнение внешних давлений полостей и параметров трубопровода (Таблица 1).

Таблица 1	1.	Пример	заполнения	интерфейса	программы.
-----------	----	--------	------------	------------	------------

	<b>P</b> <sub>1</sub>	<b>P</b> <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	$f_{\tau p1}$	f <sub>rp2</sub>	f <sub>Tp3</sub>	$\zeta_1$	$\zeta_2$	ζ3
Вверх 0-0,92м	240000	101325	0	5	-5	0	30	-Inf	0
Верх 0,92-1м	240000	101325	0	5	0	0	30	Inf	0
Вниз 0,08-1м	101325	-3	-2	5	-5	-5	15	Inf	-Inf
Вниз 0-0,08м	101325	-3	-2	0	-5	-5	Inf	Inf	-Inf

В таблице и в программе знак бесконечности обозначается Inf.

При таких параметрах получается следующие характеристики (взяты первые 6 сек работы):

График перемещения поршня (Рисунок 4.2)



Рисунок 4.2. Изменение перемещения поршня двухкамерного вакуумного пневмонасоса.



# График изменения скорости поршня (Рисунок 4.3):







Рисунок 4.4. Давление в нижней полости двухкамерного вакуумного пневмонасоса.



# График изменения давления верхней полости (Рисунок 4.5):

Рисунок 4.5. Давление в верхней полости двухкамерного вакуумного пневмонасоса.



График изменения давления вакуум-накопителя (Рисунок 4.6):

Рисунок 4.6. Давление ресивера двухкамерного вакуумного пневмонасоса.

На этапе подъема поршня вверх нижняя полость заполняется магистральным газом p<sub>1</sub> через трубопровод с диаметром d<sub>тp1</sub>=5мм и коэффициентом сопротивления  $\zeta_1$ =30 и устанавливается на величине, близкой к величине давления в магистрали. Верхняя полость за счет минимального сопротивления в линиях (d<sub>тp2</sub>=-5мм,  $\zeta_2$ =-inf – обратный клапан выпускает газ из полости), имеет давление весьма близкое к атмосферному p<sub>2</sub>. Давление в ресивере не меняется, так как он отключен.

При верхнем торможении ( $d_{rp2}=0$ ,  $\zeta_2=inf$  - демпфер), за счет работы демпфера, давление в верхней полости резко возрастает до значений более высоких, чем давление в нижней полости, распределитель переключается, связывая нижнюю полость с атмосферой, а верхнюю с ресивером. За счет разницы давлений и массы движущихся частей поршень реверсируется и начинает движение вниз.

При движении поршня вниз, газ из нижней полости выходит в атмосферу  $(d_{rp1}=5MM, \zeta_1=15)$  и давление поддерживается вблизи значения атмосферного  $p_1$ . В верхней полости ( $p_2=-3$ ,  $d_{rp3}=-5MM$ ,  $\zeta_3=inf$  – газ через обратный клапан истекает из полости 3) создается разряжение и газ из ресивера ( $p_3=-2$ ,  $d_{rp3}=-5MM$ ,  $\zeta_3=-inf$  – газ через обратный клапан истекает в полость 2) поступает в нее – давление в ресивере падает.

При нижнем торможении демпфер преобразует часть кинетической энергии в давление в нижней полости (d<sub>тр1</sub>=0, ζ<sub>1</sub>=inf - демпфер), из-за чего оно резко возрастает, что приводит к переключению распределителя. Нижняя полость связывается с магистралью, верхняя – с атмосферой. Поршень реверсируется, движется вверх и цикл повторяется заново.

Таким образом, рассмотренные графики подтверждают возможность работы и управления устройством по алгоритму, описанного в прошлых главах.

Общий вид процессов (до 100сек работы) можно увидеть ниже:

118



# График изменения перемещения поршня (Рисунок 4.7):





График изменения скорости поршня (Рисунок 4.8):

Рисунок 4.8. Скорость поршня двухкамерного вакуумного пневмонасоса.



График изменения давления в вакуум-накопителе (Рисунок 4.9):

Рисунок 4.9. Изменение давления ресивера двухкамерного вакуумного пневмонасоса.

График изменение давления в нижней и верхней полости (Рисунок 4.10-4.11):





Рисунок 4.10. Изменение давления нижней полости двухкамерного вакуумного пневмонасоса.

Рисунок 4.11. Изменение давления верхней полости двухкамерного вакуумного пневмонасоса.

Как видно из графиков, по мере увеличения глубины вакуума в вакуум-накопителе граничные положения поршня смещаются кверху. В результате может возникнуть ситуация, что перепад давление на распределителе при подходе поршня к нижней крышке окажется недостаточным для его переключения. Переключение в этом случае будет осуществлено за счет вакуума верхней полости. Увеличение вакуума приводит также к увеличению скорости подъема поршня. Заход втулки поршня в паз крышки приводит к резкому возрастанию давления в верхней полости. Поэтому распределитель при подходе поршня к верхней точке гарантированно переключается.

#### 4.2.2 Влияние шага интегрирования на процесс

Поскольку дифференциальные уравнения решаются методом Рунге-Кутта, то высокую степень на результат вычисления может оказать шаг интегрирования.

Ниже приведены графики давления вакуума в вакуум-накопителе и перемещение поршня при различно шаге интегрирования (Рисунок 4.12-Рисунок 4.15):





Если сравнить графики с шагом 0,1 секунд и 0,01 секунд с наиболее точным 0,001 секунд, то наблюдаются следующие различия. При сравнении графиков изменения давления в вакуум-накопителе расхождение для шага 0,1 секунд и 0,01 секунд составляет соответственно 4% и 1%. При сравнении графиков перемещения поршня видно, что за 5 секунд при шаге 0,1 секунд укладывается 7,7 циклов, при 0,01 секунд – 9,4, при 0,001 секунд – 9,6.

Пневмоприводной вакуумный насос не относится к высокоответственным машинам, поэтому 5% точность при расчете является вполне достаточной.

Важным фактором при выборе шага интегрирования является время расчета процесса, которое напрямую зависит от производительности компьютера. На компьютере с двухъядерным процессором по 2,3ГГц и оперативной памятью 8Гб расчет процесса работы пневмоприводного вакуумного насоса в 200 секунд для шага 0,1 секунда составляет 2 секунды, 0,01 секунда – 6 секунд, 0,001 секунда – 36 секунд, 0,0001 секунда – 6,5 минут.

Таким образом, рационально выбрать шаг 1мс, так как расчет при таком шаге обладает высокой точностью и недолгим временем расчета для имеющегося оборудования.

- 4.2.3 Исследование влияния массы поршня на характеристики насоса
- Влияние массы на процесс откачки для диаметра поршня 12мм и различном ходе поршня (Рисунок 4.16-Рисунок 4.20):



Рисунок 4.16. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня d=12мм, длины гильзы S=0,25м.



Рисунок 4.17. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня d=12мм, длины гильзы S=0,5м.



Рисунок 4.18. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня d=12мм, длины гильзы S=0,75м.



Рисунок 4.19. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня d=12мм, длины гильзы S=1м.



Рисунок 4.20. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня d=12мм, длины гильзы S=1,5м.

