

На правах рукописи

**Буханченко Сергей Евгеньевич**

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ  
ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ И СМАЗОЧНЫХ СРЕД В СТАТИЧЕСКОМ И  
ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМАХ**

01.02.06 – Динамика, прочность машин,  
приборов и аппаратуры

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2005

Работа выполнена на кафедре “Автоматизация и роботизация в машиностроении” Томского политехнического университета

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Пушкаренко Алексей Борисович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Максименко Андрей Алексеевич**

кандидат технических наук, доцент  
**Мельков Виктор Иванович**

Ведущая организация: Институт физики прочности и  
материаловедения СО РАН г. Томск

Защита состоится « 28 » декабря 2005 г. в 15 час. 00 мин на заседании диссертационного Совета Д 212 269 01 при Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, ТПУ

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета по адресу: 634050, г. Томск, ул. Белинского, 53-а.

Автореферат разослан

« 24 » ноября 2005 г

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.269.01  
кандидат технических наук, доцент

  
**Т.Г. Костюченко**

2006-У  
26275

224491

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Около 85...90% узлов машин выходит из строя из-за износа, а расходы на их восстановление составляют 30...40% стоимости новой машины. Переход к более тяжелым и необычным условиям работы машин в сочетании с ростом их стоимости и ответственности выполняемой задачи приводит к необходимости обеспечения высокой надежности

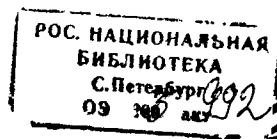
Решение этой проблемы заключается в выявлении резервов повышения долговечности посредством целенаправленного эксперимента. При этом эффективность контроля триботехнических характеристик конструкционных материалов и смазочных сред определяется средствами испытаний, позволяющих за короткое время получать оценку показателей трения и изнашивания не только в статических условиях, которые в большинстве случаев не применимы для существующих узлов трения, но и динамических, эмитирующих реальные условия эксплуатации. Вследствие этого одним из важнейших принципов организации и постановки эксперимента является комплексный подход, позволяющий оценивать в совокупности все факторы, влияющие на результаты эксперимента с учетом уже полученных результатов статических испытаний узлов трения.

Однако до сих пор не решена проблема сопоставимости результатов испытаний, полученных при помощи различных средств испытаний на трение и износ, реализующих одни и те же схемы трения. Иногда расхождение достигает 100%. Следовательно, основное требование, предъявляемое к современным триботехническим средствам испытания – это возможность управлять условиями проведения экспериментов для обеспечения максимально возможного подобия (*геометрического, кинематического и динамического*) режимов работы реальной машины. Такие средства испытания позволяют получить, в одних случаях, уточненные данные по триботехническим свойствам для статических режимов работы узла трения, а в других – получить совершенно новые данные, характеризующие поведение конструкционных материалов и смазочных сред в условиях, максимально приближенным к реальным условиям функционирования узлов трения машин.

**Цель настоящей работы.** Создание и исследование автоматизированного комплекса для триботехнических испытаний конструкционных материалов и смазочных сред в статическом и динамическом режимах. Комплекс должен воспроизводить реальные законы нагружения узлов трения с учетом геометрического, кинематического и динамического подобия.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- *определение целесообразных принципов физического моделирования триботехнических испытаний с позиции приближения испытаний к реальным условиям эксплуатации узлов трения машин и механизмов;*



- *определение основных требований, позволяющих обеспечить достоверность и воспроизводимость статических и динамических результатов триботехнических испытаний;*
- *определение параметров систем автоматизированного комплекса, реализующего режимы испытания, максимально приближенные к реальным условиям эксплуатации узлов трения машин и механизмов;*
- *разработка и экспериментальная апробация методик совмещенных ускоренных триботехнических испытаний на автоматизированном комплексе в статических и динамических режимах;*
- *построение и исследование математической модели автоматизированного комплекса, реализующего динамические режимы нагружения узла трения;*
- *выработка рекомендаций по выбору параметров приводов и систем автоматизированного комплекса для увеличения точности приложения удельной нагрузки на исполнительный орган в требуемом его угловом положении при сохранении требуемого закона изменения угловой скорости на различных режимах нагружения.*

**Методы исследования.** В данной работе использованы методы физического моделирования для экспериментального определения характеристик систем и приводов автоматизированного комплекса, методы теорий электро- и гидропривода, теории автоматического регулирования и управления, а также методы математического моделирования с использованием ЭВМ.

**На защиту выносятся:**

- *схемное решение и конструкция автоматизированного комплекса;*
- *методика определения триботехнических характеристик на автоматизированном комплексе;*
- *результаты экспериментальных исследований приводов и систем автоматизированного комплекса;*
- *результаты теоретического исследования математической модели автоматизированного комплекса.*

**Научная новизна** данной диссертационной работы заключается в:

- *установлении принципов физического моделирования средств и методик триботехнических испытаний применительно к динамическим условиям работы узлов трения с позиции обеспечения максимальной достоверности и воспроизводимости результатов испытаний;*
- *разработке и реализации принципиальной схемы автоматизированного комплекса для ускоренного определения триботехнических свойств конструкционных материалов и смазочных сред при их физико-химическом взаимодействии в конкретный момент времени при определенном положении контртела;*

- разработке методик определения основных триботехнических свойств материалов при статическом и динамическом режимах испытания на автоматизированном комплексе;
- разработке и исследовании математической модели автоматизированного комплекса.

**Практическая ценность.** Впервые разработана конструкция автоматизированного комплекса и методика ускоренного определения триботехнических свойств материалов при их физико-химическом взаимодействии в конкретный момент времени при определенном положении контртела, позволяющие за короткое время получать всестороннюю оценку показателей трения и изнашивания. Результаты данной работы были учтены при создании промышленного образца автоматизированного комплекса.

