

1562356

На правах рукописи

УДК 621.002.5

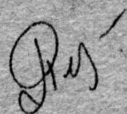
НЕВШУПА РОМАН АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ВЫСОКОВАКУУМНЫХ
МЕХАНИЗМОВ НА ОСНОВЕ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ОБЕЗГАЖИВАЮЩЕГО
ПРОГРЕВА**

Специальность: 05.27.07 – Оборудование производства электронной техники

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**



Москва, 1999

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им Н.Э. Баумана.

Научный руководитель – д.т.н., профессор Деулин Е.А.

Официальные оппоненты – д.т.н., профессор Александрова А.Т.
к.т.н. Папко В.М.

Ведущее предприятие – ГП НИИ «Полюс»

Защита состоится «2» июня 1999 г. на заседании диссертационного Совета К 153.51.01 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Телефон для справок: (095) 267-0963

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим направить по указанному адресу.

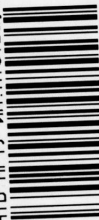
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им Н.Э.Баумана.

Автореферат выдан «28» апреля 1999 г.

1562356

Рябов В.Т.

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1562356

Невшуга Р.А. Повышение наг

1999 г.

Заказ № 77

00 экз.

Типография МГТУ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ



Актуальность проблемы Современное вакуумное технологическое

оборудование, оборудование структурного, физического и химического анализа материалов, космическое и ядерное оборудование невозможно представить без вакуумного привода.

Последние достижения в технологии электронных приборов стали возможны благодаря применению новейших видов оборудования, такого как установки ионной имплантации, электронно-лучевой и рентгеновской литографии, ионного и плазмохимического травления, сборки ФЭП методом переноса и т.д., включающего до 20 операций, осуществляемых в едином технологическом цикле в вакууме. При этом на несколько порядков возрасли требования по вакууму и его парциальному составу: предельное давление $P < 10^{-10}$ Па, рабочий вакуум $P_{\text{раб.}} = 10^{-8} \dots 10^{-9}$ Па, отсутствие углеводородов.

При создании линий, включающих в себя ряд технологических камер-модулей остро встает проблема надежности оборудования, как один из факторов повышения эффективности его эксплуатации. Надежность машин необходима для автоматизации процессов, которые не может реализовать оператор в силу ограниченных физиологических возможностей, для уменьшения огромных затрат на ремонт и убытков от простоя. Проблема устранения аварийных отказов является актуальной в сверхвысоковакуумном технологическом оборудовании, где аварийные отказы ведут к длительным (до двух суток) простоям, связанным с последующим выводом установки на рабочий режим и с потерей дорогостоящих полуфабрикатов.

В космической технике, такой как орбитальные станции, космические корабли, научные спутники и спутники связи, самоходные станции для исследования других планет и др., требования, предъявляемые к надежности привода, особенно высоки, поскольку отказ привода может привести к отказу всего комплекса, стоимость которого исчисляется десятками и сотнями миллионов долларов. Замена отказавших элементов, как правило, либо невозможна, либо сопряжена с огромными сложностями и затратами (вывод 1 килограмма груза на орбиту оценивается в 10 тысяч долларов США), а избыточное резервирование утяжеляет и усложняет конструкцию. Привод должен

иметь высокую надежность при работе в условиях большого перепада температур, воздействия потоков частиц, космического излучения.

Еще более актуальной является задача предотвращения отказов в вакуумных установках ядерного оборудования (Токамак, ИТЭР и др.) и экспериментальных физических установках, что связано с обеспечением экологических требований и безопасностью. Высокая надежность привода здесь также должна обеспечиваться в тяжелых условиях воздействия высоких температур и радиации.

