

УДК 629.113 - 592

ГИЛЬ Светлана Валентиновна

**ДИНАМИКА СЛЕДЯЩИХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ  
МОБИЛЬНЫХ МАШИН**

05.02.03 – Системы приводов

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Минск 2000

Работа выполнена в Белорусской государственной политехнической академии.

**Научный руководитель** – кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
Бартош П.Р.

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
Гуськов В.В.,

кандидат технических наук  
Заболоцкий М.М.

**Оппонирующая организация** – ПО "Минский тракторный завод".

Защита состоится *08* декабря 2000 г. в 14.00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.04 при Белорусской государственной политехнической академии по адресу: 220027, г. Минск, проспект Ф. Скорины, 65, тел. (017) 232-81-86

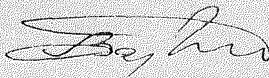
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусской государственной политехнической академии.

Автореферат разослан

*31 октября*

2000 г.

Учёный секретарь совета по защите диссертаций



В.А. Бармин

©Гиль С.В., 2000

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Совершенство современных мобильных машин определяется не только технико-экономическими показателями, но и уровнем активной безопасности машин, которая зависит от эффективности и надёжности тормозной системы. Следящие пневмоаппараты - основные элементы пневматических, пневмогидравлических и электропневматических тормозных приводов, определяют их статические и динамические характеристики: быстродействие, следящее действие и синхронность работы. В настоящее время отсутствует научно обоснованный метод динамического расчёта следящих пневмоаппаратов, учитывающий перемещения подвижных элементов и давления в полостях аппаратов, с помощью которого можно исследовать более точно экстренные и служебные режимы работы пневмоприводов. Поэтому разработка метода динамического расчёта следящих пневмоаппаратов с различными типами связей, который является составной частью проектного расчёта пневмосистем с использованием математического моделирования и ЭВМ, представляет актуальную научную задачу. Такой метод позволяет на стадии проектирования выполнять большой объём аналитических исследований, уменьшить объём натурных испытаний и сократить сроки разработки пневмосистем мобильных машин.

**Связь работы с крупными научными программами, темами.** Работа является частью комплексных исследований по госбюджетной теме ГБ 96-07 "Разработка научных основ по созданию гидравлических, пневматических и электропневматических приводов мобильных машин, управляемых электронной автоматикой", № г.р. 1996872, выполненных в 1996 - 1998 гг. и по госбюджетной теме ГБ 00-02 "Разработка теоретических основ динамического расчёта следящих пневматических аппаратов и пневмомодуляторов, управляемых средствами электронной автоматики мобильных машин", № г.р. 2000361, выполняемых в 2000 г. Научный руководитель этих работ - зав. кафедрой "Гидропневмоавтоматика и гидропневмопривод" БГПА, Лауреат Государственной премии Республики Беларусь, д.т.н., проф. Богдан Н.В.

**Цель и задачи исследования.** Разработка метода динамического расчёта следящих аппаратов с различными типами обратных связей пневматических систем мобильных машин.

Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи:

- разработать расчётные схемы, нелинейные и линейные математические модели следящих пневмоаппаратов;
- провести структурный анализ линейных математических моделей следящих пневмоаппаратов для выяснения механизма отслеживания давления в наполняемой ёмкости и закона перемещения клапанов;
- разработать методику обоснования выбора расчётных схем следящих пневмоаппаратов с помощью частотного анализа;

- разработать стенд и экспериментально исследовать динамические характеристики следящих пневмоаппаратов и их контуров;
- разработать методики: приведения распределённого объёма трубопровода к сосредоточенному объёму ёмкости; преобразования двухзвенных пневмоцепей в однозвенные; определения пропускной способности пневмосопротивлений при экспоненциальном входном воздействии;
- дать рекомендации по выбору коэффициентов расхода трубопроводов и пропускной способности клапанов тормозного крана и ускорителя.

**Объект и предмет исследования.** В диссертации основное внимание направлено на исследование динамики следящих аппаратов с различными типами обратных связей пневмосистем мобильных машин.

**Методология и методы проведения исследования.** При исследованиях использованы фундаментальные положения механики жидкости и газа, теории автоматического управления, средств гидропневмоавтоматики, теории и проектирования гидропневмосистем, экспериментальные методы с применением осциллографической аппаратуры, методы планирования экспериментов и обработки их, методы математического моделирования с применением ЭВМ.

**Научная новизна и значимость полученных результатов.** Впервые разработаны: метод динамического расчёта следящих пневмоаппаратов с различными типами обратных связей, их контуров с применением ЭВМ; линейные математические модели тормозного крана и ускорителя, их структурные схемы; методика обоснования выбора расчётных схем следящих пневмоаппаратов, основанная на применении вещественных частотных характеристик замкнутой системы регулирования давления воздуха в исполнительных элементах. Установлена пневмомеханическая отрицательная обратная связь в аппаратах, которая обеспечивает механизм отслеживания давления в исполнительных элементах привода и закон перемещения клапанов. Выполненные исследования по учёту ёмкости трубопроводов при динамическом расчёте пневмоприводов, преобразованию пневмоцепей, определению пропускной способности пневмосопротивлений при экспоненциальном входном воздействии обеспечивают дальнейшее развитие метода динамического расчёта пневмоприводов с применением гиперболической функции расхода. Полученные результаты исследования создают основы теории следящих пневмоаппаратов и способствуют развитию работ по динамике следящих пневмоприводов мобильных машин.

**Практическая значимость полученных результатов.** Разработанный метод динамического расчёта следящих пневмоаппаратов, их контуров, применяемых в приводах мобильных машин, а также программное обеспечение его внедрены на БелАЗе. Создан комплексный стенд для исследования динамики следящих пневмоаппаратов, определения пропускной способности пневмосопротивлений и разработаны методики экспериментальных исследований, которые внедрены в учебный процесс на кафедре "Гидропневмоавтоматика и гидропневмопривод". Получен патент на полезную модель следящего электро-

пневматического тормозного привода транспортного средства. Предложены рекомендации по выбору коэффициентов расхода трубопроводов и пропускной способности клапанов тормозного крана и ускорителя.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

- математические модели тормозного крана и ускорителя, отличающиеся от известных моделей учётом масс подвижных элементов и переменных проходных сечений впускных клапанов и позволяющие исследовать динамику приводов в экстренных и служебных режимах работы;

- теоретические исследования, углубляющие метод динамического расчёта пневмоприводов с применением гиперболической функции расхода: учёт ёмкости трубопровода; преобразование пневмоцепей; определение пропускной способности пневмосопровителений при экспоненциальном воздействии;

- методика математического моделирования контуров следящих пневмоприводов с учётом их нелинейных факторов, позволяющая проводить проекторочные динамические расчёты с применением ЭВМ;

- линейные математические модели тормозного крана и ускорителя, представленные в виде дифференциальных уравнений, передаточных функций, структурных схем и частотных характеристик, которые позволяют проводить на стадии проектирования предварительные исследования пневмоаппаратов аналитическими методами;

- методика обоснования выбора расчётных схем следящих пневмоаппаратов, основанная на применении вещественной частотной характеристики замкнутой системы регулирования давления в ёмкости;

- структурный анализ следящих пневмоаппаратов, позволивший обосновать механизм отслеживания давления в ёмкости и закон перемещения клапанов, обусловленные действием пневмомеханической отрицательной обратной связи этих аппаратов, образованной последовательным соединением пропорционального звена и форсирующего звена первого порядка, постоянная времени которого зависит от параметров трубопровода и ёмкости;

- рекомендации по выбору коэффициентов расхода трубопроводов и пропускной способности клапанов тормозного крана и ускорителя.