При изучении графиков наблюдается закономерность – при увеличении массы поршня производительность откачки увеличивается и предельное давление вакуума уменьшается. Причем после достижения определенной массы (2кг) эти изменения довольно малы (менее 1кПа на 1 кг). Следовательно, увеличение массы сверх этой величины не является рациональным. Будем считать массу поршня 2кг рациональной для диаметра 12мм, так как дальнейшее увеличение не сказывается на характеристиках. Аналогичное явление наблюдается и для других диаметров поршней.

Влияние массы на процесс откачки для диаметра поршня 16мм и различном ходе поршня (Рисунок 4.21-Рисунок 4.25):



Рисунок 4.21. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня d=16мм, длины гильзы S=0,25м.



Рисунок 4.22. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня d=16мм, длины гильзы S=0,5м.



Рисунок 4.23. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня d=16мм, длины гильзы S=0,75м.

1**к**г



Рисунок 4.24. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня d=16мм, длины гильзы S=1м.



Рисунок 4.25. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня d=16мм, длины гильзы S=1,5м.

Рациональная масса поршня с диаметром 16мм – 2,5кг.

Влияние массы на процесс откачки для диаметра поршня 20мм и различном ходе поршня (Рисунок 4.26-Рисунок 4.30):



Рисунок 4.26. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня d=20мм, длины гильзы S=0,25м.



Рисунок 4.27 Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня d=20мм, длины гильзы S=0,5м.



Рисунок 4.28. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня d=20мм, длины гильзы S=0,75м.



Рисунок 4.29. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня d=20мм, длины гильзы S=1м.



Рисунок 4.30. Изменение давления для поршня d=20мм, длины гильзы S=1,5м.

Таким образом, для поршня диаметром 20мм рациональная масса поршня 3,5кг.

Влияние массы на процесс откачки для диаметра поршня 25мм и различном ходе поршня (Рисунок 4.31-Рисунок 4.35):



Рисунок 4.31. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня d=25мм, длины гильзы S=0,25м.

4,5×



Рисунок 4.32. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня d=25мм, длины гильзы S=0,5м.



Рисунок 4.33. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня d=25мм, длины гильзы S=0,75м.



Рисунок 4.34. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня d=25мм, длины гильзы S=1м.



Рисунок 4.35. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня d=25мм, длины гильзы S=1,5м.

Получается, что для диаметра поршня 25м рациональная масса – 5кг.

Влияние массы на процесс откачки для диаметра поршня 32мм и различном ходе поршня (Рисунок 4.36-Рисунок 4.40):



Рисунок 4.36. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня d=32мм, длины гильзы S=0,25м.



Рисунок 4.37. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня d=32мм, длины гильзы S=0,5м.



Рисунок 4.38. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня d=32мм, длины гильзы S=0,75м.



Рисунок 4.39. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня d=32мм, длины гильзы S=1м.



Рисунок 4.40. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня d=32мм, длины гильзы S=1,5м.

Для поршня диаметром 32мм рациональная масса 8кг.

#### 6) Вывод формулы для вычисления массы поршня

В результате исследований вакуумного пневмонасоса были определены рациональные массы поршня, при которых обеспечивается наиболее эффективная работа вакуумного пневмонасоса. График зависимости массы от диаметра поршня представлена на Рисунок 4.41.

Полученную кривую можно описать зависимостью (4.1):

$$M_{\Pi 1} = \frac{(p_A - p_{\min})\frac{\pi d^2}{4} + b_{g.mp.}v_{cp}}{g}$$
(4.1)

где  $p_a$ - атмосферное давление, Па;  $p_{min}$ - требуемое предельное давление вакуума, Па; d – диаметр поршня, м;  $b_{\text{в.тр.}}$  – коэффициент вязкого трения, Н · с/м;  $v_{\text{ср}}$ – средняя скорость движение поршня, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.



Рисунок 4.41. Зависимость рациональной массы поршня от его диаметра.

Из графиков работы устройства при разных площадях и массах поршня видно, что давление, которое достигается системой, лежит в диапазоне 5000 – 15000 Па (кроме случаев, где длина гильзы 0,25м – эти случаи исключаются из рассмотрения). Возьмем 15000 Па универсально для всех случаев. Средняя скорость движения поршня составляла в модели 1 м/с. Результаты сравнения масс, полученных при расчете вакуумного пневмоприводного насоса и при вычислении по формуле приведены выше (Рисунок 4.42):



Рисунок 4.42. Сравнение массы поршня численного расчета и по формуле..

Таким образом, сравнив данные, полученные в результате теоретических исследований и данные из экспериментов, можно сказать, что формула достаточно точно описывает зависимость массы от диаметра поршня. Максимальная погрешность не превышает 1%.

#### 4.2.4 Исследование влияния диаметра поршня на характеристики насоса

Имея зависимости с различными массами, диаметрами поршней и длин гильз удобно построить характеристики с фиксированными массами поршней и длинами гильз, для выявления влияния диаметра поршня на процессы в насосе.

1) Влияние диаметра поршня на процесс при массе поршня М=3кг.



Рисунок 4.43. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня массой M=3кг, длиной гильзы S=0.25м.



Рисунок 4.44. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня массой M=3кг, длиной гильзы S=0.5м.



Рисунок 4.45. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня массой M=3кг, длиной гильзы S=0.75м.



Рисунок 4.46. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня массой M=3кг, длиной гильзы S=1м.



Рисунок 4.47. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня массой M=3кг, длиной гильзы S=1,5м.



# 2) Влияние диаметра поршня на процесс при массе поршня М=5кг.

Рисунок 4.48. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня массой M=5кг, длиной гильзы S=0.25м.



Рисунок 4.49. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня массой M=5кг, длиной гильзы S=0.5м.



Рисунок 4.50. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня массой M=5кг, длиной гильзы S=0.75м.



Рисунок 4.51. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня массой M=5кг, длиной гильзы S=1м.


Рисунок 4.52. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня массой M=5кг, длиной гильзы S=1.5м.

Вывод: как и подразумевалось, производительность растет с увеличением диаметра поршня, однако при массах поршня меньших, чем рациональные массы для определенных диаметров поршня, предельное давление вакуума увеличивается, что ухудшает характеристику.

#### 4.2.5 Исследование влияния хода поршня на характеристики насоса

Для выявления влияния хода поршня на работу устройства, построим характеристику с фиксированными диаметрами и массами поршней.



# 1) Влияние хода поршня на процесс при массе поршня М=3кг.

Рисунок 4.53. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня массой M=3кг и диаметром d=12мм.



Рисунок 4.54. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня массой M=3кг и диаметром d=16мм.



Рисунок 4.55. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня массой М=3кг и диаметром d=20мм.

2) Влияние диаметра поршня на процесс при массе поршня М=5кг.



Рисунок 4.56. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня массой M=5кг и диаметром d=12мм.



Рисунок 4.57. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня массой M=5кг и диаметром d=16мм.



Рисунок 4.58. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня массой M=5кг и диаметром d=20мм..



Рисунок 4.59. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня массой M=5кг и диаметром d=25мм.

3) Влияние диаметра поршня на процесс при массе поршня М=8кг.



Рисунок 4.60. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня массой М=8кг и диаметром d=25мм.



Рисунок 4.61. Изменение давления в вакуум-накопителе для поршня массой M=8кг и диаметром d=32мм.

Вывод: Увеличение длины гильзы приводит увеличению производительности насоса, однако для длин больше чем 0,5м прирост не существенен (менее 500Па за каждые 0,25м).