Возрастающие требования к чистоте технологической среды, развитие сверхвысоковакуумной техники и появление оборудования экстремально высокого вакуума ($p < 10^{-10}$ Па) привело к усложнению условий работы привода и в составе технологического оборудования. Достижение столь глубокого вакуума стало возможно благодаря новым технологиям очистки внутренних поверхностей вакуумных камер, специальным методам обработки и пассивирования поверхности, приводящих к уменьшению газовой выделенности, а также тщательному обезгаживанию всей вакуумной системы, заключающемуся в предварительном вакуумном отжиге и последующем обезгаживающем прогреве установки.

Наиболее эффективное обезгаживание происходит при выдержке установки при $T = 400-450^{\circ}\text{C}$ в течение 8-150 ч. и откачке высоковакуумными средствами. Однако, из-за неопределенности процессов, происходящих при таком прогреве в материале деталей привода европейские и мировые стандарты (за исключением России) не позволяют прогревать установку выше $150-250^{\circ}\text{C}$, что значительно снижает эффективность обезгаживания.

Для повышения надежности прогреваемого вакуумного привода необходимо выявить причины возникновения отказов, раскрыть механизм формирования отказов, установить влияние прогрева.

Цель работы. Повышение надежности вакуумного привода на основе учета влияния обезгаживающего прогрева.

Методы исследований. Теоретические исследования проводились на основе использования теории надежности, теории производительности, теории точности, теории машин и механизмов, теории вероятности, теории пластичности и теории

получести. Экспериментальные исследования проводились на специально изготовленных стендах в лаборатории кафедры МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им Н.Э.Баумана. Проведение и обработка результатов экспериментов, оценка их точности и достоверности выполнялись на ЭВМ с применением теории вероятности, математической статистики, регрессионного анализа, численного спектрального оценивания.

Научная новизна

1. Впервые получены статистические данные о величинах деформаций корпусных деталей вакуумного привода в результате обезгаживающего прогрева.

2. Разработана математическая модель формирования выходных параметров герметичных зубчатых вводов вращения: кинематической погрешности, собственного момента сопротивления, потока газовыделения, - на основе учета влияния остаточных деформаций деталей привода в результате прогрева.

3. Впервые предложена формула для расчета параметра потока внезапных отказов из-за незапуска или заклинивания привода, учитывающая влияние первичных погрешностей, в том числе и остаточную деформацию деталей привода в результате прогрева.

4. Разработана методика расчета показателей надежности, в том числе вероятности безотказной работы по незапуску или заклиниванию привода, вероятности не превышения потоком газовыделения допустимого значения, вероятности не превышения допустимого значения кинематической погрешности, - с учетом влияния остаточных деформаций в результате прогрева.

Практическая ценность

Разработана методика теоретического расчета показателей надежности, которые ранее определялись на основе статистической обработки данных; получены зависимости для теоретического расчета точности, баланса составляющих погрешности и даны рекомендации по повышению точности и компьютерному диагностированию герметичных планетарных и волновых передач.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им

Н.Э.Баумана, на 1-й и 2-й Международных научно-технических конференциях «Вакуумная наука и техника» (Гурзуф, 1994, 1995), 10-й Международной конференции по тонким пленкам/ 5 Европейской вакуумной конференции (Саламанка, Испания, 1996), 5-й Международной Научно-технической Конференции "Высокие Технологии в Промышленности" (Москва, 1999), научно-технической конференции, посвященной 130-летию факультета «Машиностроительные технологии» МГТУ им. Н.Э.Баумана (Москва, 1999), 14-м Международном вакуумном конгрессе (Бирмингем, Великобритания, 1998) и др., а также использовались при разработке Системы диагностики технического состояния механических элементов, работающих в вакууме и при реализации международного научно-технического проекта «Разработка теории газообмена при трении металлов и её практического использования».