**Личный вклад соискателя.** Автор самостоятельно получила основные результаты диссертационной работы и опубликовала лично 5 статей, в соавторстве - 10 работ. Общая концепция исследований разработана совместно с научным руководителем. Участие автора диссертации в совместных работах заключалось в составлении планов статей и докладов, написании их совместно с соавторами; в разработке идеи патента на полезную модель, схемы и описания устройства совместно с соавтором, оформление заявки на патент.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты диссертации докладывались на 51, 52 и 53-й международных научно-технических конференциях БГПА (г. Минск, 1995, 1997, 1999 г.). Второй Республиканской научно-технической конференции БАТУ (г. Минск, 1996 г.), IV Республиканской

научной конференции студентов и аспирантов Республики Беларусь (г. Гродно, 1998 г.), международной научно-технической конференции "Современные проблемы машиноведения" ГГТУ (г. Гомель, 2000 г.).

**Опубликованность результатов.** Результаты диссертации опубликованы в двух статьях в сборнике научных трудов, в восьми депонированных статьях, в тезисах четырёх конференций и одном патенте на полезную модель Республики Беларусь.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения и приложений. Полный объём диссертации 186 страниц, 65 страниц иллюстраций (68 штук), 3 таблицы на 2 страницах, 2 приложения на 3 страницах, список использованных источников количеством 114 на 9 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* отмечена актуальность темы диссертации, содержится оценка современного состояния динамических расчётов следящих пневматических аппаратов, обоснование необходимости проведения работы.

*В первой главе* проведен анализ работ по динамике пневматических звеньев и следящих пневмоаппаратов, сформулированы задачи исследования.

Всесторонние и глубокие исследования динамики пневмоприводов и их элементов, применяемых в различных отраслях машиностроения, изложены в трудах Н.М. Беллева, В.Ф. Бугаенко, Е.В. Герц, В.Н. Дмитриева, Ю. Иринга, Г.В. Крейнина, Р. Моля, Д.Н. Попова, С.Н. Прудникова, В.А. Федорца, В.А. Чашина и др. Они внесли большой вклад в разработку теории, методов расчёта и конструирования современных пневмоприводов. Анализ указанных исследований показал, что результаты их не учитывают специфические особенности работы и конструкции следящих пневмоприводов и их аппаратов, применяемых в мобильных машинах. Эти обстоятельства сделали следящие пневмоприводы мобильных машин объектом самостоятельных исследований.

Теоретические и экспериментальные исследования пневматических и комбинированных приводов и их элементов выполнены в работах Ю.Б. Беленького, Н.В. Богдана, А.И. Гришкевича, В.В. Гуськова, Н.Ф. Метлюка, О.С. Руктешеля, В.П. Автушко, П.Р. Бартоша, Н.Н. Вишнякова, Л.В. Гуревича, В.И. Дольберга, М.М. Заболоцкого, П.Н. Кишкевича, Ф.К. Кравца, А.В. Курбатова, Р.А. Меламуда, А.Э. Павловича, Л.А. Румянцева, В.И. Чернова и др. Эти исследования способствовали развитию пневмоприводов мобильных машин, однако необходимость дальнейшего совершенствования пневмоприводов тормозов и других механизмов выдвигает ряд актуальных вопросов, решение которых требует проведения дальнейших исследований.

На основании проведённого обзора и анализа работ по динамике следящих пневмоприводов и их аппаратов установлено:

- рабочие процессы, происходящие в следящих пневмоаппаратах с различными типами обратных связей изучены недостаточно и поэтому для описания динамики их применяются математические модели, которые позволяют исследовать только экстренные режимы работы аппаратов;

- известные математические модели не учитывают массы подвижных элементов, основные нелинейности (зазоры, зону нечувствительности, нелинейную характеристику упругого элемента, ограничения) и переменные проходные сечения клапанов в процессе регулирования давления в ёмкости;

- отсутствуют комплексные исследования линеаризованных математических моделей следящих пневмоаппаратов с использованием методов теории автоматического управления, а также исследования динамики пневматических контуров в служебных режимах работы;

- требуется дальнейшее развитие динамического расчёта пневмоприводов с использованием гиперболической функции расхода в вопросах приведения распределённого объёма трубопровода к объёму ёмкости, коррекции пропускной способности пневмосопротивлений при экспоненциальном входном воздействии, преобразования пневмоцепей;

- при определении коэффициентов расхода трубопроводов не учитывается их объём, что приводит к большим погрешностям.

Во второй главе выполнены исследования пневматических звеньев и цепей, развивающие метод динамического расчёта пневмоприводов, основанный на применении гиперболической функции расхода.

Для приведения распределённого объёма трубопровода  $V_T$  к сосредоточенному объёму наполняемой (или опорожняемой) ёмкости  $V_E$  использовано сравнение динамических характеристик двухзвенной и эквивалентной однозвенной пневмоцепей. В двухзвенной пневмоцепи трубопровод заменяется точной ёмкостью объёмом  $V_T$ , расположенной между двумя пневмосопротивлениями, которые характеризуют пропускные способности трубопровода  $(\mu A)_T$  и дросселя  $(\mu A)_1$ . В однозвенной пневмоцепи эквивалентная ёмкость объёмом  $V_3$  наполняется (или опорожняется) через эквивалентный дроссель, представляющий последовательное соединение двух вышеуказанных пневмосопротивлений. При этом  $V_3 = V_E + \alpha_n V_T$  (где  $\alpha_n$  - коэффициент приведения распределённого объёма трубопровода к объёму ёмкости). Динамика пневмоцепей описывалась с помощью гиперболической функции расхода. В результате исследования получены номограммы для определения коэффициентов приведения  $\alpha_n$  при наполнении (рис. 1, а) и  $\alpha_0$  при опорожнении ёмкости, которые зависят от параметров  $\gamma = V_T / V_E$  и  $\beta = (\mu A)_T / (\mu A)_1$ . Разработанная методика позволяет определять при заданной погрешности область параметров  $\gamma$  и  $\beta$ , для которых необходимо учитывать объём трубопровода (штрих-пунктирные линии).

Предложена безразмерная форма уравнений динамики двух- и однозвенных пневмоцепей, что позволило получить универсальные номограммы для определения погрешностей замены двухзвенных пневмоцепей на однозвенные

для двух вариантов преобразования: присоединение промежуточной ёмкости к ресиверу (или атмосфере при опорожнении) и присоединения этой ёмкости к наполняемому (или опорожняемому) объёму. Разработанная методика преобразования двухзвенных пневмоцепей в однозвенные позволяет понизить порядок математических моделей многозвенных пневмоприводов.