**Реализация результатов работы** заключается во внедрении промышленного образца автоматизированного комплекса и методики совмещенных ускоренных испытаний материалов в Центре измерения физических и экспериментальных характеристик новых материалов и покрытий научно-исследовательского института ядерной физики, созданного при поддержке Минпромнауки РФ, американского фонда CRDF и Администрации Томской области. Подписано лицензионное соглашение на право мелкосерийного производства автоматизированного комплекса.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на Международных научно-практических симпозиумах *Славянтрибо-4 “Трибология и транспорт”* и *Славянтрибо-5 “Наземная и аэрокосмическая трибология – 2000: проблемы и достижения”* (С-Петербург, 1997, 2000), II-ой и III-ей Международных научно-технических конференциях *“Динамика систем, механизмов и машин”* (Омск, 1997, 1999), VIII-ой Международной научно-технической конференции по динамике и прочности автомобиля (Москва, 2000), VI-ом Международном симпозиуме INSYCONT’02 *“Новые достижения в трибологии”* (Краков, Польша, 2002), IX-ой Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск, 2003), а также на Международной научно-практической конференции-выставке *“Триботех 2003”* (Москва, 2003).

**Публикации.** По материалам данной диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ и получено 2 патента РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка использованной литературы (115 наименований) и приложения. Работа изложена на 165 страницах машинописного текста и содержит 6 таблиц, 128 рисунков, иллюстраций и фотографий, 4 приложения, 112 формул.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрено состояние проблемы, обоснована ее актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, дана краткая аннотация содержания глав и изложены основные положения, выносимые на защиту

В первой главе приводится объяснение отсутствия средств испытаний, реализующих идею распознавания состояния узла трения, которое приводит к появлению проблемы сопоставимости результатов испытаний. Поясняется, что для создания новых и совершенствования уже созданных средств испытаний необходимо выявить и заложить минимум наиболее значимых принципов физического моделирования с позиции обеспечения геометрического, кинематического и динамического подобия реальным узлам трения машин. При его определении рассмотрены критерии, принципы и допущения на основе представления о влиянии на триботехнические характеристики узлов трения, как внешних параметров, так и характера объектов испытаний в начальном состоянии и их адаптационной способности, зависящей от внешних условий.

Установлено, что для получения достоверных результатов необходимо строгое и точное воспроизведение, а также поддержание в процессе испытаний всех контролируемых условий и режимов трения (*сухое, граничное, полужидкостное, жидкостное*).

Сформулирован и представлен перечень контролируемых параметров, необходимый и достаточный для достижения требуемой степени приближения моделирующих испытаний к реальным условиям работы узлов трения.

На основе литературного обзора выявлены четыре группы факторов, влияющих на триботехнические характеристики узла трения, и установлена категория испытаний. Наиболее привлекательным в соответствии с задачами данной работы является моделирование эксплуатационных режимов трения в лабораторных условиях.

Рассмотрены и проанализированы существующие на сегодня схемы трения. Обоснован выбор, в качестве объекта исследования, схемы трения "вал - колодки" (рис. 1) учитывая возможность воспроизведения на модельном узле трения нагруженного состояния, типа движения, а также температурного режима, имеющего место в натурном узле трения.

Исследование, выполненное в данной главе, позволило определить требования, предъявляемые к приводам и системам автоматизированного комплекса

Установлено, что компьютерное управление, регистрация и обработка данных позволяют с высокой степенью точности исследовать влияние различных факторов на динамические характеристики приводов и систем автоматизированного комплекса.



Рис. 1. Схема трения "вал - колодки"

На основании вышеизложенного сформулированы основные задачи данной диссертационной работы.

Во второй главе рассматривается принципиальная схема и конструкция автоматизированного комплекса для триботехнических испытаний конструкционных материалов и смазочных сред в статических и динамических режимах, конструкции его приводов и систем, устройство и принцип работы датчиков, используемых для регистрации динамических процессов, излагается оригинальная методика испытаний в статическом и динамическом режимах.

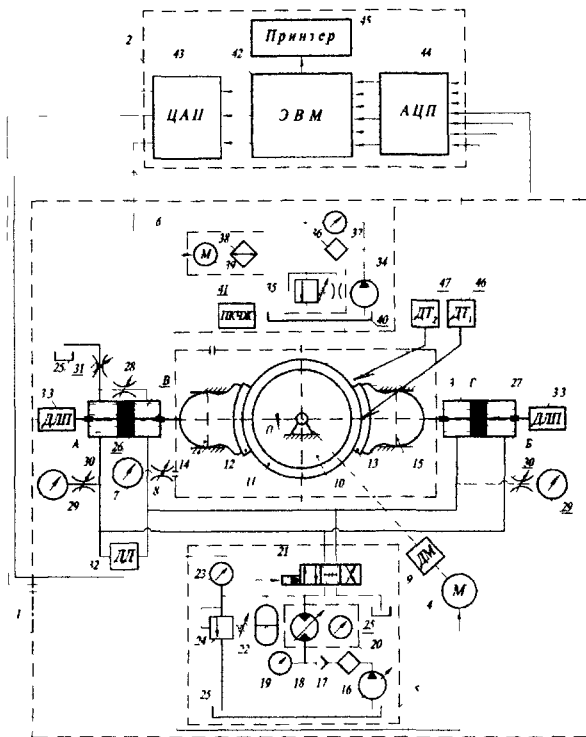
Принципиальная схема комплекса представлена на *рис. 2*, а его внешний вид на *рис. 3*. Схемные решения и конструкции автоматизированного комплекса и испытательной камеры защищены патентами РФ. Опытный образец комплекса разработан автором, установлен и эксплуатируется на кафедре "Автоматизация и роботизация в машиностроении" Томского политехнического университета. Он состоит из следующих основных узлов, приводов и систем: система управления 2, испытательная камера 3, привод вращения контртела 4, система нагружения узла трения 5, система подготовки смазочной среды 6.

Конструкция автоматизированного комплекса реализует схему трения "вал - колодки" и позволяет управлять тремя основными параметрами (скорость вращения контртела 11, усилие нагружения трибосопряжения, температура смазочной среды в испытательной камере 3), а также осуществлять регистрацию семи параметров (угловое положения вала привода вращения 4, усилие нагружение датчиком 32, момент трения датчиком 9, линейный износ 12 и 13 датчиками 33, температуру материала колодки 13 на максимально близком расстоянии к зоне трения датчиком 46, температуру смазочной среды в камере 3 датчиком 47).