Публикации. Основное содержание работы отражено в 20 работах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов по работе, библиографического списка использованной литературы и 3 приложений. Содержит 209 страниц машинописного текста, 62 рисунка, 20 таблиц и библиографический список из 119 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, поставлена цель и сформулированы основные научные положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе проведен анализ проблем и задач повышения надежности прогреваемого вакуумного привода, рассмотрено влияние надежности вакуумного привода на надежность и производительность оборудования в целом, проведен анализ требований, предъявляемых к вакуумному приводу, и выявлено противоречие между требованиями к параметрической надежности по параметру «вакуум» и надежности функционирования прогреваемого вакуумного привода.

Проблемам повышения надежности вакуумного привода и его влияния на надежность и производительность оборудования в целом посвящены работы

Г.А.Шаумяна, Ю.А.Хруничева, Л.И.Волчкевича, Е.А.Деулина, А.С.Проникова, А.Г.Блинова, Б.С.Данилина, В.А.Пупко, С.А.Ашинова и др.

Связь между производительностью оборудования и надежностью привода заключается в зависимости технической Q_T и фактической Q_F производительности оборудования от таких показателей надежности привода, как среднее время наработки на отказ j -го узла $\bar{T}_j$, параметр потока отказов λ_j и др. Существенное повышение надежности привода возможно либо за счет регулирования показателей $\bar{T}_j$, λ_j и др., либо за счет использования системы диагностики. Эффективное регулирование надежности оборудования основывается на раскрытии механизма формирования отказа, анализе факторов, влияющих на показатели надежности, и построении модели, отражающей взаимосвязь этих факторов с показателями надежности. Однако, для случая внезапных отказов теоретической методики расчета показателей надежности не существует, а имеющиеся методики основываются на статистической обработке экспериментальных данных, полученных для прототипов. В свою очередь, для реализации системы диагностики механических элементов привода также необходимо иметь модель формирования выходных параметров привода (собственный момент сопротивления, поток газовыделения, вибрация и др.) и знать их взаимосвязь с показателями надежности, такими как вероятность безотказной работы, среднее время наработки на отказ и др.

Анализ оборудования, насыщенного внутрикамерными механизмами (напылительного, ростового, сборочного, литографического, молекулярно-лучевой эпитаксии, поверхностного контроля и др.) позволил определить обобщенные предельные требования к механизмам вакуумного привода: рабочее давление менее 10^{-9} Па, газовый поток из механизмов привода менее 10^{-10} м³Па·с⁻¹, температура обезгаживающего прогрева 450⁰С, точность совмещения до 0,1 мкм, погрешность позиционирования до 1 мкм или до 30' длина рабочего хода до 2 м, рабочее усилие до 100 кН, вероятность безотказной работы за плановый период (3 месяца) 0,8-0,999. Одновременное выполнение всех требований невозможно вследствие возникающих противоречий, одним из основных среди которых является противоречие между требованием параметрической надежности по параметру «вакуум» и надежностью функционирования. Это противоречие состоит в том, что для выполнения первого требования (давление $<10^{-9}$ Па) необходимо применять коррозионно-стойкие

хромоникелевые стали и проводить высокотемпературный обезгаживающий прогрев (до 450°C), что ведет к возникновению остаточных деформаций в деталях привода, вследствие склонности данных сталей к ползучести, и, в результате, приводит к деградации показателей точности и надежности функционирования привода (заклинивание, незапуск), т.е. к невыполнению остальных требований.

Для достижения поставленной в работе цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель формирования показателей надежности таких как параметр потока внезапных отказов, среднее время наработки на внезапный отказ, вероятность безотказной работы по незапуску или заклиниванию как функции выходных параметров привода.

2. Разработать математическую модель формирования выходных параметров привода на основе учета влияния первичных погрешностей, в том числе остаточных деформаций вследствие прогрева.

3. Провести анализ влияния величины остаточных деформаций на выходные параметры привода, такие как поток газовыделения и собственный момент сопротивления.

4. Провести анализ влияния остаточных деформаций на показатели надежности привода по незапуску или заклиниванию, вероятности превышения потоком газовыделения допустимого значения и др.