## 4.3 Результаты исследования четырехкамерного гравитационного пневмонасоса

Конструкция четырехкамерного гравитационного вакуумного насоса позволяет сосредоточить основную массу не в поршне, а в штоке. Наличие 4-х полостей позволяет осуществить работу в несколько этапов (см. глава 2): «низкого», «среднего» и «высокого» вакуума.

#### 4.3.1 Исследование работы насоса на «низком» вакууме

Одной из особенностей конструкции четырехкамерного вакуумного генератора является возможность изготовления поршня нижней гильзы иного диаметра, нежели верхний. При больших размерах поршня нижней гильзы (относительно верхней) эффективная площадь поршня в верхней полости нижней гильзы возрастет, что приведет к увеличению производительности насоса, но снизит предельную глубину вакуума.

Зависимость давления вакуума четырехкамерного гравитационного вакуумного насоса от диаметров поршней на этапе работы с «низким вакуумом» представлены ниже:



1) Влияние диаметра нижнего поршня при верхнем – 12мм (Рисунок 4.62):

Рисунок 4.62. Изменение давления в вакуум-накопителе для верхнего поршня диаметром d=12мм.

Rooma Ma

100000 110000 120000 130000 140000 150000 160000 170000 180000

190000 200000 210000

30000 40000 50000 60000 70000 80000 90000

20000



# 2) Влияние диаметра нижнего поршня при верхнем – 16мм (Рисунок 4.63):

Рисунок 4.63. Изменение давления в вакуум-накопителе для верхнего поршня диаметром d=16мм.

#### 25мм 32мм Зависимость давления вакуума от диаметра нижнего поршня S=1м; d=20мм; V=1л 40мм 105000-ĉ 55000· Чe, 45000-5000· 0-Время, мс

# 3) Влияние диаметра нижнего поршня при верхнем – 20мм (Рисунок 4.64)

Рисунок 4.64. Изменение давления в вакуум-накопителе для верхнего поршня диаметром d=20мм.



# 4) Влияние диаметра нижнего поршня при верхнем – 25мм (Рисунок 4.65)

Рисунок 4.65. Изменение давления в вакуум-накопителе для верхнего поршня диаметром d=25мм.



5) Влияние диаметра нижнего поршня при верхнем – 32мм (Рисунок 4.66)

Рисунок 4.66. Изменение давления в вакуум-накопителе для верхнего поршня диаметром d=32мм.

Из анализа графиков и сравнения их с графиками двухкамерного насоса видно, что производительность и предельное давление вакуума, как и ожидалось, заметно повысились. Причем чем больше диаметр нижнего поршня, тем эти показатели больше.

## 4.3.2 Исследование работы насоса на «среднем вакууме»

При движении поршней одинаковой массы вниз с разрежением газа только в верхней полости характеристики насосов двухкамерного и четырёхкамерного схожи (разница может быть связана с трениями поршней и газа в трубопроводах). В связи с этим все характеристики четырехкамерного насоса схожи с характеристиками на графиках двухкамерного (для диаметра верхнего поршня).

Серьезным отличием является только давление питания для нижних полостей при подъеме поршня из-за разницы площадей. Поэтому, чтобы гарантировать соответствие двух графиков найдем формулу пересчета магистральных давлений.

Расчетная схема двухкамерного насоса при подъеме поршня (Рисунок 4.67):



Рисунок 4.67. Расчётная схема двухкамерного вакуумного пневмонасоса.

Для двухкамерного насоса уравнение баланса сил на поршне (4.1):

$$M_{\Pi 1} \frac{d^2 x}{dt^2} = p_{\mu 1} F_{\mu 1} - p_{\alpha \kappa} F_{21} - F_{mp1} - M_{\Pi 1} g , \qquad (4.1)$$

где  $p_{\scriptscriptstyle {\it вак}}$  - давление верхней (вакуумной) полости.

Расчетная схема четырехкамерного насоса (Рисунок 4.68):



Рисунок 4.68. Расчетная схема четырехкамерного вакуумного пневмонасоса.

Для четырехкамерного насоса при подъеме поршня (4.2):

$$M_{\Pi 2} \frac{d^2 x}{dt^2} = p_{\mu 2} F_{\mu 2} - p_A F_{22} - p_A F_3 - p_{eak 2} F_4 - F_{mp1} - M_{\Pi 2} g , \quad (4.2)$$

Массы движущихся частей, силы трения и диаметры поршней верхней полости считаем одинаковыми.

Приравняем оба уравнения:

$$p_{\mu 1}F_{\mu 1} - p_{\theta a\kappa}F_{2} + p_{A}F_{3} - F_{mp} - M_{\Pi}g = p_{\mu 2}F_{\mu 2} - p_{A}(F_{2} - F_{1}) + p_{A}F - p_{\theta a\kappa}F_{2} - F_{mp} - M_{\Pi}g$$

$$(4.3)$$

После сокращения получим:

$$p_{H1}F_{H1} = p_{H2}F_{H2} - p_A(F_2 - F_1)$$
(4.4)

$$p_{\mu 2} = \frac{F_{\mu 1}}{F_{\mu 2}} (p_{\mu 1} - p_A) + p_A$$
(4.5)

Таким образом, магистральное давление для четырехкамерного вакуумного насоса вычисляется по следующей формуле:

$$p_{\mu 2} = \frac{d_{\mu 1}^2}{d_{\mu 2}^2} (p_{\mu 1} - p_A) + p_A$$
(4.6)

Ниже представлены графики зависимости давления магистрали от диаметра нижнего поршня для различных диаметров верхнего поршня (Рисунок 4.69).





Ниже представлены графики работы четырехкамерного гравитационного вакуумного насоса на этапе работы со «средним вакуумом» (Рисунок 4.70-Рисунок 4.73):



Рисунок 4.70. Изменение давления в вакуум-накопителе при d=12мм.



Рисунок 4.71. Изменение давления в вакуум-накопителе при d=16мм.









Рисунок 4.73. Изменение давления вакуума при d=25мм.

# 4.3.3 Исследование работы насоса на «высоком вакууме»

При работе насоса в этапе «высокого вакуума» сжатый воздух совершает работу при движении поршня вниз, создавая разрежения газа в верхней полости. Использование газа уменьшает значение роли массы движущихся частей. Вычислим оптимальные массы поршней для четырехкамерного вакуумного насоса на этапе работы с «высоким вакуумом». По аналогии преобразуем уравнения 4.1 и 4.2:

$$p_{A}F_{1} - p_{_{BAK}}F_{1} - M_{_{\Pi 1}}g = p_{A}F_{2} - p_{M}(F_{2} - F_{1}) - M_{_{\Pi 2}}g$$
(4.7)

После несложных преобразований получим формулу нахождения оптимальной массы поршней для четырехкамерного вакуумного насоса на этапе работы с «высоким вакуумом»:

$$M_{\Pi 2} = M_{\Pi 1} - (F_2 - F_1)(p_M - p_A)$$
(4.8)

Результат вычислений графически представлен ниже (Рисунок 4.74):



### Рисунок 4.74. Рациональные массы в 4-хкамерном гравитационном насосе.

Из графика видно, что всех стандартных диаметров нижних поршней, при условии, что они больше, чем верхние, значения масс отрицательны. Это означает, что насос с любой массой движущихся частей при давлении питания, описанном выше, будет успешно работать в режиме «высокого вакуума». Ниже представлены графики работы четырехкамерного гравитационного вакуумного насоса на этапе работы с «высоким вакуумом» при различных диаметрах нижнего поршня (Рисунок 4.75-Рисунок 4.78):



Рисунок 4.75. Изменение давления в вакуум-накопителе при диаметре верхнего поршня d=12мм.