Существующие методики косвенного определения пропускной способности  $(\mu A)_n$  (или коэффициента расхода  $\mu_d$ ) пневмосопротивлений исходят из предположения, что при эксперименте давление на его вход  $p_{вх}$  подаётся ступенчато. Однако при испытаниях практически невозможно получить такой закон  $p_{вх}$  и, кроме того, давление  $p_i$  в ёмкости запаздывает на величину  $\tau_s$  по отношению к  $p_{вх}$ . Анализ осциллограмм динамических процессов наполнения (или опорожнения) постоянных ёмкостей показал, что более реальным является экспоненциальный закон изменения  $p_{вх}$ . Используя гиперболическую функцию расхода и безразмерные параметры  $\sigma_1 = p_1/p_{max}$ ;  $\sigma_{нач} = p_{нач}/p_{max}$ ;  $\sigma_{вх} = p_{вх}/p_{max}$ ;  $\sigma_{1к} = p_{1к}/p_{max}$ ;  $\sigma_{1т} = p_{1т}/p_{max}$ ;  $Y = t/\tau_s$ ;  $u = \tau_s/t_m$ , разработана математическая модель, описывающая процесс наполнения постоянной ёмкости объёмом  $V$  при экспоненциальном законе  $p_{вх}$  с учётом  $\tau_s$ :

$$\left. \begin{aligned} d\sigma_1/dY &= u\sigma_{вх}((\sigma_{вх} - \sigma_1)/(B_1\sigma_{нач} - \sigma_1)); \quad \sigma_{вх} = \sigma_{нач} + (1 - \sigma_{нач})(1 - \exp(-\lambda Y)); \\ t_m/\tau_s &= 1 + (1/u)((\sigma_{1к} - \sigma_{1т}) + (B_1 - 1)\ln((1 - \sigma_{1т})/(1 - \sigma_{1к}))); \\ K_n &= (u t_m)/(K_1 \tau_s) \text{ при } \tau_s/\tau_s < 1 \text{ или } K_n = 1 + (u \tau_s)/(K_1 \tau_s) \text{ при } \tau_s/\tau_s > 1; \\ K_1 &= (\sigma_{1к} - \sigma_{нач}) + (B_1 - 1)\ln((1 - \sigma_{нач})/(1 - \sigma_{1к})), \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $p_{max}$  - максимальное давление воздуха в ресивере;  $p_{нач}$  - начальное давление;  $t$  - текущее время;  $\tau_s$  - время нарастания  $p_{вх}$  до заданного уровня;  $p_{1к}$  - конечное давление в ёмкости;  $p_{1т}$  - давление в ёмкости при  $t = \tau_s$ ;  $t_m = V/(\mu A)_d k v_0 B_0$ ;  $k$  - показатель адиабаты;  $v_0$  - местная скорость звука;  $v_0 = \sqrt{kRT}$ ;  $T$  - термодинамическая температура воздуха перед дросселем;  $R$  - газовая постоянная для воздуха;  $B_0$  и  $B_1$  - коэффициенты аппроксимации;  $B_0 = 0,654$ ,  $B_1 = 1,13$ ;  $\lambda = \ln(1/(1-\nu))$ ;  $\nu$  - принятый относительный перепад входного давления  $p_{вх}$  за время  $\tau_s$ ;  $t_m$  - время наполнения ёмкости до давления  $p_{1к} = a p_{max} + (1 - a) p_{нач}$ ;  $a$  - принятый относительный перепад давления в ёмкости;  $K_n$  - коэффициент коррекции пропускной способности дросселя при наполнении ёмкости.

В результате исследования этой модели получена диаграмма для определения коэффициента  $K_n$  в зависимости от параметров  $t_m/\tau_s$  и  $\tau_s/\tau_s$  (рис. 1, б). Пропускная способность пневмосопротивления определяется по формуле  $(\mu A)_d = 3,49 \cdot 10^{-3} (V/t_m) K_n$ . В диссертации также получена аналогичная диаграмма для коэффициента коррекции  $K_0$  при опорожнении ёмкости.

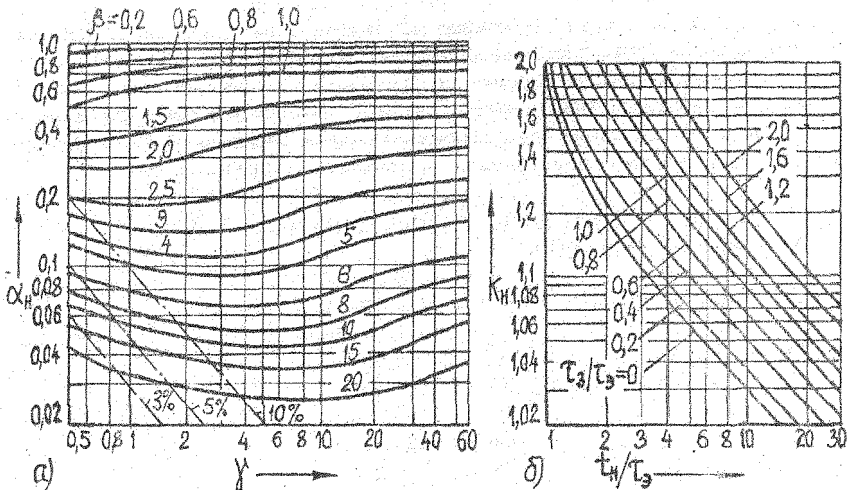


Рис. 1. Коэффициенты приведения (а) и коррекции (б) при наполнении ёмкости

В третьей главе разработаны и исследованы нелинейные математические модели тормозного крана и ускорительного клапана, проведено математическое моделирование контура "тормозной кран - ускорительный клапан - ёмкость".

Для описания динамики пневматических звеньев следящих пневмоаппаратов использованы уравнения баланса мгновенных массовых расходов в узлах  $Y_1, \dots, Y_4$  пневмоцепи (рис. 2) и гиперболическая функция расхода через пневмосопротивление. Механические элементы тормозного крана, имеющего отри-

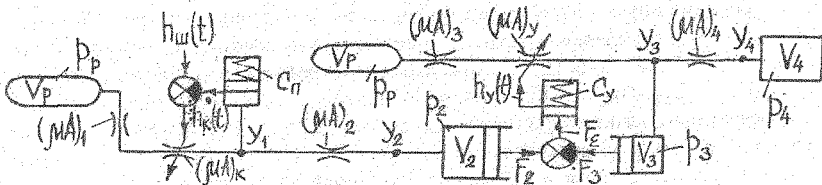


Рис. 2. Расчётная схема пневматического контура "тормозной кран - ускорительный клапан - ёмкость"

цательную обратную связь как по положению, так и по усилию, представляют собой динамическую систему с двумя степенями свободы. Их расчётные схемы рассмотрены в четырёх вариантах: двухмассовая (приведенная масса штока  $m_{пр}$  взаимодействует через упругий элемент следящего механизма с приведенной

массой клапана  $m_k$ ), одномассовая при учёте массы штока  $m_{ш}$ , одномассовая при учёте массы клапана  $m_k$  и безмассовая. В уравнениях движения подвижных элементов крана учитываются инерционные, скоростные и позиционные силы, зоны нечувствительности, переменное проходное сечение впускного клапана, нелинейная характеристика упругого элемента, которая получена при экспериментальном исследовании. Математическая модель тормозного крана для случая одномассовой расчётной схемы с учётом массы штока имеет вид

$$\left. \begin{aligned} dp_1/dt &= (k v_0 B_0/V_1) ((\mu A)_{Э1} p_p ((p_p - p_1)/(B_1 p_p - p_1)) - \\ &- (\mu A)_2 p_1 ((p_1 - p_2)/(B_1 p_1 - p_2))); \\ dp_2/dt &= (((\mu A)_2 k v_0 B_0)/(V_{02} + \alpha_{н1} l_2 A_{T2})) p_1 ((p_1 - p_2)/(B_1 p_1 - p_2)); \\ m_{ш} d^2 h_{ш}/dt^2 + v_{ш} dh_{ш}/dt + c_1 (h_{ш} - h_{к0} - h_k) + c_2 (h_{ш} - h_{к0} - h_k)^2 + \\ &+ c_3 (h_{ш} - h_{к0} - h_k)^3 + F_{тр1} \operatorname{sgn} dh_{ш}/dt = F_{ш} i_{ш} \eta_{ш}; \\ h_k &= \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq h_k \leq h_{к0}; \\ h_{ш} - h_{к0} - \delta & \text{при } h_{к0} < h_k \leq h_{к\max}; \\ h_{к\max} & \text{при } h_k > h_{к\max}; \end{cases} \\ \delta &= a_{11} A_{п} (p_1 - p_{10}) + a_{12} A_{п}^2 (p_1 - p_{10})^2 + a_{13} A_{п}^3 (p_1 - p_{10})^3; \\ A_k(h_k) &= 0 \text{ при } 0 \leq h_k \leq h_d \text{ или } A_k(h_k) = \pi D_k (h_k - h_d) \text{ при } h_k > h_d \end{aligned} \right\} (2)$$