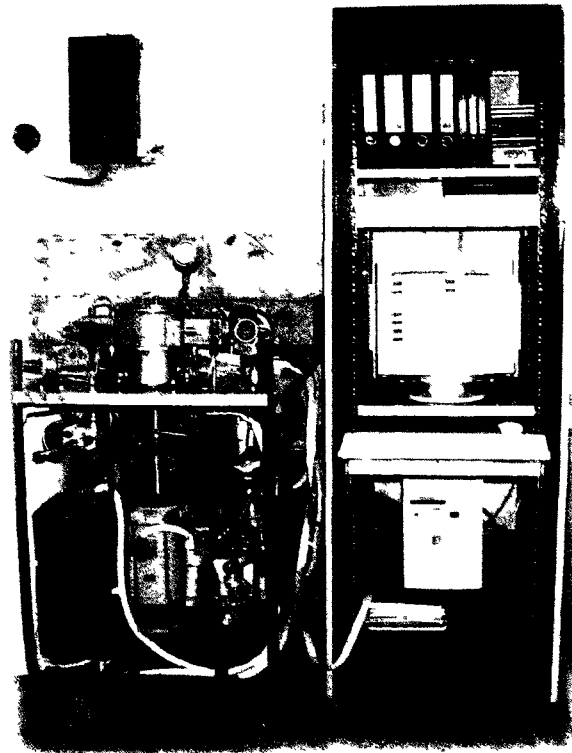
На основе анализа, проведенного в первой главе работы, в качестве привода контртела на комплексе использован программно-управляемый электропривод с двигателем постоянного тока (ЭДПТ), структурная схема которого представлена на *рис. 4*, а диаграмма его работы на *рис. 5*, в качестве системы нагружения использован гидропривод с элементами пропорционального управления структурная схема которого представлена на *рис. 6*.

Элементом задания усилия нагружения является дросселирующий гидрораспределитель, который в системе нагружения может быть подключен по двум схемам, представленным на *рис. 7*. Последняя схема позволяет достигнуть максимальной чувствительности и протяженности линейного участка, характеризующегося отсутствием гистерезиса (*рис. 8*).

Система подготовки смазочной среды осуществляет ее циркуляцию, фильтрацию и терморегуляцию для поддержания определенной величины температуры в испытательной камере благодаря вынужденному и естественному конвективному теплообмену. Показано, что основное количество тепла  $Q_{см}$ , выделяющегося при трении и поглощаемого смазочной средой и определяется как



**Рис. 2.** Принципиальная схема автоматизированного триботехнического комплекса.



**Рис. 3.** Внешний вид автоматизированного триботехнического комплекса.



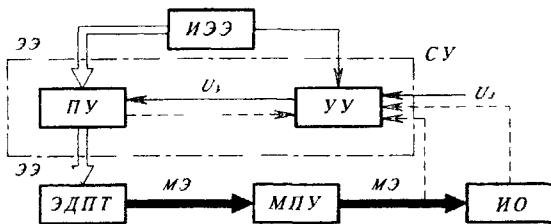


Рис. 4. Структурная схема электропривода движения контрбела.

ИЭЭ – источник эл. энергии;  
 ПУ – преобразовательное устройство;  
 УУ – управляющее устройство;  
 МПУ – механическое передаточное устройство;  
 ИО – исполнительный орган;  
 ЭЭ – электроэнергия;  
 СУ – система управления;  
 МЭ – механическая энергия.

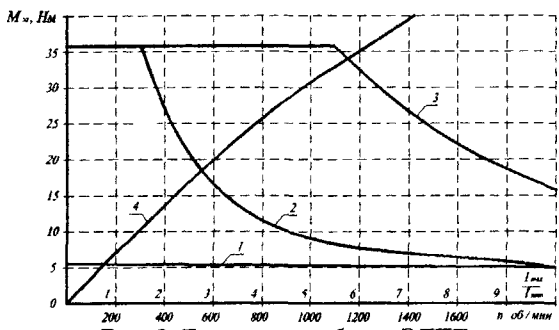


Рис. 5. Диаграмма работы ЭДПТ.

1 – продолжительный режим;  
 2 – повторно-кратковременный режим;  
 3 – режим с частыми пусками и торможениями;  
 4 – зависимость момента от отношения максимального тока к номинальному.

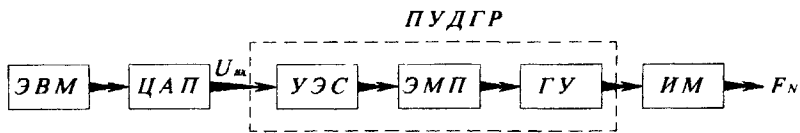


Рис. 6. Структурная схема гидропривода с цифровым управлением:  
 ПУДГР – программно-управляемый дроселирующий гидрораспределитель; УЭС – усилитель электрических сигналов; ЭМП – электромеханический преобразователь; ГУ – гидравлический усилитель; ИМ – исполнительный механизм.

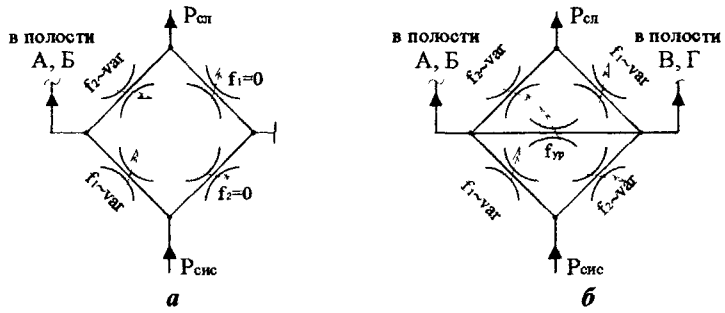


Рис. 7. Схемы возможного подключения ДГР.

$$Q_{см} = (T_n^{cp} - T_{см}) c_{см} \gamma_{см} w \xi_{см}, \quad (1)$$

где  $T_n^{cp}$  - средняя температура поверхности элементов пары трения;  
 $T_{см}$  - температура смазочной среды;  $c_{см}$  - теплоемкость смазочной среды;  
 $\gamma_{см}$  - удельный вес смазочной среды;  $\xi_{см}$  - коэффициент, зависящий от типа масляных канавок и расхода смазочной среды  $w$ .