Рисунок 4.76. Изменение давления в вакуум-накопителе при диаметре верхнего поршня d=16мм.



Рисунок 4.77. Изменение давления в вакуум-накопителе при диаметре верхнего поршня d=20мм.

Время, мо



Рисунок 4.78. Изменение давления в вакуум-накопителе при диаметре верхнего поршня d=25мм.

4.3.4 Пример заполнения интерфейса и вид характеристик

В качестве примера взят привод со следующей геометрией: диаметр верхнего поршня d<sub>п1</sub>=20мм, нижнего - d<sub>п2</sub>=25мм, штока - d<sub>п2</sub>=18мм, диаметры нижней и

25мм

32мм

верхней демпфирующих втулок d<sub>вт1</sub>=10мм, d<sub>вт2</sub>=20мм, длина гильзы 1м, объем ресивера 1л, масса движущихся частей М=3,5кг. Границы нижнего и верхнего торможения установлены на значениях 0.09м и 0.96м. Давление в магистрали P<sub>м</sub>=1.9бар.

Значения, заданные ниже (Таблица 2-Таблица 4), обеспечивают описанный во второй главе режим работы.

	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>
Вверх 0-0,92м	190000	101325	101325	101325	0
Вверх 0,92-1м	190000	101325	101325	101325	0
Вниз 0,08-1м	101325	190000	101325	-5	-4
Вниз 0-0,08м	101325	190000	101325	-5	-4

Таблица 3. Диаметры трубопроводов полостей.

	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	<b>d</b> <sub>4</sub>	d <sub>5</sub>
Вверх 0-0,92м	8	8	8	-8	0
Вверх 0,92-1м	8	8	8	-8	0
Вниз 0,08-1м	8	8	8	-8	-8
Вниз 0-0,08м	8	8	8	-8	-8

Таблица 4. Сопротивления трубопроводов полостей.

	$\zeta_1$	ζ2	ζ3	ζ4	ζ5
Вверх 0-0,92м	15	15	15	-30	0
Вверх 0,92-1м	15	15	15	-30	0
Вниз 0,08-1м	15	15	15	30	-30
Вниз 0-0,08м	15	15	15	30	-30

Давление в нижней полости нижней гильзы:



Рисунок 4.79. График изменения давления нижней полости нижней гильзы.



Рисунок 4.80. График изменения давления верхней полости нижней гильзы.



Рисунок 4.81. График изменения давления нижней полости верхней гильзы.



Рисунок 4.82. График изменения давления верхней полости верхней гильзы.









Перемещение



Рисунок 4.85. График скорости поршня.

В полостях нижней гильзы отчетливо видны пики давления при торможении демпферами, которые необходимы для переключения распределителей. Давление в нижней полости верхней гильзы близко к атмосферному. Верхняя полость верхней гильзы откачивает газ из вакуум-накопителя. Поршень движется согласно описанному алгоритму со средними скоростями 1м/с.

# 4.4 Результаты исследования четырехкамерного вакуумного пневмонасоса

В четырехкамерном вакуумном пневмонасосе полезная работа осуществляется сжатым газом. Все ниже приведенных характеристики будут построены для рациональных масс.

#### 4.4.1 Исследование влияния диаметра поршня на характеристики насоса

1) Насос с подключением вакуума к центральным полостям

Ниже показана зависимость давления вакуума от диаметра поршня при подключении линий вакуума к центральным полостям (Рисунок 4.86). Диаметры штоков подбирались согласно стандартизации для производителей пневмоцилиндров.



Рисунок 4.86. Давление в вакуум-накопителе при подключении к центральным полостям.

## 2) Насос с подключением к боковым полостям

Ниже показана зависимость давления вакуума от диаметра поршня при подключении линий вакуума к боковым полостям (Рисунок 4.87).



# Рисунок 4.87. Давление вакуума при подключении к боковым полостям.

Из графиков следует, что производительность насоса растет с увеличением площади поршня. Также при увеличении площади незначительно увеличивается глубина вакуума, это связано с тем, что при увеличении площади поршня тормозной путь при приближении к крышкам уменьшается и влияние мертвого объема сокращается.

# 4.4.2 Исследование влияния длины гильзы на характеристики насоса

## 1) Насос с подключением вакуума к центральным полостям

Ниже показана зависимость давления вакуума от длины гильзы при подключении линий вакуума к центральным полостям (Рисунок 4.88).





Ниже показана зависимость давления вакуума от длины гильзы при подключении линий вакуума к боковым полостям (Рисунок 4.89).



Рисунок 4.89. Давление вакуума при подключении к боковым полостям.

Исходя из графиков видно, что при коротких длинах гильз (до 0,5м) максимальное давление вакуума слишком высокое. При дальнейшем увеличении длины характеристики меняются незначительно, поэтому оптимально выбирать длины 0,5-0,75м.

Кроме того, характеристики насоса с подсоединением к центральным полостям и боковым схожи, поэтому с точки зрения газовых процессов не имеет значения как подсоединять линии вакуум-накопителя.

# 4.4.3 Пример заполнения интерфейса и вид характеристик

В качестве примера взят привод со следующей геометрией: диаметр поршня d<sub>п</sub>=20мм, штока – d<sub>ш</sub>=10мм, диаметры нижней и верхней демпфирующих втулок d<sub>вт1,2</sub>=10мм, длина гильзы 1м, объем ресивера 1л, масса движущихся частей М=1кг. Границы нижнего и верхнего торможения установлены на значениях 0.6м и 0.94м. Давление в магистрали Р<sub>м</sub>=1.9бар.

Значения, заданные ниже (Таблица 5-Таблица 7), обеспечивают заданный режим работы.

	$P_1$	$P_2$	<b>P</b> <sub>3</sub>	$\mathbf{P}_4$	P <sub>5</sub>
Вверх 0-0,92м	190000	101325	101325	101325	0
Вверх 0,92-1м	190000	101325	101325	101325	0
Вниз 0,08-1м	101325	190000	101325	-5	-4
Вниз 0-0,08м	101325	190000	101325	-5	-4

Таблица 5. Внешние давления в полостях.

	$d_1$	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	$d_4$	<b>d</b> <sub>5</sub>
Вверх 0-0,92м	8	8	8	-8	0
Вверх 0,92-1м	8	8	8	-8	0
Вниз 0,08-1м	8	8	8	-8	-8
Вниз 0-0,08м	8	8	8	-8	-8

Таблица 6. Диаметры трубопроводов полостей.

Таблица 7. Сопротивления трубопроводов полостей.

	$\zeta_1$	ζ2	ζ3	ζ4	ζ5
Вверх 0-0,92м	15	15	15	-30	0
Вверх 0,92-1м	15	15	15	-30	0
Вниз 0,08-1м	15	15	15	30	-30
Вниз 0-0,08м	15	15	15	30	-30

Давление в нижней полости нижней гильзы:



Рисунок 4.90. График изменения давления нижней полости нижней гильзы.



Рисунок 4.91. График изменения давления верхней полости нижней гильзы.



Рисунок 4.92. График изменения давления нижней полости верхней гильзы.



Рисунок 4.93. График изменения давления верхней полости верхней гильзы.