где  $p_1$  и  $p_2$  - давление воздуха в полости крана и ёмкости;  $(\mu A)_{Э1}$  - пропускная способность эквивалентного дросселя, представляющего последовательное соединение трубопровода от ресивера к крану с  $(\mu A)_1$  и впускного клапана крана с  $(\mu A)_k = \mu_k A_k$ ;  $\mu_k$  и  $A_k$  - соответственно коэффициент расхода и площадь проходного сечения впускного клапана;  $(\mu A)_2$  - пропускная способность трубопровода длиной  $l_2$  и площадью проходного сечения  $A_{T2}$ , соединяющего кран с ёмкостью;  $V_{02}$  - объём ёмкости;  $\alpha_{н1}$  - коэффициент приведения объёма трубопровода к объёму ёмкости;  $h_{ш}$  и  $h_k$  - перемещения соответственно штока и клапана;  $v_{ш}$  - коэффициент вязкого трения;  $c_1, c_2, c_3$  - коэффициенты, характеризующие жёсткость упругого элемента (коэффициенты прямой регрессии);  $h_{к0}$  - зазор между подвижным седлом и клапаном;  $F_{тр1}$  - сила сухого трения;  $F_{ш}$  - усилие, прикладываемое к штоку;  $\delta$  - деформация упругого элемента;  $h_{к\max}$  - максимальное перемещение клапана;  $a_{11}, a_{12}, a_{13}$  - коэффициенты обратной регрессии;  $A_{п}$  - площадь следящего поршня;  $p_{10}$  - зона нечувствительности крана;  $D_k$  - диаметр седла клапана;  $h_d$  - положение запорного элемента клапана, соответствующее началу его открытия с учётом деформации уплотнительного материала.

При экспериментальном исследовании динамики тормозного крана усилие  $F_{ш}$  создавалось с помощью пневмоцилиндра и математическая модель (2)

дополнялась уравнениями для определения  $F_{\text{пн}}$ , приведенными в диссертации. Анализ динамических характеристик показал, что модель достаточно адекватно описывает динамику крана; погрешности расчёта давлений и перемещений по сравнению с экспериментальными данными составляют 3...8%.

Ускорительный клапан имеет силовую отрицательную обратную связь (рис. 2). Для механических элементов его принята одномассовая расчётная схема. Нелинейная математическая модель представлена в виде

$$\left. \begin{aligned} dp_3/dt &= (k v_0 B_0/V_3) ((\mu A)_{\text{з2}} p_p ((p_p - p_3)/(B_1 p_p - p_3)) - \\ &- (\mu A)_4 p_3 ((p_3 - p_4)/(B_1 p_3 - p_4))); \\ dp_4/dt &= (((\mu A)_4 k v_0 B_0)/V_4 (p_1 ((p_1 - p_2)/(B_1 p_1 - p_2))); \\ m_{\text{п}} d^2 h_y/dt^2 + v_{\text{в}} dh_y/dt + c_y h_y &= A_{\text{п1}} p_2 - (A_{\text{п1}} - A_{\text{п1}}) p_3 - F_{\text{тр}} \operatorname{sgn} dh_y/dt; \\ A_y(h_y) &= \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq h_y \leq h_{\text{уд}}; \\ \pi D_y (h_y - h_{\text{уд}}) & \text{при } h_{\text{уд}} < h_y \leq h_{\text{y0}}; \\ A_{\text{ym}} & \text{при } h_y > h_{\text{y0}}; \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $p_3$  и  $p_4$  - давление воздуха соответственно в полости  $V_3$  ускорителя и в ёмкости  $V_4$ ;  $(\mu A)_{\text{з2}}$  - пропускная способность эквивалентного дросселя, представляющего последовательное соединение трубопровода от ресивера к ускорителю с  $(\mu A)_{\text{з}}$  и клапана ускорителя с  $(\mu A)_y = \mu_y A_y$ ;  $\mu_y$  и  $A_y$  - соответственно коэффициент расхода и площадь проходного сечения клапана;  $(\mu A)_4$  - пропускная способность трубопровода, соединяющего ускоритель и ёмкость  $V_4$ ;  $m_{\text{п}}$  - суммарная масса поршня и корпуса клапанов;  $v_{\text{в}}$  - коэффициент вязкого трения;  $c_y$  - жёсткость пружины клапана;  $h_y$  - перемещение клапана;  $F_{\text{тр}}$  - сила сухого трения;  $A_{\text{п1}}$  и  $A_{\text{п1}}$  - площадь соответственно поршня и штока;  $p_2$  - давление в управляющей полости ускорителя;  $D_y$  - диаметр седла клапана;  $h_{\text{уд}}$  - положение запорного элемента клапана, соответствующее началу его открытия с учётом деформации уплотнительного материала;  $h_{\text{y0}}$  - положение клапана, соответствующее максимальному проходному сечению  $A_{\text{ym}}$ .

Управляющее давление  $p_2$  описывалось по результатам эксперимента полиномом третьей степени. Погрешности расчёта динамических характеристик по модели (3) по сравнению с данными эксперимента составляют 2...6%.

Разработанные математические модели следящих пневмоаппаратов отличаются от известных учётом масс подвижных элементов, основных нелинейностей и переменных проходных сечений клапанов в процессе регулирования давления в ёмкости, обусловленных действием отрицательной обратной связи в пневмоаппаратах. Модели являются универсальными, они описывают служебные и экстренные режимы работы пневмоаппаратов.

Математическая модель контура (рис. 2), состоящего из тормозного крана, ускорительного клапана и ёмкости, получена на основе моделей (2) и (3). При этом второе уравнение системы (2) определяет управляющее давление  $p_2$  ускорительного клапана. По этой модели рассчитаны на ЭВМ динамические характеристики контура (рис. 3) для различных параметров. Используя полученную модель, выполнено исследование влияния места установки ускорительного клапана на быстродействие контура. Результаты расчёта сравниваются с экспериментальными характеристиками контура.

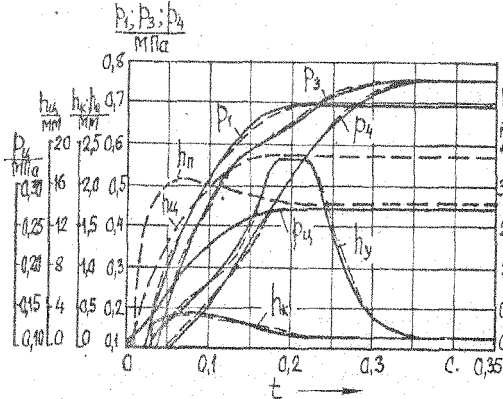


Рис. 3. Динамические характеристики контура для  $V_4 = 2,33 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ,  $l_2 = 4 \text{ м}$ ,  $\varnothing 15 \times 1$ ,  $l_4 = 2 \text{ м}$ ,  $\varnothing 15 \times 1$ , и  $p_{11} = 0,27 \text{ МПа}$ ,  $t_{\max} = 0,133 \text{ с}$ .  
 ———— расчет;  
 - - - - эксперимент

В четвертой главе разработаны структурные и частотные методы анализа динамики следящих пневмоаппаратов.