Вторая глава посвящена анализу влияния обезгаживающего прогрева на деформацию деталей вакуумного привода.

Экспериментальное исследование остаточных деформаций деталей вакуумного привода в результате обезгаживающего прогрева проводилось в работах Д.Р.Ахмадиева и Е.А.Деулина. В данных работах показано, что при прогреве сильфонного ввода вращения в сильфоне возникают остаточные деформации, величина которых зависит от температуры и длительности прогрева, а также исходной степени деформации. При этом остаточные деформации возникают при напряжениях ниже предела текучести стали при температуре прогрева. Исследования корпусных деталей, прогреваемых в нагруженном состоянии (поперечный изгиб), показали сложный характер поведения величины остаточных деформаций: значительная деформация корпуса (100 мкм) возникала при

прогреве без нагрузки и, затем, во время первого прогрева под нагрузкой (140 мкм). При этом деформация корпуса под нагрузкой происходила в направлении действия приложенной силы. Последующие прогревы под нагрузкой не вызвали заметного увеличения деформации. Анализ этих работ показал необходимость учета процессов ползучести и релаксации напряжений в хромоникелевых коррозионно-стойких сталях при температурах 200-450°C и напряжениях ниже предела текучести при проектировании привода.

Проблемам выявления закономерностей процессов ползучести и релаксации напряжений металлов и сплавов при пониженных температурах посвящены работы О.В.Соснина, Й.Чадека, И.А.Гиндина, Я.Д.Стародубова, Т.Ф.Гавриловой, Т.К.Жданович, В.Я.Ильичева, В.И.Старцева, В.А.Коваль, Н.К.Нечволода, Н.Н.Малинина, Э.Р.Паркера, Дж. Уошберна, Г.А.Степанова, Э.А.Киви, Ю.Н.Работнова, В.Р.Регеля, А.И.Слущкера, Э.Е.Томашевского, В.М.Розенберга, В.П.Солдатова, С.М.Шевченко, Ф.Гарофало, Т.Такешита и др.

Несмотря на повышенный интерес к данной проблеме, ползучесть и релаксация напряжений коррозионно-стойких сталей в интервале температур 20-500°C остается плохо изученной. Анализ работ показал, что современные представления о ползучести и релаксации напряжений допускают существование этих явлений во всем интервале температур, хотя в основе этих явлений лежат термоактивационные процессы. В указанной области температур для данных сталей наблюдается только первая стадия переходной ползучести, характеризуемая логарифмическим законом изменения во времени.

Подобие процессов переходной ползучести, установившейся ползучести и разрушения при ползучести позволяет оценивать неизвестные скорость и предел деформации первой стадии ползучести по экспериментальным данным, полученным для других стадий. При помощи обработки экспериментальных данных по долговременной прочности были определены активационные константы (энергия активации U_0 и активационный объем v) для данной стали, которые составили $U_0 = 309,4$ кДж/моль и $v = 8,9 \times 10^{-4}$ Дж/(Па·моль) при $T = 540^\circ\text{C}$. Полученные результаты позволяют оценивать скорость, величину и длительность ползучести по формулам Журкова.

Третья глава посвящена теоретическому исследованию показателей надежности прогреваемого вакуумного привода, разработке математической модели формирования выходных параметров привода, таких как собственный момент сопротивления, поток газовыделения, кинематическая погрешность, на основе учета первичных погрешностей привода, в том числе величины остаточных деформаций в результате прогрева.