Рисунок 4.94. График изменения давления в вакуум-накопителе.









Рисунок 4.96. График скорости поршня.

#### 4.5 Выводы

В результате проведенных исследований получены характеристики, позволяющие сделать следующие выводы:

1) Определены минимальные значения массы для гравитационного вакуумного пневмонасоса. Масса поршня не должна быть меньше величины, получаемой по формуле (4.1), так как устройство не будет достигать достаточных глубин вакуума. Выбор массы поршня больше полученной величины приводит к незначительному увеличению глубины вакуума (не более чем 1-2кПа), но увеличивает массы устройства;

2) Получено, что увеличение длины хода поршня приводит к незначительному увеличению производительности и глубины вакуума (не более 5%). При уменьшении длины хода более чем 0,5м резко снижается производительность и предельное значение вакуума насоса.

 Исследования четырехкамерного дифференциального насоса показали, что производительность и глубина вакуума одинаковы при подключении линий вакуум-накопителя к боковым или к центральным полостям;

4) В четырехкамерном гравитационном вакуумном насосе имеется возможность разбить работу устройства на 3 этапа. Этап работы на «низком вакууме» позволяет повысить производительность, но при этом снизить предельную глубину вакуума. Этап «среднего вакуума» в тех же рамках, в которых приводились эксперименты, является самодостаточным – позволяя с достаточной производительностью добиваться глубин вакуума 3-15кПа, но при этом имея повышенный вес и длину. Этап «высокого вакуума», позволяет достичь высокой производительности и глубины вакуума при малых размерах и массы установки, но при этом потребляя дополнительную энергию сжатого воздуха.

#### Глава 5. Экспериментальное исследование вакуумного пневмонасоса

В настоящем разделе приведены результаты исследования пневмоприводного вакуумного насоса.

Целью проведенных исследований являлась проверка адекватности теоретических зависимостей и выводов, полученных в работе, результатам экспериментальных исследований.

Для проведения экспериментальных исследований были собраны две экспериментальных установки:

- Экспериментальная установка для исследований двухкамерного пневмоприводного насоса;
- Экспериментальная установка для исследований четырехкамерного пневмоприводного насоса.

## 5.1 Описание экспериментальной установки двухкамерного пневмонасоса

Для проведения исследований двухкамерного пневмоприводного вакуумного наоса была разработана принципиальная пневматическая схема (Рисунок 5.1).

В качестве свободнопоршневого насоса использован бесштоковый пневмоцилиндр с длиной хода 450мм и диаметром поршня 25мм. Для исследований пневмонасоса использовалась дополнительная масса 3 кг, которая крепилась к каретке поршня.

Вид стенда для испытаний двухкамерного пневмоприводного вакуумного насоса представлен ниже (Рисунок 5.2).



Рисунок 5.1. Пневматическая схема двухкамерного вакуум генератора.



Рисунок 5.2. Экспериментальная установка двухкамерного вакуумного пневмонасоса.

177

Исследования состояли из трех опытов:

- Исследование пневмонасоса при движении поршня сжатым газом из крайнего нижнего положения вверх с последующим торможением путем перекрытия выхлопной полости около верхней крышки;
- Исследование пневмонасоса при движении поршня из крайнего верхнего положения вниз под действием силы тяжести с последующим торможением путем перекрытия выхлопной полости около нижней крышки;
- Исследование пневмонасоса при движении поршня из крайнего верхнего положения вниз под действием силы тяжести с последующим реверсом путем подачи в выхлопную полость магистрального давления около нижней крышки.

Работа экспериментальной установки происходит следующим образом.

<u>Опыт 1.</u> Поршень находится у нижней крышки. Сигнал управления от оператора через контроллер поступает на катушку распределителя Р.1 и он переключается. Сжатый воздух через распределитель Р.1 поступает в линию управления распределителя с пневматическим управлением РП.1 и он тоже переключается. Сжатый воздух через распределитель РП.1 начинает заполнять нижнюю полость пневмоцилиндра. Верхняя полость связана через распределитель РП.2 с атмосферой. На поршне создается перепад давлений и он начинает движение вверх.

После преодоления граничной координаты (x<sub>гр</sub> –задается оператором) срабатывает распределитель Р.2, который переключает распределитель РП.2. Так как дроссель с обратным клапаном полностью перекрыт, то газ не может выйти из выхлопной полости, давление в ней возрастает и поршень тормозится.

Опыт 2. Перед экспериментом линии меняются местами с полостями (относительно того, что изображено на схеме). Поршень вручную поднимается вверх. Верхняя и нижняя полости связаны с атмосферой через распределители РП.1 и РП.2. После отпускания поршня он движется под действием силы тяжести вниз. После преодоления граничной координаты (х<sub>гр</sub> –задается оператором) срабатывает распределитель Р.2, который переключает распределитель РП.2. Так как дроссель с обратным клапаном полностью перекрыт, то газ не может выйти из выхлопной полости, давление в ней возрастает и поршень тормозится.

Опыт 3. Поршень вручную поднимается вверх. Верхняя и нижняя полости связаны с атмосферой через распределители РП.1 и РП.2. После отпускания поршня он движется под действием силы тяжести вниз. После преодоления граничной координаты (х<sub>гр</sub> –задается оператором) срабатывает распределитель Р.1, который переключает распределитель РП.1. Газ с магистральным давлением поступает в нижнюю полость через распределитель РП.1 и поршень реверсируется.

# 5.2 Экспериментальное исследование двухкамерного пневмонасоса

 Исследование движения поршня сжатым газом из крайнего нижнего положения вверх с последующим торможением путем перекрытия выхлопной полости около верхней крышки.

Ниже приведены графики изменения перемещения поршня (Рисунок 5.3) и давлений в полостях двухкамерного гравитационного пневмоприводного насоса (Рисунок 5.4-Рисунок 5.5) при подъеме поршня и торможении перекрытием полости.



Рисунок 5.3. График перемещения поршня при движении поршня сжатым воздухом вверх и перекрытии полости.



Рисунок 5.4. График давления магистральной полости при движении поршня сжатым воздухом вверх и перекрытии полости.

180


Рисунок 5.5. График давления выхлопной полости при движении поршня сжатым воздухом вверх и перекрытии полости.

В начальный момент времени давление в нижней магистральной полости растет (подготовительный период). После достижения давления страгивания, поршень начинает движение и давление в магистральной полости снижается. По мере движение поршня давление в выхлопной линии близко к атмосферному.

После преодоления граничной координаты положения поршня (заданной оператором) выхлопная полость перекрывается, давление в ней резко возрастает, сравнивается с давлением магистральной полости, и поршень останавливается.

Результаты теоретических и экспериментальных данных по перемещению поршня и давлению в магистральной полости совпадают с точностью в 3% и 5% соответственно. Расхождение данных выхлопной полости составляют 11%. Это связано с тем, что измерения датчиком давления проводились не внутри полости, а в линии у полости (иная установка датчика не возможна). В результате перед датчиком появилась подсистема с емкостями и сопротивлениями, которые осуществляли «фильтр» скачков давления в системе.

 Исследование движения поршня из крайнего верхнего положения вниз под действием силы тяжести с последующим торможением путем перекрытия выхлопной полости около нижней крышки.



Рисунок 5.6. График перемещения поршня при движении под собственным весом и перекрытии полости у нижней крышки.



Рисунок 5.7. График давления выхлопной полости при движении поршня под собственным весом и перекрытии полости у нижней крышки.