Для поддержания требуемой температуры среды в испытательной камере часть этого тепла  $Q_{ног}$  отводится в окружающую среду в соответствии с законом Ньютона - Рихмана

$$Q_{ног} = \alpha_m S_{ох} (T_k - T_{cp}) \tau, \quad (2)$$

где  $\alpha_m$  - коэффициент теплоотдачи;  $S_{ох}$  - площадь поверхности теплообмена;  
 $T_k$   $T_{cp}$  - температура поверхности контртела и среды.

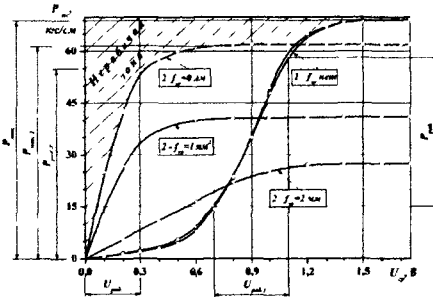


Рис. 8. Статические характеристики системы нагружения.

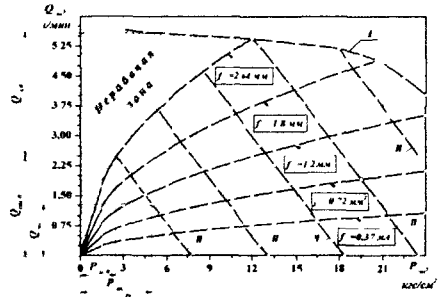


Рис. 9. Статическая характеристика системы подготовки смазочной среды.

Описана система управления, представляющая собой встраиваемый в ISA-шину ЭВМ контроллер, работающий при поддержке специально разработанного автором программного обеспечения. Система позволяет вести одновременное управление параметрами автоматизированного комплекса и съем информации с частотой не менее 80 Гц по каждому из каналов.

Представлено и описано метрологическое обеспечение автоматизированного комплекса, в состав которого входят разработанные и изготовленные автором малоинерционные фотоэлектрические датчики давления и линейного износа, индуктивные датчики положения вала привода вращения контртела и момента трения, датчики температуры.

Изложены разработанные автором методики совмещенных ускоренных статических (рис. 10) и динамических (рис. 11) испытаний, позволяющие проследить динамические изменения триботехнических свойств на антифрикционной, противоизносной и противозадирной стадиях.

Подтверждение практичности и универсальности методики триботехнических испытаний на автоматизированном комплексе, обеспечивающей получение

ние достоверных и воспроизводимых результатов, основывалось исходя из имеющегося набора результатов статических испытаний различных пар трения.

Во-первых, ссылаясь на результаты статических испытаний пар трения (приведены в диссертационной работе), удалось определить требуемые для разработки автоматизированного комплекса параметры основных приводов и систем. Они были получены на основе анализа результатов статических испытаний пар трения на несущую способность (противозадирность).

Во-вторых, используя результаты статических данных, полученных на серийных машинах трения (УМТ-1, СМТ-1), определялась их сопоставимость с результатами испытаний пар трения на автоматизированном комплексе.

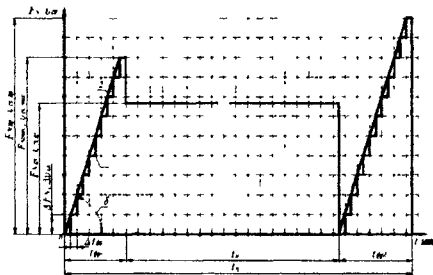


Рис. 10. Циклы статических режимов испытаний

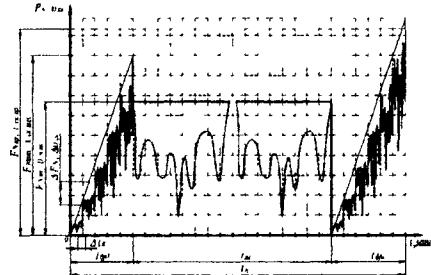


Рис. 11. Цикл динамического режима испытаний.

На рис. 12 представлены результаты испытаний пары трения по разработанной методике на автоматизированном комплексе. Проанализировав результаты этих испытаний, было установлено, что расхождение составляет 3,5...4,7% (в зависимости от интенсивности изменения нагружения) при соблюдении геометрического, кинематического и динамического подобия при испытаниях по схеме трения “вал - колодки”.

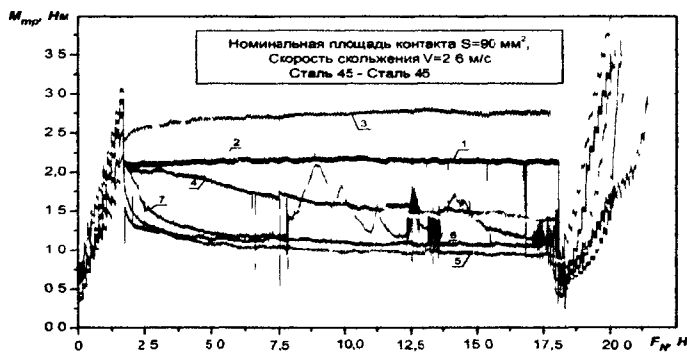


Рис. 12. Влияния УДФ металлов на триботехнические характеристики трибосистемы на всех стадиях эксперимента.

- 1 - SAE20 + Cu(CO<sub>2</sub>);
- 3 - SAE20 + Cu(Ar); 4 - SAE20 + Cu(Ar+O<sub>2</sub>);
- 5 - SAE20 + Zn; 6 - SAE20 + латунь;
- 7 - SAE20 + Cu(N<sub>2</sub>).

Испытания по разработанным методикам также позволяет определять коэффициент трения не только в момент приложения нагрузки, но и в процессе "приспосабливаемости" узла трения к изменяющимся режимам нагружения. Кроме того, визуально можно определить наиболее интересные для исследователя промежутки испытания для последующего, более детального анализа с использованием специального программного обеспечения.

В третьей главе изложено построение физической (рис. 13) и математической моделей, а также приведена структурная схема автоматизированного комплекса (рис. 14).

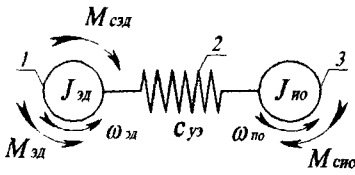


Рис.13. Физическая модель привода вращения контртела.