Для предварительного выбора и качественной оценки параметров системы регулирования давления следящими пневмоаппаратами, выявления причинно-следственных связей между процессами, происходящими в её элементах, целесообразно использовать линейные математические модели аппаратов.

С целью получения такой модели тормозного крана пренебрегались существенные нелинейности: сила сухого трения  $F_{\text{тр}}$ , зазор  $h_{\text{з}}$ , зона нечувствительности  $p_{10}$ , принималось, что жёсткость упругого элемента следящего механизма  $c_n = \text{const}$  и  $(\mu A)_1 \gg (\mu A)_k$ , тогда  $(\mu A)_{\text{Э1}} = (\mu A)_k$ . При линейризации расходно-перепадных характеристик пневмосопротивлений использован метод интерполяционного многочлена первой степени, позволяющий получить меньшие погрешности линейризации. Для одномассовой расчётной схемы тормозного крана с учётом  $m_{\text{ин}}$  полученные линейризованные уравнения были приведены к стандартной форме и записаны в изображениях по Лапласу:

$$\left. \begin{aligned} (T_1 s^2 + 2\zeta_m T_m s + 1)h_w(s) &= \kappa_n F_w(s) + h_k(s); & h_k(s) &= \kappa_k (h_w(s) - \kappa_{\text{кес}} p_1(s)); \\ (T_1 s + 1)p_1(s) &= \kappa_n h_k(s) + \kappa_1 p_2(s); & (T_2 s + 1)p_2(s) &= \kappa_2 p_1(s), \end{aligned} \right\} (4)$$

где  $T_m, T_1, T_2$  - постоянные времени;  $K_k, K_n, K_{oc}, K_h, K_1$  и  $K_2$  - коэффициенты передач;  $\zeta_m$  - коэффициент относительного демпфирования штока.

$$T_1 = V_1 / (k v_0 V_0 (\pi \mu_k D_k p_p \beta_2 + (\mu A)_2 \alpha_1)); \quad T_2 = V_2 / (k v_0 V_0 (\mu A)_2 \beta_1); \quad T_m = \sqrt{m_m / c_m};$$

$$K_n = 1/c_n; \quad K_k = c_n / (c_k + c_n); \quad K_{oc} = A_n / c_n; \quad K_1 = (\mu A)_2 \beta_1 / (\pi \mu_k D_k p_p \beta_2 + (\mu A)_2 \alpha_1);$$

$$K_2 = \alpha_1 / \beta_1; \quad K_h = \pi \mu_k D_k p_p \alpha_2 / (\pi \mu_k D_k p_p \beta_2 + (\mu A)_2 \alpha_1); \quad \zeta_m = K_m / 2\sqrt{m_m c_m},$$

где  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$  и  $\beta_2$  - коэффициенты линеаризации расходно-перепадных характеристик; вычисляются по формулам, приведенным в диссертации.

Используя уравнения (4), определены передаточные функции динамических звеньев и построена исходная структурная схема тормозного крана, которая имеет перекрещивающиеся обратные связи. После структурных преобразований получена схема рис. 4. В диссертации разработаны структурные схемы для 4-х вариантов расчётных схем тормозного крана. Анализ их показал, что изменяются только контуры с механическими звеньями.

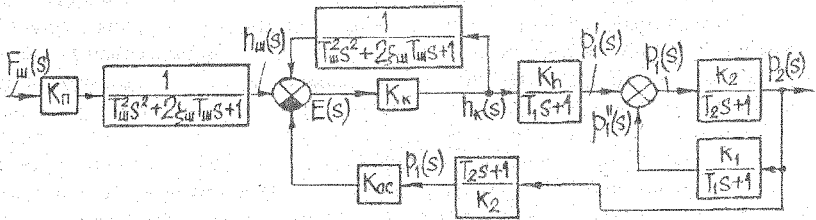


Рис. 4. Преобразованная структурная схема тормозного крана

Установлено, что несмотря на отсутствие главной обратной связи в принципиальной схеме тормозного крана, его структурная схема является замкнутой, имеет внутренние контуры и главную отрицательную обратную связь, которая является пневмомеханической. Она образована последовательным соединением пропорционального звена с коэффициентом передачи  $K_{oc}$  обратной связи крана и форсирующего звена 1-го порядка, постоянная времени  $T_2$  которого зависит от объёма  $V_2$  ёмкости и параметров трубопровода  $(\mu A)_2$ , и обеспечивает механизм отслеживания давления в ёмкости. Это объясняется тем, что кран представляет проточную ёмкость, благодаря которой возникает внутренняя положительная обратная связь и, как следствие этого, давление  $p_2$  в ёмкости влияет на давление  $p_1$  в полости крана. Наличие форсирующего звена подтверждает установленную при экспериментальном исследовании зависимость перемещения впускного клапана крана от объёма ёмкости и параметров трубопровода.

Для всех структурных схем получены главные передаточные функции, амплитудные, фазовые и вещественные частотные характеристики (АЧХ, ФЧХ, ВЧХ) замкнутой системы, а также погрешности расчёта этих характеристик для одномассовых и безмассовой расчётных схем по сравнению с двухмассовой.

Разработана методика обоснования выбора расчётной схемы тормозного крана, основанная на применении ВЧХ замкнутой системы, которая имеет однозначную связь с переходной функцией этой системы. Сущность методики состоит в определении на интервале существенных частот погрешностей расчёта ВЧХ, а следовательно, и погрешностей расчёта переходной функции для безмассовой и одномассовых схем по отношению к двухмассовой и, используя значение минимальной погрешности (например, 3...5%) делается вывод по выбору расчётной схемы. Разработанная методика применима для всех следящих пневмоаппаратов.

Исследованием установлено, что при описании динамики крана необходимо применять одномассовую расчётную схему с учётом массы штока, а массой клапана и связанных с ним деталей можно пренебречь. Погрешности расчёта на интервале существенных частот по этой схеме составляют: для ВЧХ 3,7%, АЧХ – 2,3% и ФЧХ – 1,55%, другие схемы дают погрешности более 80%. Проведённый анализ влияния основных конструктивных параметров системы на погрешности расчёта ВЧХ для предлагаемой одномассовой расчётной схемы показал, что при изменении массы клапана, жёсткости упругого элемента, объёма ёмкости, проходного сечения магистрали и коэффициента расхода её в возможных пределах погрешности расчёта ВЧХ не превышают 5%. Уменьшение массы штока увеличивает погрешности расчёта ВЧХ и, используя для погрешности значение 5%, устанавливается граница применимости одномассовой расчётной схемы, после которой нужно применять двухмассовую.

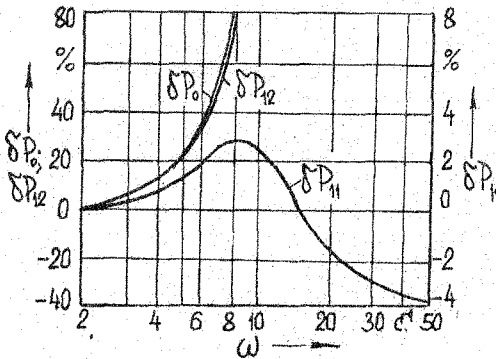


Рис. 5. Погрешности расчёта ВЧХ для расчётных схем тормозного крана:  
 $\delta P_{11}$  – с массой штока;  
 $\delta P_{12}$  – с массой клапана;  
 $\delta P_0$  – безмассовая

Используя методику разработки линейной модели тормозного крана, получена линейная модель ускорительного клапана, построены структурные схемы для одномассовой и безмассовой расчётных схем и выполнен их анализ. Установлено, что структурные схемы ускорителя являются двухконтурными, имеют главную пневмомеханическую обратную связь и такие же особенности, как и структурные схемы тормозного крана. Проведён анализ частотных характеристик ускорителя и установлено, что при описании динамики его можно применять безмассовую схему (погрешности расчёта ВЧХ не превышают 0,5%).