В начальный момент времени поршень находится вверху. Давление в полостях атмосферное. После отпускания поршня, он движется вниз под действием силы тяжести. Давление в выхлопной полости, из-за низкого сопротивления в линии выхлопа, близко к атмосферному.

После преодоления граничной координаты положения поршня (заданной оператором) выхлопная полость перекрывается, давление в ней резко возрастает, поршень тормозится и останавливается.

Расхождение теоретических и экспериментальных данных для движения поршня составляет 5%, для давления выхлопной полости – 13%. Причина неточности в выхлопной полости также связана с тем, что измерения датчиком давления проводились не внутри полости, а в линии у полости.

 Исследование движения поршня из крайнего верхнего положения вниз под действием силы тяжести с последующим реверсом путем подачи в выхлопную полость магистрального давления около нижней крышки.



Рисунок 5.8. График перемещения поршня при движении поршня вниз под собственным весом и торможением противодавлением у нижней крышки.



Рисунок 5.9.График давления выхлопной полости при движении поршня вниз под собственным весом и торможением противодавлением у нижней крышки.

В начальный момент поршень находится в крайнем верхнем положении. После отпускания поршня он движется вниз под действие силы тяжести. Давление в выхлопной полости, из-за низкого сопротивления в линии выхлопа, близко к атмосферному.

После преодоления граничной координаты положения поршня (заданной оператором) в выхлопную полость подается магистральное давление, на поршне создается перепад давлений, и он реверсируется. После реверса поршень поднимается вверх и выходит за пределы граничной координаты в результате чего обе полости вновь оказываются связанными с атмосферой и поршень под действием силы тяжести движется вниз. Затем поршень вновь преодолевает граничную координату и начинает реверсироваться противодавлением. В результате получаются колебания около точки граничной координаты положения, что и видно на графике.

Расхождение теоретических и экспериментальных данных для движения поршня составляет 2%, для давления выхлопной полости – 7%. Причина неточности в выхлопной полости также связана с тем, что измерения датчиком давления проводились не внутри полости, а в линии у полости.

### 5.3 Описание экспериментальной установки четырехкамерного пневмонасоса

Для проведения исследований четырехкамерного пневмоприводного вакуумного наоса была разработана принципиальная пневматическая схема (Рисунок 5.10).



Рисунок 5.10. Пневматическая схема четырехкамерного насоса.

В качестве четырехкамерного вакуумного пневмоприводного насоса использовались два пневмоцилиндра двухстороннего действия с соединенными штоками. Диаметр поршней пневмоцилиндров 20мм, ход – 100мм. Для исследований пневмонасоса использовалась дополнительная масса 1,5кг, которая крепилась к штокам.

Вакуум в установке определялся косвенным методом с помощью пневмоцилиндра (диаметр поршня 50мм, штока – 16мм, ход 50мм) и нагрузки до 10кг. Вид стенда для испытаний двухкамерного пневмоприводного вакуумного насоса представлен ниже (Рисунок 5.11).



Рисунок 5.11. Экспериментальная установка четырехкамерного генератора вакуума.

Эксперимент проводился для «этапа высокого вакуума», когда движение поршня в обе стороны осуществлялось за счет сжатого воздуха.

В начальный момент поршень находился в нижнем крайнем положении. После включения программы оператором, через контроллер сигнал поступит на распределитель P.2 и он переключался. Газ с магистральным давлением поступает в нижнюю полость нижней гильзы. Верхняя полость нижней гильзы через распределитель P.1 связана с атмосферой. Нижняя полость верхней гильзы всегда связана с атмосферой. Верхняя полость верхней гильзы связана с атмосферой через обратный клапан. В системе двух поршней создается перепад давлений и поршень движется вверх.

После преодоления верхней граничной координаты (задается оператором) срабатывает распределитель Р.1, а распределитель Р.2 отключается. Таким образом верхняя полость нижней гильзы становится магистральной, а нижняя выхлопной. Поршень движется вниз, по мере движения создается разрежение в верхней полости верхней гильзы и газ из верхней полости пневмоцилиндра под нагрузкой поступает в неё.

После преодоления верхней граничной координаты (задается оператором) срабатывает распределитель Р.2, а распределитель Р.1 отключается и цикл повторяется заново.

Для получения значений давления используется датчик давления, который можно подключить к любой пневмолинии. Для снятий значений перемещения – датчик перемещения. Сигналы с датчиков поступают на аналоговые входы контроллера.

Измерение вакуума в эксперименте производится косвенным методом. По мере выкачивания газа из верхней полости пневмоцилиндра под нагрузкой возрастает перепад давлений на поршне. В итоге в системе наступит момент, в который перепад давлений превысит силу тяжести груза (95H) и трения и поршень сдвинется. Момент движения поршня можно зафиксировать и рассчитать давление вакуума из уравнения баланса сил.

# 5.4 Экспериментальное исследование четырехкамерного пневмонасоса

Ниже приведены графики изменения перемещения поршня (Рисунок 5.12) и давления в нижней полости нижней гильзы (Рисунок 5.13) при работе четырехкамерного гравитационного пневмоприводного насоса.



Рисунок 5.12. График перемещения поршня в четырехкамерном насосе.



Рисунок 5.13. График давления нижней полости нижней гильзы четырехкамерного насоса.

На графике перемещения поршня видно, что он осуществляет возвратно поступательные движения. Расхождение значений эксперимента и теоретических данных лежит в пределах 7%. На графике изменения давления в нижней полости нижней гильзы в момент переключения распределителя, когда поршень находится у нижней крышки давление резко возрастает. Затем, после реверса поршня и его движения верх давление снижается. При подходе к верхней крышке распределитель переключается и связывается нижнюю полость с атмосферой, из-за чего давление в ней падает до атмосферного.

Давление в вакуумной полости измерялось косвенным методом. Нагрузка на пневмоцилиндр (с параметрами: диаметр поршня 50мм, штока – 16мм, ход 50мм) составила 9,5кг. После 6сек работы устройства поршень приходил в движение. Это означает, что баланс сил нарушился:

$$p_{a} \cdot F_{1} - p_{_{BAK}} \cdot F_{2} - p_{a} \cdot (F_{1} - F_{2}) - F_{_{mp}} - mg = 0$$

При подстановке значений в уравнение получается, что *p*<sub>вак</sub>=47642Па, что соответствует графику ниже (Рисунок 5.14):



Рисунок 5.14. Изменение давления в вакуум-накопителе.

# 5.5 Основная элементная база схем

Для построения экспериментальной установки использовалась следующая пневмоаппаратура:

- 1) Бесштоковый пневмоцилиндр (диаметр поршня 25мм, длина хода 450мм);
- Четырехкамерный пневмоцилиндр (2 цилиндра с диаметрами поршня 20мм, штока – 8мм, длина хода 200мм);
- 3) Компрессор (максимальное давление 6бар и расход 1000л/мин);
- 4) Распределители (нормальный расход 500л/мин);
- 5) Дроссель с обратным клапаном (нормальный расход 0,1-100л/мин)
- 6) Датчик давления SDE1-D10.

Измеряемый диапазон 0...10 бар (относительные). Точность 2% от диапазона.

Пьезорезисторный тип измерения.