$J_{эд}, J_{но}$  – моменты инерции ротора ЭДПТ и исполнительного органа;

$M_{эд}, M_{сэд}, M_{сно}$  – моменты: электромагнитный, сопротивления ЭДПТ, сопротивления исполнительного органа;

$\omega_{эд}, \omega_{но}$  – угловые скорости вращения ЭДПТ и исполнительного органа;

$c_{уз}$  – крутильная жесткость упругого элемента.

Согласно структурной схеме работа привода вращения исполнительного органа описывается следующей системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} J_{эд} \frac{d^2 \varphi_{эд}}{dt^2} = k_{y_1 k_{y_3}} U_{эс1} + k_{y_1 k_{y_3} k_{\varphi\varphi}} \varphi_{эд} - k_{y_1 k_{y_3} k_{\varphi\varphi}} \varphi_{но} - k_{y_3 k_{эс0}} \frac{d\varphi_{эд}}{dt} - \\ - k_{эс0} \frac{d\varphi_{эд}}{dt} - c_{y_3} \varphi_{эд} + c_{y_3} \varphi_{но} \\ J_{но} \frac{d^2 \varphi_{но}}{dt^2} = c_{y_3} \varphi_{эд} - k_{сно} \frac{d\varphi_{но}}{dt} - c_{y_3} \varphi_{но} - M_{мп} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} T_1^2 \frac{d^2 \varphi_{эд}}{dt^2} + 2\xi_1 T_1 \frac{d\varphi_{эд}}{dt} + \varphi_{эд} = K_1 U_{эс1} + \varphi_{но} \\ T_2^2 \frac{d^2 \varphi_{но}}{dt^2} + 2\xi_2 T_2 \frac{d\varphi_{но}}{dt} + \varphi_{но} = \varphi_{эд} + K_2 M_{мп} \end{cases} \quad (4)$$

где введены следующие обозначения

$$T_1 = \sqrt{\frac{J_{эд}}{c_{y_3} - k_{y_1 k_{y_3} k_{\varphi\varphi}}}} \quad \text{– постоянная времени системы "ЭДПТ - упругий элемент};$$

$$\xi_1 = \sqrt{\frac{J_{эд}}{c_{y_3} - k_{y_1 k_{y_3} k_{\varphi\varphi}}} \frac{(k_{эс0} + k_{y_3} \cdot k_{эс0})}{2 \cdot J_{эд}}} \quad \text{– коэффициент затухания колебаний системы "ЭДПТ - упругий элемент"};$$

$$K_1 = \frac{k_{y_1 k_{y_3}}}{(c_{y_3} - k_{y_1 k_{y_3} k_{\varphi\varphi}})} \quad \text{– суммарный коэффициент усиления привода главного движения исполнительного органа};$$

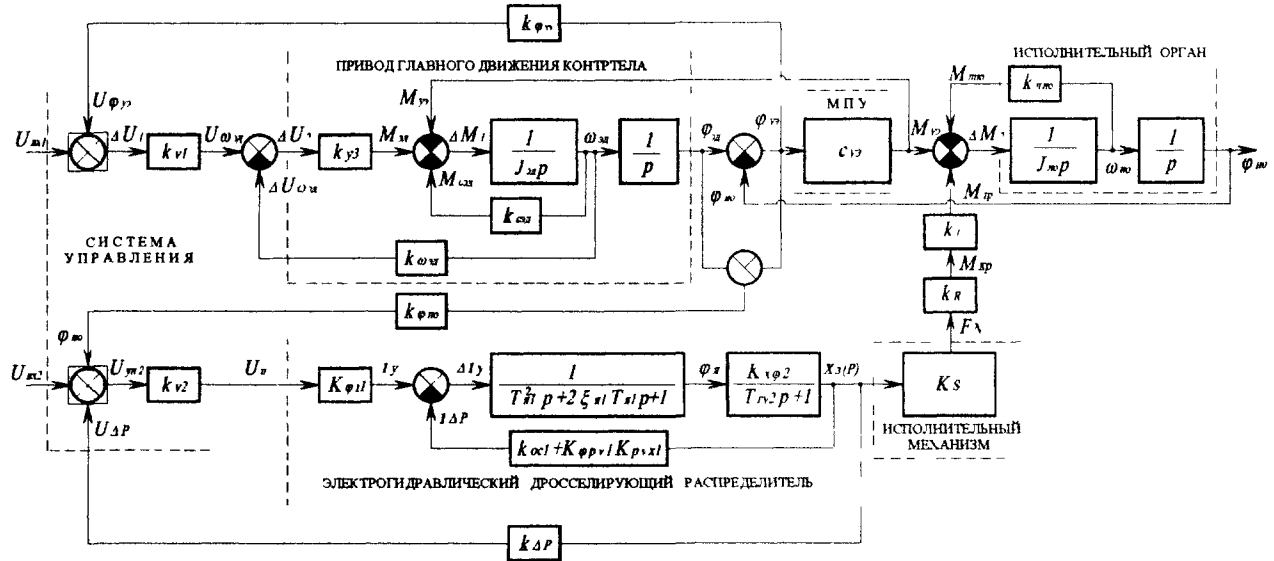


Рис. 14. Структурная схема автоматизированного триботехнического комплекса.

$$T_2 = \sqrt{\frac{J_{uo}}{c_{y3}}} - \text{постоянная времени системы "исполнительный орган - упругий элемент"};$$

$$\xi_2 = \sqrt{\frac{J_{uo}}{c_{y3}}} \frac{k_{mю}}{2 \cdot J_{uo}} - \text{коэффициент затухания колебаний системы "исполнительный орган - упругий элемент"}.$$

$$K_2 = \frac{1}{c_{y3}} - \text{интенсивность изменения момента трения}.$$

Из системы уравнений (4) получены две передаточные функции Первая при  $\varphi_{ю0} \equiv 0$  из первого уравнении системы (4)

$$W_1(p) = \frac{\varphi_{зд}}{U_{вх1}} = \frac{K_1}{T_1^2 p^2 + 2 \xi_1 T_1 p + 1}, \quad (5)$$

характеризует изменение угловой скорости ЭДПТ  $\varphi_{зд}$  от поданного напряжения на вход системы управления  $U_{вх1}$  при отсутствии угла поворота исполнительного органа  $\varphi_{ю0}$ .