Разработанная линейная математическая модель ускорительного клапана является универсальной и может быть использована для исследования других следящих пневмоаппаратов с силовой отрицательной обратной связью.

В пятой главе описана программа, техника и методики экспериментальных исследований, планирование опытов и обработка результатов экспериментов, результаты экспериментальных исследований.

Программа исследований включала: разработку стенда для исследования динамических характеристик следящих пневмоаппаратов, их контуров и пневматических звеньев; разработку методик испытаний; определение динамических характеристик тормозного крана, ускорительного клапана и последовательного соединения их при различных законах входных воздействий и параметров контура; определение пропускной способности пневмоаппаратов; оценку адекватности разработанных математических моделей и принятых допущений при описании динамики следящих пневмоаппаратов, контуров и звеньев.

Для проведения экспериментальных исследований был разработан и изготовлен комплексный стенд. Он имеет основные особенности: одновременная регистрация с высокой точностью перемещений подвижных элементов пневмоаппаратов и давлений воздуха в их полостях; создание различных законов входных воздействий для имитации служебных и экстренных режимов работы пневмоаппаратов. Стенд также позволяет исследовать динамику пневмоцепей, определять пропускную способность пневмосопротивлений.

При испытаниях аппаратов регистрировались: перемещения  $h_{ц}$  поршня пневмоцилиндра управления тормозным краном,  $h_{к}$  поршня и клапана  $h_{к}$  нижней секции крана,  $h_{у}$  впускного клапана ускорителя; давления  $p_{ц}$  в полости пневмоцилиндра управления тормозным краном,  $p_{р}$  в ресивере,  $p_1$  на выходе тормозного крана,  $p_2$  и  $p_3$  в управляющей и рабочей полости ускорителя,  $p_4$  в ёмкости. Для регистрации давлений применялись малогабаритные потенциометрические датчики повышенной точности типа МД-10Т, а для перемещений - потенциометрические датчики малых перемещений ЛХ704, ЛХ707, ЛХ708. Эти датчики позволяют регистрировать процессы без усиления электрического сигнала, что значительно уменьшает погрешности измерения.

При испытаниях следящих аппаратов изменялись объёмы ёмкости, параметры трубопроводов, величина и скорость управляющих воздействий,

Проведена оценка точности измерений и планирование опытов. Выполнена математическая обработка экспериментальных данных по характеристике упругого элемента следящего механизма тормозного крана и получены уравнения прямой и обратной регрессий, дана оценка их достоверности.

В результате испытаний получено более 400 осциллограмм динамических процессов в тормозном кране, в ускорителе и контуре, образцы которых приведены на рис. 6.

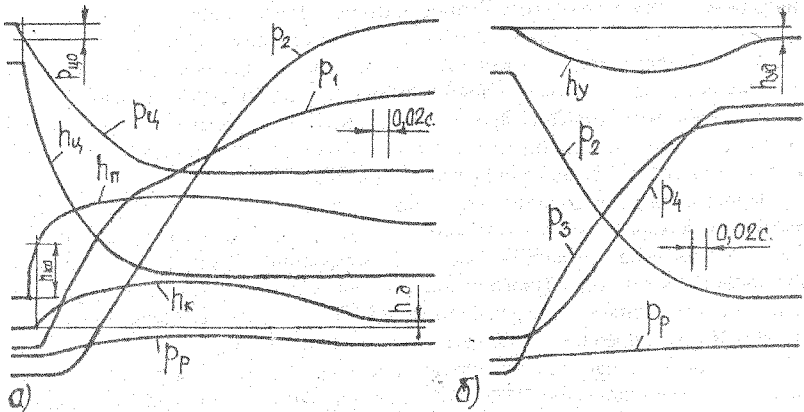


Рис. 6. Осциллограммы динамических процессов в тормозном кране (а) и в ускорительном клапане (б)

Используя разработанную в диссертации методику, получены данные по пропускной способности клапанов тормозного крана и ускорителя, которые использовались в качестве исходной информации при теоретическом исследовании их нелинейных и линейных математических моделей.

Для проверки методики учёта ёмкости трубопровода и преобразования пневмоцепей были получены динамические характеристики одно- и двухзвенных пневмоцепей при разных параметрах.

Многочисленные осциллограммы динамических характеристик следящих пневмоаппаратов позволили выявить стабильную закономерность перемещения их клапанов (рис. 7 и 8; указано избыточное давление) и картину процесса регулирования давления в ёмкости этими аппаратами. Установлено, что на режиме отслеживания давления в ёмкости впускные клапаны аппаратов перемещаются по сложному закону и проходное сечение их является переменным, что обусловлено действием пневмомеханической отрицательной обратной связи. На величину и характер перемещения клапанов существенно влияют длина и диаметр магистрали, соединяющей аппарат с ёмкостью, её объём, величина и скорость управляющих воздействий.

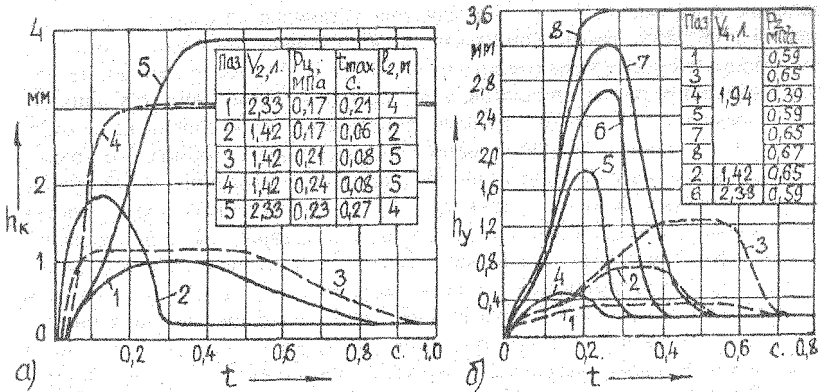


Рис. 7. Перемещения клапанов тормозного крана (а) и ускорителя (б)

Результаты выполненных экспериментальных исследований позволили разработать обоснованные математические модели для расчёта динамических характеристик следящих пневмоаппаратов и их соединений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны математические модели тормозного крана и ускорителя, отличающиеся от известных моделей учётом масс подвижных элементов, основных нелинейностей и переменных проходных сечений клапанов в процессе регулирования давления в ёмкости, обусловленных действием отрицательной обратной связи в пневмоаппаратах. Модели позволяют на стадии проектирования исследовать динамику приводов в экстренных и служебных режимах работы. Сравнительный анализ расчётных и экспериментальных динамических характеристик наполнения ёмкостей через исследуемые пневмоаппараты показал, что модели достаточно адекватно описывают динамику процесса регулирования давления в ёмкости (погрешности расчёта давлений находятся в пределах 6%, а перемещений – 8%) [7, 10].

2. Предложена методика математического моделирования контуров следящих пневмоаппаратов, работающих в экстренных и служебных режимах, с учётом их основных нелинейностей, позволяющая проводить проекторочные динамические расчёты приводов с применением ЭВМ. По этой методике выполнено исследование влияния места установки ускорителя на быстродействие контура "тормозной кран – ускоритель – ёмкость". Выявлено, что установка ус-

корителя в середине магистрали повышает быстродействие на 35...40% по сравнению с вариантом без ускорителя, при установке на расстоянии 75% от крана – на 45...55%, применение магистрали с различными проходными сечениями (большим после ускорителя) – на 60...67% [1, 12]. Метод динамического расчёта следящих пневмоаппаратов, и их контуров, применяемых в приводах мобильных машин, а также программное обеспечение его внедрены на БелАЗе.