- 7) Датчик перемещения MLO-POT-450-TLF.
  - Диапазон измерения 450 мм;
  - Принцип измерения: Аналоговый датчик перемещения, абсолютное измерение;
  - Разрешение 0,01мм;
  - Макс. скорость перемещения 10м/с;
  - Максимальное ускорение  $-200 \text{ м/c}^2$ .
- 8) Контроллер Easyport с блоками входов/выходов
  - Связь ПК со стендом;
  - Работа с дискретными сигналами (8 вх., 8вых.);
  - Работы с аналоговыми сигналами (4 вх. 2 вых.).

#### 5.6 Выводы

1. Спроектирована принципиальная пневматическая схема для экспериментального исследования двухкамерного пневмоприводного вакуумного насоса.

2. Получено экспериментальное подтверждение расчетных данных для двухкамерного пневмоприводного вакуумного насоса. Для графиков перемещения и давлений магистральных полостей расхождение теоретических и экспериментальных данных лежат в пределах 5%. Для выхлопных полостей, где давление менялось скачкообразно, погрешности составляли 13%. Это было связано с тем, что расчет производился для давлений внутри полости, а измерение проводилось датчиком давления на выхлопной линии. Влияние линии приводило к разнице данных, поэтому значения экспериментальных данных можно считать наиболее объективно отражающими давление в полости, чем в эксперименте.

3. Спроектирована принципиальная пневматическая схема для экспериментального исследования четырехкамерного пневмоприводного вакуумного насоса.

4. Получено экспериментальное подтверждение расчетных данных для четырехкамерного пневмоприводного вакуумного насоса. Для графиков перемещения и давлений магистральных полостей расхождение теоретических и экспериментальных данных лежат в пределах 7%. Это также связано с расположение датчика давления в выхлопной линии, а не в полости.

#### 191

# Заключение

- Предложен принцип построения пневмоприводного вакуумного насоса для экстремальных условий эксплуатации, суть которого заключается в том, что исполнительный орган пневмопривода (поршень) является одновременно исполнительным органом поршневого вакуумного насоса.
- Разработаны конструкции свободнопоршневых устройств, объединяющих в одном пневмоцилиндре функции пневмопривода и вакуум-генератора, исключив тем самым передаточные звенья от привода к насосу. В конструкциях отсутствуют внешние подвижные части, что делает их применение в экстремальных условиях наиболее эффективными и безопасными;
  - Предложен принцип управления вакуумным пневмоприводным насосом и принципиальные пневматические схемы, обеспечивающие непрерывную работу насоса в режиме автоколебаний без использования контрольной аппаратуры за счет введения дополнительных управляющих линий;
  - 4. Разработана универсальная математическая модель пневмоприводного вакуумного насоса на основе предложенного метода блочного математического моделирования, которая автоматически учитывает все возможные режимы течения газа и движения исполнительного органа, работу направляющей аппаратуры и пневмодемпферов. Полученная математическая модель может быть использована также для расчета и других пневматических устройства на основе пневмоцилиндров;
  - Разработана универсальная программа и интерфейс на базе программной оболочки LabVIEW, позволяющие выполнять как теоретические исследования динамики пневмоприводного вакуумного насоса, так и управление экспериментальной установкой в реальном времени;
  - На основе проведенных численных и экспериментальных исследований получены рекомендации по выбору основных конструктивных параметров пневмоприводного вакуумного насоса.

- Сформирована методика выбора основных параметров вакуумного пневмонасоса;
- Разработаны экспериментальные установки для исследования двух и четырехкамерного вакуумного насоса. Получено качественное и количественное подтверждение основных результатов теоретических исследований.
- Разработанная конструкция 4-х камерного гравитационного пневмоприводного вакуумного насоса может быть реализована с помощью стандартных пневмоцилиндров и аппаратуры.

#### Список литературы

- Антонов В. Н., Терехов В. А., Тюкин И. Ю. Адаптивное управление в технических системах: Учеб. пособие. СПб.: Издательство С.-Петербургского университета, 2001. 355с.
- Араманович И. Г., Левин В. И. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1969. - 288 с.
- Бабин А. И., Санников С. П. Автоматизация технологических процессов.
  Элемменты и устройства пневмогидроавтоматики. (Учебное пособие). Екатеринбург. Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2002. – 123с.
- Баранов В. Н., Захаров Ю. Е. О вынужденных колебаниях гидравлического поршневого исполнительного механизма без обратной связи. В книге Гидроавтоматика. - М., «Наука». 1965, с. 124-135.
- 5. Баранов В. Н., Захаров Ю. Е. Электрогидравлические и гидравлические вибрационные механизмы. М., изд-во «Машиностроение», 1977, 163с.
- 6. Башта Т. М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для машиностроительных вузов. - М., Машиностроение, 1982, - 385с.
- 7. Бежанов Б. Н. Пневматические системы автоматизации технологических процессов. М.-Л., Машгиз, 1963, 245с.
- Богачева А. В. Пневматические элементы систем автоматического управления. – М., изд-во «Машиностроение», 1966, - 138с.
- Богословский С. В. Физические свойства газов и жидкостей: Учебное пособие. - СПб., СПбГУАП, 2001, - 110с.
- 10. Бурмистров А. В., Саликеев С.И. Бесконтактные вакуумные насосы. Учебное пособие. Казань, КГТУ, 2010, 251с.
- 11.Браун Ф. Переходные процессы в линиях передачи жидкости или газа //Техническая механика, т. 84, серия Д. - № 4. 1962. - С.163-171.
- 12.Вайсер И. В. Анализ возможности работы приборов пневмоавтоматики на низком давлении //Вопросы пневмо- и гидроавтоматики. - М.: Изд-во АН СССР, 1960. – С. 65-72.

- 13.Власов В. В. К вопросу о расчете поршневого пневматического привода. Вопросы механизации горных работ. Труды института горного дела. Вып.6. АН СССР, Сибирское отделение, 1961, - 130с.
- 14.Вулис Л. А. Термодинамика газовых потоков. М.-Л., Госэнергоиздат, 1950, 53с.
- 15. Герц Е. В., Крейнин Г.В. Динамика пневматических приводов машин-автоматов. - М., изд-во «Машиностроение», 1964, - 54с.
- 16. Герц Е. В., Кудрявцев А. И, Ложкин О. В. Пневматические устройства в машиностроении: справочник, - М., Машиностроение. 1981, - 167с.
- 17. Герц Е. В., Крейнин Г. В. Расчет пневмоприводов. М., изд-во «Машиностроение». 1975, - 142с.
- 18. Гинзрбург И. П. Прикладная газодинамика. Л., ЛГУ им. А. А. Жданова, 1958.
- 19. Гогричиани Г. В., Шипилин А. В. Переходные процессы в пневматических системах. - М.: Машиностроение, 1986, - 160 с.
- 20. Данилин С. Б. Вакуум и его применение. М., Всесоюзное учебно-педагогическое издательство трудрезевиздат. 1958, - 264 с.
- 21. Дмитриев В. Н., Градецкий В. Г. Основы пневмоавтоматики. М.: Машиностроение, 1973. - 360 с.
- 22. Дмитриев В. Н. Элементы пневматических устройств. Приборостроение и средства автоматики. Т.2. Кн. 1. М., изд-во «Машиностроение», 1964.
- 23. Донской А.С. Обобщенные математические модели элементов пневмосистем.
   СПб.: СПГУТД, 1998. 215 с.
- 24. Донской А.С. Математическое моделирование процессов в пневматических приводах. Учебное пособие. СПб, СПГПУ. 2009. –116с.
- 25.Донской А. С., Климов В. А. Аналитический метод расчета волновых процессов в пневматических объектах. // Технология текстильной промышленности. Изв. вузов. - 1997. - № 2. - С.93-95.
- 26.Донской А. С. Моделирование колебаний давления в пневматических объектах с помощью обыкновенных дифференциальных уравнений. // Технология текстильной промышленности. Изв. вузов. - 1997. - № 4. - С.94-97.