Вторая передаточная функция при  $\varphi_{зд} \equiv 0$  из второго уравнении

$$W_2(p) = \frac{\varphi_{ю0}}{M_{тр}} = \frac{K_2}{T_2^2 p^2 + 2 \xi_2 T_2 p + 1}, \quad (6)$$

характеризует изменение  $\varphi_{ю0}$  от момента трения  $M_{тр}$  на исполнительном органе при отсутствии угла поворота вала ЭДПТ.

Для автоматизированного комплекса было произведено экспериментальное определение собственной частоты колебаний системы "ЭДПТ - упругий элемент", которая составила 28 Гц. Таким образом, удалось определить постоянную времени  $T_1=0,0357$  с и произведение коэффициентов  $k_{y1}$ ,  $k_{y3}$ ,  $k_{\varphi_{ю}}$ . Собственная частота колебаний системы "упругий элемент - исполнительный орган" составляет 125Гц, при этом постоянная времени  $T_2=0,008$ с.

То есть, привод главного движения исполнительного органа состоит из низкочастотной и высоко частотной частей. Причем на высокочастотную часть воздействует усилие нормального нагружения, в результате которого возникает некоторый момент трения. Величина этого момента (в данном случае он является демпфирующим) может изменяться от 0...5,2 Нм и зависит от режима трения, усилия нормального нагружения, скорости скольжения и т.д.

В четвертой главе теоретически исследована математическая модель автоматизированного комплекса при помощи ЭВМ на различных режимах нагружения узла трения (рис 15).

На рис. 16 видно, что введение обратной связи по углу закручивания упругого элемента позволяет обеспечить постоянство и стабильность поддержания программно-заданного закона изменения угловой скорости вращения вала ЭДПТ, соответственно позволяет обеспечить точность его угла поворота.

Однако для обеспечения постоянства и стабильности угловой скорости вращения исполнительного органа, а соответственно и его угла поворота этого введения достаточно только при отсутствии нагрузки. При приложении нагрузки дополнительно необходимо значительно увеличить жесткость упругого элемента (рис. 17). Это требует установить на автоматизированном комплексе более чувствительное измерительное оборудование для измерения угла закручивания упругого элемента.

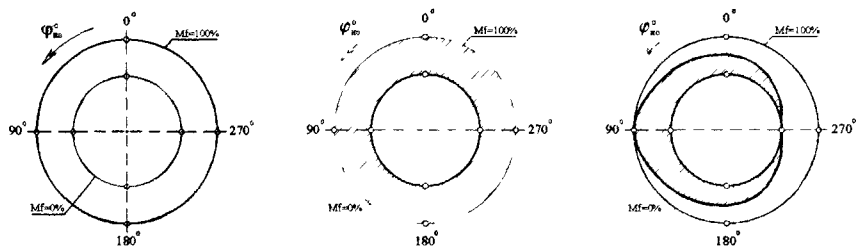


Рис. 15. Исследованные схемы нагружения.

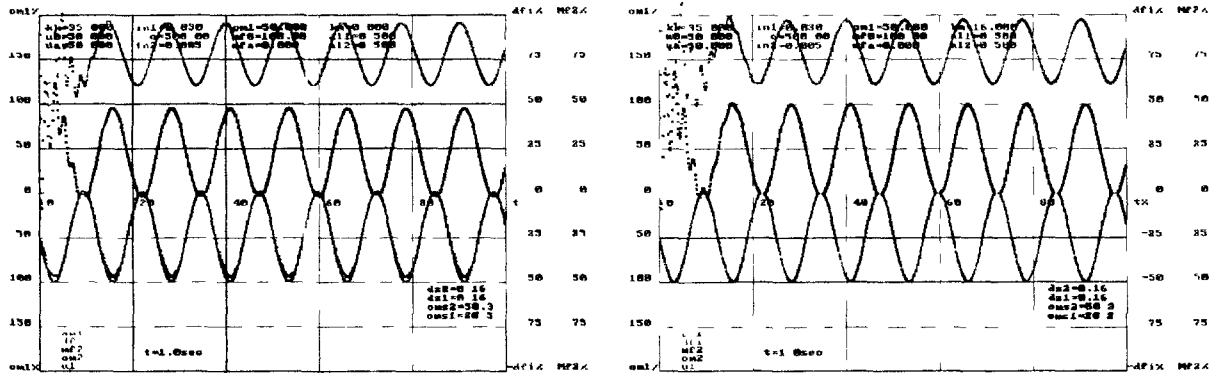
Исследование частотных характеристик автоматизированного комплекса показало, что ее вид изменяется при изменении одного из управляемых параметров (рис. 18). Гораздо большее и непредсказуемое влияние на изменение частотной характеристики автоматизированного комплекса оказывает изменение нагрузки.

С точки зрения увеличения частотного диапазона работы автоматизированного комплекса было исследовано влияние степени демпфирования ЭДПТ и исполнительного органа (поскольку собственные частоты систем “ЭДПТ – упругий элемент” и “упругий элемент – исполнительный орган” существенно отличаются). Оказалось, что увеличение демпфирования этих узлов приводит к существенному расширению частотного диапазона (рис. 19).

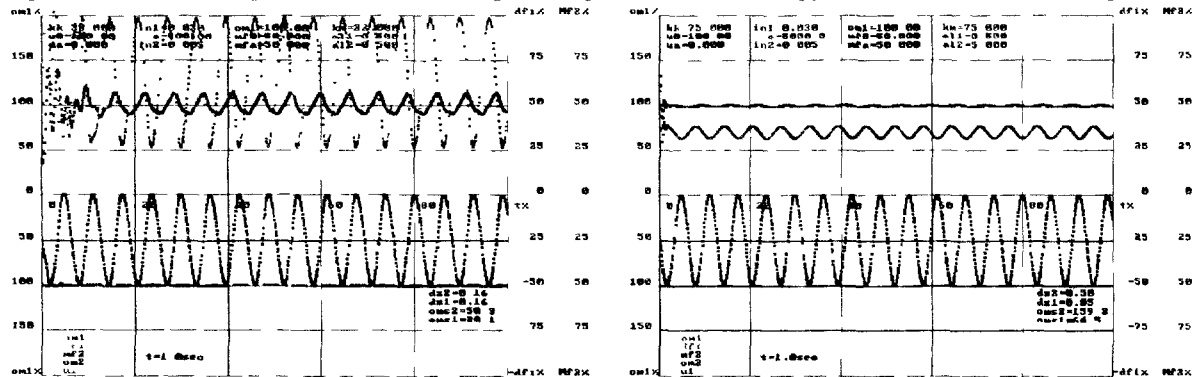
Таким образом, для воспроизведения каких-либо режимов нагружения на автоматизированном комплексе требуется изначально определить возможные частотные диапазоны его работы путем моделирования конкретной конструкции комплекса при помощи ЭВМ.