3. Разработанные линейные математические модели тормозного крана и ускорителя представлены в виде линеаризованных дифференциальных уравнений, передаточных функций, структурных схем и частотных характеристик. Они позволяют проводить при проектировании предварительное исследование пневмоаппаратов аналитическими методами. Используя вещественные частотные характеристики замкнутой системы регулирования давления в ёмкости, предложена методика обоснования выбора расчётных схем следящих пневмоаппаратов. Установлено, что при описании динамики тормозного крана необходимо применять одномассовую расчётную схему с учётом массы штока [6].

4. В результате выполненного анализа структурных схем следящих пневмоаппаратов выявлена пневмомеханическая отрицательная обратная связь, которая обеспечивает механизм отслеживания давления в исполнительных элементах привода. Установлено, что эта связь образована последовательным соединением пропорционального звена с коэффициентом передачи обратной связи следящего пневмоаппарата и форсирующего звена, постоянная времени которого зависит от длины и диаметра магистрали, объёма ёмкости, что подтверждает установленную при экспериментах зависимость перемещения впускного клапана следящего пневмоаппарата от указанных параметров [14].

5. Разработан и изготовлен комплексный стенд для исследования динамики следящих пневмоаппаратов и их контуров, имеющий основные особенности: одновременная регистрация с высокой точностью перемещений подвижных элементов аппаратов и давления воздуха в их полостях; возможность создавать разные законы входных воздействий, имитируя служебные и экстренные работы пневмоаппаратов. Стенд позволяет исследовать динамику различных пневмоцепей и определять пропускную способность пневмосопротивлений. В результате выполненных экспериментальных исследований получены параметры рабочих процессов тормозного крана и ускорителя, происходящих при регулировании давления. Установлено, что в служебном режиме работы клапаны пневмоаппаратов перемещаются по сложным законам, при этом на величину и характер перемещения их существенно влияют длина и диаметр магистрали, объём ёмкости, величина и скорость управляющего сигнала. Результаты исследований позволили разработать и получить патент на полезную модель [7, 8, 13, 15]. Стенд и методики экспериментальных исследований динамики следящих пневмоаппаратов внедрены в учебный процесс на кафедре "Гидропневмоавтоматика и гидропневмопривод" БГПА.

6. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать методики: приведения распределённого объёма трубопровода к сосредоточенному объёму ёмкости; преобразования двухзвенных пневмоцепей в однозвенные; определения пропускной способности пневмоспротивлений при экспоненциальном входном воздействии. Эти исследования углубляют метод динамического расчёта пневмоприводов с применением гиперболической функции расхода и расширяют его практическое использование при проектировании пневмосистем мобильных машин [2, 3, 4, 9, 11].

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Бартош П.Р., Капустин Н.М., Гиль С.В. Математическая модель пневматического тормозного привода прицепа / Белорус. госунар. политехн. академ. - Минск, 1997. - 12 с. - Деп. в ВИНТИ 8.05.97. - № 1553-В97 // РЖ: 02. Автомобильный и городской транспорт. 02А. Автомобилестроение. - 1997. - №11. - 11А.112ДЕП. - С. 13.

2. Гиль С.В. Методика учёта ёмкости трубопровода при динамическом расчёте пневмопривода / Белорус. госунар. политехн. академ. - Минск, 1997. - 10 с. - Деп. в ВИНТИ 16.12.97. - № 3643-В97 // РЖ: 48. Машиностр. материалы, конструкции и расчёт деталей машин. Гидропривод. - 1998. - №6. - 6.48.549ДЕП. - С. 51.

3. Гиль С.В. Корректирование пропускной способности пневмоспротивлений при экспериментальном исследовании / Белорус. госунар. политехн. академ. - Минск, 1997. - 11 с. - Деп. в ВИНТИ 16.12.97. - № 3644-В97 // РЖ: 48. Машиностр. материалы, конструкции и расчёт деталей машин. Гидропривод. - 1998. - №6. - 6.48.548ДЕП. - С. 51.

4. Бартош П.Р., Гиль С.В. Приведение двухзвенных пневмоцепей к однозвенным / Белорус. госунар. политехн. академ. - Минск, 1997. - 12 с. - Деп. в ВИНТИ 16.12.97. - № 3645-В97 // РЖ: 48. Машиностр. материалы, конструкции и расчёт деталей машин. Гидропривод. - 1998. - №6. - 6.48.572ДЕП. - С. 53.

5. Гиль С.В. Моделирование рабочих процессов тормозных кранов / Белорус. госунар. политехн. академ. - Минск, 1998. - 15 с. - Деп. в ВИНТИ 12.05.98. - № 1419-В98 // РЖ: 48. Машиностр. материалы, конструкции и расчёт деталей машин. Гидропривод. - 1998. - №10. - 10.48.290ДЕП. - С. 30.

6. Гиль С.В. Линейная модель тормозного крана / Белорус. госунар. политехн. академ. - Минск, 1998. - 11 с. - Деп. в ВИНТИ 12.05.98. - № 1420-В98 // РЖ: 48. Машиностр. материалы, конструкции и расчёт деталей машин. Гидропривод. - 1998. - №10. - 10.48.291ДЕП. - С. 30.

7. Автушко В.П., Кравец Ф.К., Гиль С.В. Стенд для исследования динамики следящих пневматических аппаратов и контуров / Белорус. госунар. политехн. академ. - Минск, 1998. - 11 с. - Деп. в ВИНТИ 12.05.98. - № 1421-В98

// РЖ: 48. Машиностр. материалы, конструкции и расчёт деталей машин. Гидропривод. - 1998. - №10. - 10.48.514ДЕП. - С. 50.

8. Автушко В.П., Кравец Ф.К., Гиль С.В. Стендовые испытания следящих пневматических аппаратов и контуров / Белорус. госулар. политехн. академ. - Минск, 1998. - 14 с. - Деп. в ВИНТИ 12.05.98. - № 1422-B98 // РЖ: 48. Машиностр. материалы, конструкции и расчёт деталей машин. Гидропривод. - 1998. - №10. - 10.48.513ДЕП. - С. 50.

9. Гиль С.В. К вопросу определения пропускной способности пневмосопротивлений // Современные проблемы машиноведения: Материалы междунар. науч.-техн. конф. (научные чтения, посвящённые 105 годовщине со дня рождения П.О. Сухого): Сб. ст. / Под ред. А.С. Шагиняна. - Гомель: ГГТУ, 2000. - Т. 1. - С.194-197.

10. Автушко В.П., Бартош П.Р., Гиль С.В. Динамика следящих пневмоаппаратов с силовой обратной связью // Современные проблемы машиноведения: Материалы междунар. науч.-техн. конф. (научные чтения, посвящённые 105 годовщине со дня рождения П.О. Сухого): Сб. ст. / Под ред. А.С. Шагиняна. - Гомель: ГГТУ, 2000. - Т. 1. - С.192-194.

11. Бартош П.Р., Гиль С.В. Учёт объёма трубопровода при динамическом расчёте пневмопривода // Материалы междунар. 51-й научно-техн. конф. БГПА: В 8 ч. - Минск, 1995. - Ч. 3. - С. 94-95.

12. Бартош П.Р., Гиль С.В. Моделирование динамических процессов в пневматическом следящем приводе // Моделирование сельскохозяйственных процессов и машин. - Минск, 1996. - С. 28.

13. Бартош П.Р., Гиль С.В., Кравец Ф.К. Экспериментальное исследование следящих пневмоаппаратов // Технические вузы - Республике: Материалы междунар. 52-й научно-техн. конф. БГПА: В 7 ч. - Минск, 1997. - Ч. 3. - С. 19.