- 27.Донской А. С., Климов В. А. Моделирование процессов в элементах пневмосистем с учетом ударных волн давления. // Технология текстильной промышленности. Изв. вузов. – 1997. - №5. – С.80-82.
- 28.Донской А. С., Коренев В. П., Носков Е. И. Универсальное пневматическое захватите устройство // Гидравлические машины, гидроприводной и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития. – С.178-179. 2012г.
- 29.Зайченко И. З. и Мышлевский Л. М., Пластинчатые насосы и гидромоторы.-«Машиностроение», 1970, - 115с.
- 30. Иванов В. И. Безмаслянные вакуумные насосы. Л., М. изд-во «Машиностроение», 1980, - 221с.
- 31.Иванов К. Ф., Сурков С. В. Механика жидкости и газа. Конспект лекций для студентов механических и энергетических специальностей. Часть 1. - Одесса, ОГПУ, 1995, - 147с.
- 32.Казинер Ю. Я., Слободкин М. С. Пневматические исполнительные устройства в системах автоматического управления. - М., Энергия. 1972, - 214с.
- 33.Коган М. Н. Динамика разреженного газа. Кинетическая теория. М., Издательство «Наука». 1967, - 142с.
- 34.Королев Б. И. Основы вакуумной техники. М-Л., Государственное энергетическое издательство. 1957, - 187с.
- 35.Королев В. А. Пневматические приводы роботов: Учебное пособие. Л.: ЛПИ им.М.И.Калинина, 1986, - 172с.
- 36.Котельников Ю. Н. Автоматизация вакуумно-технологических процессов. -М., «Машиностроение», 1977, - 217с.
- 37.Крейнин Г. В., Кривц И. Л., Винницкий Е. Я., Ивлев В. И. Гидравлические и пневматические приводы промышленных роботов и автоматических манипуляторов. - М., Машиностроение. 1993, - 77с.
- 38.Кузнецов В. И., Немилов. Н. Ф., Шемякин В. Е. Эксплуатация вакуумного оборудования. - М.: Энергия. 1978, - 111с.
- 39. Левин Г. Основы вакуумной техники, пер. с англ., М., «Энергия». 1969, -87с.

- 40. Лубенец В. Д., Васильев В. И., Автономова И. В. Механические вакуумные насосы. М., изд-во «Машиностроение». 1980, 92с.
- 41. Нагорный В. С., Денисов А. А., Устройства автоматики гидро- и пневмосистем: Учебное пособие техн. вузов. - М.: Высшая школа. 1991, - 154с.
- 42.Наземцев А. С. Гидравлические и пневматические системы. Часть 1. М., ΦΟ-РУМ. 2004, - 87с.
- 43.Наземцев А. С. Гидравлические и пневматические системы. Часть 2. Гидравлические приводы и системы. Основы. Учебное пособие. М., ФОРУМ. 2007, 93с.
- 44. Носков Е. И., Донской А. С., Скляревский А.Н. Блочное математическое моделирование пневмопривода // Известия самарского научного центра российской академии наук. - 2014. С. 484-489.
- 45. Носков Е. И., Донской А. С. Конструкция свободнопоршневого пневматического вакуумного насоса // Известия самарского научного центра российской академии наук. - 2015. – С.859-862.
- 46.Носков Е. И., Донской А. С. Модернизация пневматического захватного устройства // Материалы научно-практической конференции с международным участием. – 2012. – С.36-37.
- 47.Носков Е. И., Донской А. С. Однопоршневой вакуум-генератор с пневмоприводом // Гидравлические машины, гидроприводной и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития. – 2014. - С. 233-235.
- 48.Носков Е. И., Донской А. С. Получение вакуума с использованием эффекта параметрического резонанса //Известия самарского научного центра российской академии наук. – 2013. - С. 564-567.
- 49.Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенчко Е. А. Конструирование и расчет вакуумных систем. - М.: Энергия. 1979, - 87с.
- 50.Плисковский В. Я. Конструкционные материалы и элементы вакуумных систем. - М., «Машиностроение». 1976, - 167с.
- 51.Погорелов В. И. Газодинамические расчеты пневматических приводов. Л.: Машиностроение, 1971. - 182 с.

- 52.Попов Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. Учебник для машиностроительных вузов. М., «Машиностроение», 1976, 133с.
- 53. Розанов Л. Н. Вакуумная техника. М., изд-во «Высшая школа», 1990, 134с.
- 54. Розанов Л. Н. Вакуумные машины и установки. Л., изд-во «Машиностроение». 1975, - 124с.
- 55.Рыбкин Е. А., Усов А. А. Шестеренные насосы для металлорежущих станков. - М., Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы. 1960, - 167с.
- 56. Страхович К. И. Прикладная газодинамика. М-Л., ОНТИ, 1937, 141с.
- 57. Страхович К. И, Френкель М. И., Кондриков И. К., и Рис В. Ф. Компрессорные машины. М., Госторгиздат, 1961, 97с.
- 58.Суранов А. Я. LabVIEW 8.20: Справочник по функциям. М.: ДМК Пресс, 2007, 167с.
- 59. Схиртладзе А. Г. Гидравлические и пневматические системы: Учеб. для сред. проф. учеб. заведений. М.: Высшая школа. 2006, 178с.
- 60. Успенский В. А., Кузнецов Ю. М. Струйные вакуумные насосы. М.: Машиностроение. 1973, - 109с.
- 61. Филиппов И. Б. Тормозные устройства пневмоприводов. М.: Машиностроение, 1987. - 144 с.
- 62. Федорец В. А., Педченко М.Н., Кухарец А.В. Расчет пневматических и пневмогидравлических цикловых систем. - К.: Техника, 1981. –184 с.
- 63. Фролов Е. С. Вакуумные системы и их элементы. М.: «Машиностроение», 1968, 151с.
- 64. Фролов Е. С., Автономова И. В., Васильев В. И. Механические вакуумные насосы. М., «Машиностроение». 1989, 124с.
- 65. Фролов Е. С., Минайчев В. Е., Александрова А. Т. Вакуумная техника: Справочник. - М.: Машиностроение. 1992, - 134с.
- 66. Хамеев В. М. Термодинамические процессы и параметрические характеристики вакуумных насосов. - Новосибирск: Наука. 1986, - 97с.

67. Цейтлин А. Б. Пароструйные вакуумные насосы. - М-Л., Энергия. 1965, - 67с.

- 68.Шандров Б. В. Технические средства автоматизации: учебник для студ. высш. учеб. заведений. - М. – Издательский центр «Академия», 2007, - 97с.
- 69.Шличтинг Г. Теория пограничного слоя. М., изд-во иностранной литературы,124с.
- 70. Юдин Е. М. Шестеренные насосы. Основные параметры и их расчет. М., издательство «Машиностроение». 1964, - 87с.
- 71. Уведомление о решении Федеральной службы по интеллектуальной собственности на полезную модель «Свободнопоршневой пневматический вакуумный насос» №2015130461/06(046898) от 4.09.2015.