С учетом вышеизложенного был разработан и внедрен промышленный образец автоматизированного триботехнического комплекса для триботехнических испытаний конструкционных материалов и смазочных сред в статическом и динамическом режимах. Данный комплекс установлен в Центре измерения физических и экспериментальных характеристик новых материалов и покрытий научно-исследовательского института ядерной физики г. Томск. С научно-исследовательским институтом ядерной физики подписано лицензионное соглашение на право мелкосерийного производства комплекса.

В заключении приведены общие результаты диссертационной работы.



*Рис. 16. Влияния обратной связи по углу закручивания упругого элемента (режим заданной переменной угловой скорости при постоянной нагрузке на исполнительный орган).*



*Рис. 17. Влияние соотношения потерь на трение в исполнительном органе и жесткости упругого элемента (режим заданной постоянной угловой скорости при переменной нагрузке на исполнительный орган).*



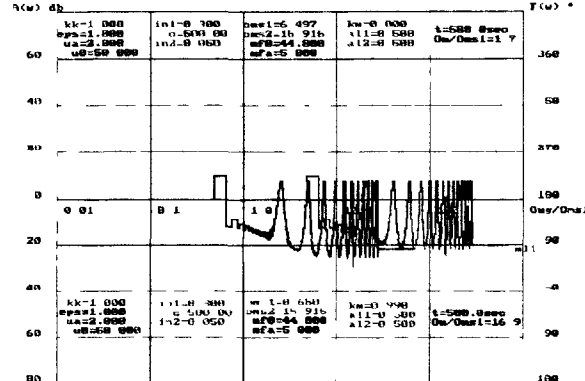
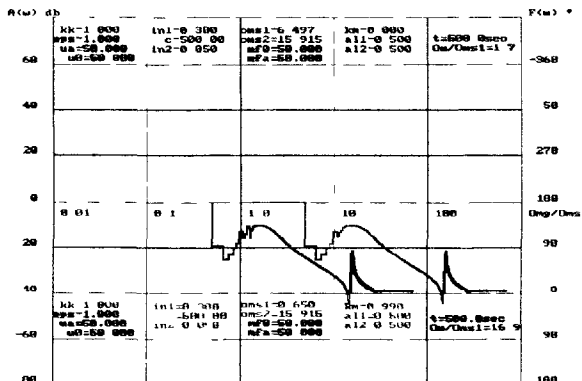


Рис. 18. Частотные характеристики автоматизированного комплекса при различных законах нагружения.

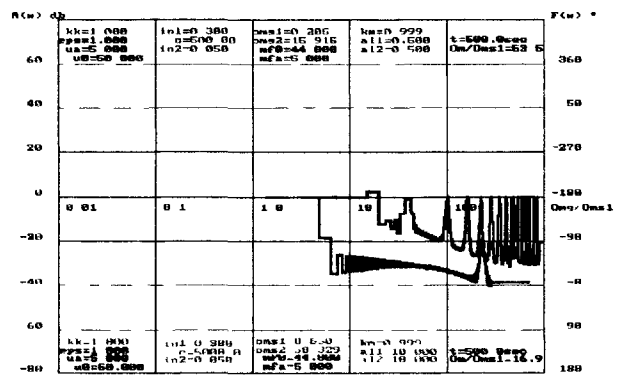
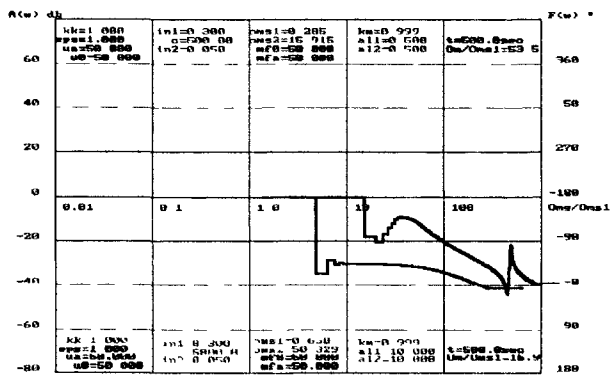


Рис. 19. Изменение частотной характеристики при введении постоянного демпфирования ЭДПТ и исполнительного органа.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Установлены основные принципы физического моделирования статических и динамических режимов нагружения узлов трения с учетом геометрического, кинематического и динамического подобия.
2. Определены основных требований, позволяющих обеспечить достоверность и воспроизводимость результатов триботехнических испытаний.
3. Обоснован выбор схемы трения “вал - колодки” в качестве исследуемого узла трения на автоматизированном комплексе
4. Определены и реализованы в конструктивном исполнении комплекса требуемые параметры его приводов и систем с учетом возможности воспроизведения динамических режимов нагружения исходя из экспериментально полученных результатов испытаний трибосопряжений по схеме трения “вал - колодки” на универсальных машинах трения УМТ-1 и СМТ-1
5. Проведен анализ и обоснован выбор метрологического обеспечения автоматизированного комплекса с позиций его применимости для реализации динамических режимов нагружения узла трения.
6. Впервые создана работоспособная конструкция автоматизированного комплекса для испытания трибосопряжений в статических и динамических режимах, схемное решение которого подтверждено двумя патентами РФ.
7. Определены статические и динамические параметры приводов и систем созданного автоматизированного комплекса.
8. На основании проведенных статических испытаний пар трения подтверждена сопоставимость получаемых результатов триботехнических испытаний на автоматизированном комплексе с результатами, полученных на универсальных машинах трения УМТ-1 и СМТ-1.
9. Впервые разработана методика проведения совмещенных ускоренных испытаний на различных режимах нагружения трибосопряжения.
10. Апробация методики показала ее практичность и универсальность как для статических, так и для динамических режимов нагружения пар трения.
11. Разработаны и описаны физическая и математическая модели автоматизированного комплекса с учетом возможности воспроизведения динамических режимов нагружения исполнительного органа при сохранении требуемого закона изменения его угловой скорости вращения
12. Выявлено, что привод главного движения исполнительного органа состоит из низкочастотной и высокочастотной частей. При этом высокочастотная часть подвергается переменному демпфированию в результате возникновения момента трения в трибосопряжении
13. Разработана компьютерная программа для исследования математической модели автоматизированного комплекса на ЭВМ.
14. Установлено, что введение обратной связи по углу закручивания упругого элемента позволяет обеспечить постоянство и стабильность поддержания