14. Бартош П.Р., Гиль С.В. Динамический расчёт тормозного крана по линейной модели // Материалы междунар. 53-й научно-техн. конф. БГПА: В 4 ч. - Минск, 1999. - Ч. 1. - С. 80.

15. Пат. на полезную модель ВУ 1 У, В 60Т13/68. Устройство для электроуправления многоконтурным тормозным приводом транспортного средства / Павлович А.Э., Гиль С.В. - № и19980001; Заявл. 05.01.1998; Оpubл. 30.03.1999 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. камітэт Рэспублікі Беларусь. - 1999. - № 1(20). - С. 180.

*Гиль С.В.*

## РЕЗЮМЕ

Гиль Светлана Валентиновна

ДИНАМИКА СЛЕДЯЩИХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ  
МОБИЛЬНЫХ МАШИН

*Ключевые слова:* тормозной кран, ускорительный клапан, динамика пневмоприводов, нелинейные и линейные математические модели, мобильные машины.

*Объект и предмет исследования.* В диссертации основное внимание направлено на исследование динамики следящих аппаратов с различными типами обратных связей пневмосистем мобильных машин.

*Цель работы* – разработка метода динамического расчёта следящих аппаратов с различными типами обратных связей пневматических систем мобильных машин.

В работе использованы основные положения механики жидкости и газа, теории автоматического управления, теории проектирования гидropневмосистем, методы математического моделирования с применением ЭВМ, экспериментальные методы с применением осциллографической аппаратуры.

Разработаны нелинейные математические модели тормозного крана и ускорительного клапана. Они учитывают массы подвижных элементов, основные нелинейности, переменные проходные сечения клапанов, обусловленные действием пневмомеханической отрицательной обратной связи. Модели описывают служебные и экстренные режимы работы аппаратов. Получены линейные модели аппаратов, которые позволили выполнить их структурный и частотный анализ. Установлен механизм отслеживания давления в исполнительных элементах привода. Предложена методика обоснования выбора расчётных схем следящих пневмоаппаратов. Разработаны методики учёта ёмкости трубопровода при динамическом расчёте, преобразование пневмоцепей, определения пропускной способности пневмосопротивлений при экспоненциальном входном воздействии. Разработан и изготовлен стенд для исследования динамики следящих пневмоаппаратов и пневмоцепей. Результаты эксперимента подтвердили теоретические положения диссертации.

Выполненные исследования создают основы теории следящих пневмоаппаратов и способствуют развитию работ по динамике следящих пневмоприводов мобильных машин.

Гіль Святлана Валяцінаўна

## ДЫНАМІКА СЛЯДЗЯЧЫХ ПНЕЎМАТЫЧНЫХ АПАРАТАЎ МАБІЛЬНЫХ МАШЫН

*Ключавыя словы:* тармажны кран, паскаральны клапан, дынаміка пнеўмапрывадаў, нелінейныя і лінейныя матэматычныя мадэлі, мабільныя машыны.

*Аб'ект і прадмет даследавання.* У дысертцыі асноўная ўвага напраўлена на даследаванне дынамікі слядзячых апаратаў з рознымі тыпамі адваротных сувязяў пнеўмасістэм мабільных машын.

*Мэта работы* – распрацоўка метада дынамічнага разліку слядзячых апаратаў з рознымі тыпамі адваротных сувязяў пнеўматычных сістэм мабільных машын.

Пры правядзенні даследаванняў выкарыстаны асноўныя палажэнні механікі вадкасці і газу, тэорыі аўтаматычнага кіравання, тэорыі праектавання гідрапнеўмасістэм, метады матэматычнага мадэліравання з прымяненнем ЭВМ, эксперыментальныя метады з прымяненнем асцылаграфічнай апаратуры.

Распрацаваны нелінейныя матэматычныя мадэлі тармажнага крана і паскаральнага клапана. Яны ўлічваюць масу рухомых элементаў, асноўныя нелінейнасці, пераменныя праходныя сцяжэнні клапаноў, абумоўленыя дзеяннем пнеўмамеханічнай адмоўнай адваротнай сувязі. Мадэлі апісваюць служэбныя і экстранныя рэжымы работы апаратаў. Атрыманы лінейныя мадэлі апаратаў, якія дазволілі выканаць структурны і частотны аналіз. Устаноўлены механізм сачэння за ціскам ў выканаўчых элементах прывада. Прапанавана метадыка абгрунтавання выбару разліковых схем слядзячых пнеўмаапаратаў. Распрацаваны метадыкі ўліку ёмістасці трубаправода пры дынамічным разліку, пераўтварэння пнеўмаланцугоў, вызначэння прапускной здольнасці пнеўмасупраціўленняў пры экспаненцыяльным узаходным уздзеянні. Распрацаваны і выраблены стэнд для даследавання дынамікі слядзячых пнеўмаапаратаў і пнеўмаланцугоў. Вышкі эксперыmenta пацвердзілі тэарэтычныя палажэнні дысертцыі.

Выкананыя даследаванні ствараюць асновы тэорыі слядзячых пнеўмаапаратаў і спрыяюць развіццю работ па дынаміке слядзячых пнеўмапрывадаў мабільных машын.

## SUMMARY

Gil Svetlana Valentinovna

### DYNAMICS OF THE TRACKING PNEUMATIC DEVICES OF MOBILE MACHINES

Key words: the brake crane, acceleration valve, dynamics of pneumodrives, nonlinear and linear mathematical models, mobile machines.

Object and subject of a research. In a dissertation the basic attention is directed on a research of dynamics of the tracking devices with various types of feed-backs of the pneumosystems of mobile machines.

The aim of dissertation - development of a method of dynamic account of tracking devices with various types of feed-backs of pneumatic systems of mobile machines.

In a dissertation the basic positions of a mechanics of a liquid and gas, theory of automatic control, theory of projection hydraulic and pneumosystems, methods of mathematical modelling with application of the computer, experimental methods with application the oscillograph are used.

The nonlinear mathematical models of the brake crane and acceleration valve are developed. They take into account masses of the mobile elements, basic nonlinearities, variable through passage cuts of valves, which are stipulated by an operation of a pneumomechanical negative feed-back. The models describe service and emergency modes of operations of devices. The linear models of devices are obtained. They have allowed to execute their structural and frequency analysis. The mechanism of observation of pressure in the executive elements of a drive is installed. The technique of the substantiation of a choice of the calculated circuits of tracking pneumodevices is offered. The techniques of the account of a capacity of the pipeline for want of dynamic account, transformation of pneumocircuits, definition of a channel capacity of pneumoresistances for want of exponential entering action are developed. Is developed and the complex stand for a research of dynamics of the tracking pneumodevices and pneumocircuits is made. The outcomes of experiment have confirmed theoretical positions of a dissertation.

The carried out researches create a fundamentals of the theory of the tracking pneumodevices and promote development of works on dynamics of the tracking pneumodrives of mobile machines.

ГИЛЬ Светлана Валентиновна

**ДИНАМИКА СЛЕДЯЩИХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ  
МОБИЛЬНЫХ МАШИН**

05.02.03 – Системы приводов

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Корректор М.П. Антонова.

Подписано в печать 19.10.2000.

Формат 60×84 1/16. Бумага тип. №2. Офсет. печать.

Усл. печ. л. 1,4. Уч.-изд. л. 1,1. Тираж 100. Зак. 615.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусская государственная политехническая академия.

Лицензия ЛВ №155 от 30.01.98. 220027, Минск, пр. Ф. Скорины, 65.