программно-заданного закона изменения угловой скорости вращения вала ЭДПГ, соответственно позволяет обеспечить точность его угла поворота.

15. Выявлено, что обеспечить постоянство и стабильность угловой скорости вращения исполнительного органа, а соответственно и его угла поворота, путем введения обратной связи по углу закручивания упругого элемента возможно только при отсутствии нагрузки. В противном случае необходимо увеличить жесткость упругого элемента. Однако это потребует, в свою очередь, установить на комплексе более чувствительное метрологическое обеспечение для измерения угла закручивания упругого элемента
16. Установлено, что частотные характеристики существенно изменяются при незначительном изменении одного из управляемых параметров. Показано, что значительно большее и непредсказуемое влияние на изменение частотной характеристики комплекса оказывает приложенное нормальное давление нагрузки.
17. Обосновано, что для воспроизведения каких-либо режимов нагружения требуется изначально определить возможные частотные диапазоны путем моделирования конкретной конструкции комплекса при помощи ЭВМ.
18. Полученные результаты теоретических исследований математической модели учтены при разработке и создании промышленного образца автоматизированного триботехнического комплекса.

#### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. *Буханченко С.Е., Ларионов С.А., Пушкаренко А.Б. Автоматизированный комплекс для испытания трибосопряжений в статическом и динамическом режиме // Труды десятой научной конференции. – Юрга: ТПУ, 1997. С. 126.*
2. *Буханченко С.Е., Пушкаренко А.Б. Испытание пар трения при нестационарном нагружении для оптимизации параметров смазок трибомеханизмов // Материалы Международного научно-практического симпозиума Славянтрибо-4 “Трибология и транспорт”. – С-Петербург: РГАТА, 1997. Кн. 4. – С. 68.*
3. *Буханченко С.Е., Ларионов С.А., Пушкаренко А.Б. Автоматизированный комплекс для испытания трибосопряжений в статическом и динамическом режимах // Материалы II Международной научно-технической конференции “Динамика систем, механизмов и машин”. – Омск: ОмГТУ, 1997. Кн. 3. – С. 16.*
4. *Аметов В. А., Буханченко С.Е., Ларионов С.А., Терехов А. Л. Пути совершенствования специализированных комплексов для испытания модельных трибосопряжений на трение и износ в условиях, максимально приближенных к реальным // Научно-технический журнал “Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета”. – Томск: ТГАСУ, №1, 1999. – С. 167-175.*
5. *Буханченко С.Е., Ларионов С.А. Пути совершенствования специализированных комплексов для испытания модельных трибосопряжений в условиях максимально приближенных к эксплуатации // Научно-технический электронный журнал «Трение, износ, смазка». – С-Петербург: НПК «ВМП-АВТО», Том 1, № 3, 1999.*

6. *Буханченко С.Е., Ларионов С.А., Пушкаренко А.Б. Исследование пар трения "40Х (РКС 38) – Сталь 4. жимах в модифицированных смазо научно-техническая конференция 1 Тезисы докладов. – Москва: МАМИ*
7. *Буханченко С.Е., Ларионов С.А., сопряжений на трение и износ в у реальным // Материалы Междунаи зиума Славянтрибо-5. "Наземная ы проблемы и достижения". – С-Петег*
8. *Буханченко С.Е., Пушкаренко А.Б. Исследование пар трения "бронза- сталь", "керамика-сталь" в условиях динамического нагружения // Мате- риалы Международного научно-практического симпозиума Славянтрибо- 5. "Наземная и аэрокосмическая трибология – 2000: проблемы и достиже- ния". – С-Петербург: РГАТА, 2000. – С. 97-98.*
9. *Буханченко С.Е., Пушкаренко А.Б. Специализированные стенды и комплек- сы для испытания модельных трибосопряжений на трение и износ // Меха- ника и машиностроение: Сборник трудов. – Томск: ТПУ, 2000. – С. 186-191.*
10. *Bukhanchenko S.E., Pushkarenko A.B. Research of Friction Pairs in Condi- tions Dynamic Loading // New Achievements in Tribology. Materials of 6<sup>th</sup> International Symposium INSYCONT'02. – Cracow, Poland, 2002. – 7-18 pp.*
11. *Буханченко С.Е., Мартюшев Н.В., Пушкаренко А.Б. Датчик крутящего момента // Современные техника и технологии. Материалы IX Междуна- родной научно-практической конференции студентов, аспирантов и моло- дых ученых. – Томск: ТПУ, 2003. – С. 222-224.*
12. *Буханченко С.Е., Пушкаренко А.Б. Технические и компьютерные средст- ва реализации динамических режимов работы пар трения // Материалы Международной научно-практической конференции " Триботех 2003". – Москва: Глобал Экспо, 2003. – С. 29-30.*
13. *Буханченко С.Е., Ларионов С.А., Пушкаренко А.Б. Испытательная камера машины трения // Патент РФ № 2163013. Оpubл. 10.02.01., Бюл № 4.*
14. *Буханченко С.Е., Ларионов С.А., Пушкаренко А.Б. Автоматизированный комплекс для испытания трибосопряжений на трение и износ в статическом и динамическом режимах // Патент РФ № 2165077. Оpubл. 10.04.01, Бюл. № 10.*

РНБ Русский фонд

2006-4

26275

Подписано к печати 23.11.2005 г.  
 Формат 60x84/16. Бумага ксерокная.  
 Плоская печать. Тираж 100 экз.