Исследованиям природы и законов распределения внезапных отказов посвящены работы А.С.Проникова, Е.А.Деулина (отказы вакуумного привода) и др. В этих работах отмечается, что природа внезапных отказов полностью не ясна, в связи с чем такие показатели, как интенсивность отказов и параметр потока отказов определяются экспериментально. В вакуумной технике внезапные отказы проявляются в виде необычно резких колебаний собственных сил и моментов сопротивления привода, вызывая иногда заклинивание или незапуск привода. Исходя из предположения об экспоненциальном законе распределения внезапных отказов и используя правило перемножения вероятностей была выведена формула для расчета показателей надежности (среднее время наработки на отказ и параметр потока внезапных отказов) по незапуску или заклиниванию привода:

$$\bar{T}_B = \frac{1}{\lambda_B} = \frac{T_{ц}}{Z \ln(P(I))} = \frac{T_{ц}}{Z \ln \left\{ 0.5 + \Phi \left[\frac{\bar{M}_n - \bar{M}_{тр}(M_n)}{\sigma_{Мтр}(M_n)} \right] \right\}} \quad (1)$$

где $\bar{M}_n$ - математическое ожидание пускового или максимального крутящего момента двигателя, $\bar{M}_{тр}(M_n)$ - математическое ожидание момента сопротивления привода, являющегося функцией полезной нагрузки, $\sigma_{Мтр}$ - приведенное среднеквадратическое отклонение, $T_{ц}$ - длительность цикла, Z - количество пусков или оборотов двигателя за цикл.

Для использования выражения (1) в инженерных расчетах была разработана математическая модель формирования собственного момента сопротивления привода на примере герметичной планетарной передачи (ГПП-Э). Модели формирования собственных сил и моментов сопротивления различных вакуумных механизмов разрабатывались Н.С.Вагиным, Е.А.Деулиным, А.Н.Павловым, И.В.Синодеевым, Ю.В.Юрковыми др. Недостатком данных моделей является, то что не учитывались остаточные деформации, возникающие в деталях при прогреве.

В основе модели лежит анализ первичных погрешностей привода, в том числе погрешностей изготовления и сборки, а также остаточных деформаций, возникших в результате прогрева. Первичные погрешности группируются по частотам проявления и формируют действительную погрешность взаимного положения (ДПВП) деталей механизма, проявляющуюся в виде радиального смещения осей входного и выходного валов. В том случае, когда мгновенное радиальное смещение ϵ превосходит по величине приведенный зазор b , происходит интерференция зубчатого зацепления, сопровождающаяся резким возрастанием реакций в опорах и собственного момента сопротивления.

Полный момент сопротивления на входном валу привода представляет собой сумму редуцированного момента полезной нагрузки $M_{\text{УП}}$, момента сопротивления от упругих отжатий M_E , момента сопротивления герметизатора (сильфона, волновой оболочки) $M_{\text{Н}}$, момента сопротивления от трения в зубчатом зацеплении M_P , момента сопротивления опор $M_{\text{бб}}$:

$$M_{\text{ГР}} = M_{\text{УП}} + M_E + M_{\text{Н}} + M_P + M_{\text{бб}} \quad (2)$$

На основе рассмотрения геометрии и силовых факторов механизма были получены математические модели составляющих момента сопротивления в виде функций приведенного зазора b ; приведенного радиального смещения ϵ , учитывающего как погрешности изготовления и сборки, так и остаточные деформации в результате прогрева; приведенной жесткости $J_{\text{Н}}$; геометрических размеров и обобщенной координаты, в качестве которой принят угол поворота входного вала α :

$$M = f(b, \epsilon, J_{\text{Н}}, \alpha, \dots) \quad (3)$$

Составляющие M_E и $M_{\text{Н}}$ связаны с упругими силами, являются недиссипативными и характеризуются симметричным циклом относительно нуля, т.е. принимают как положительные, так и отрицательные значения. Составляющие M_P и $M_{\text{бб}}$ являются диссипативными и принимают только положительные значения.

Полученные зависимости (3) позволяют рассчитать математическое ожидание момента сопротивления, а среднеквадратическое отклонение момента определяется из следующего выражения, при допущении о независимости b и ϵ :

$$\sigma(M_{\text{ГР}}) = \sqrt{\left(\frac{\partial M_{\text{ГР}}}{\partial \epsilon}\right)^2 \sigma^2(\epsilon) + \left(\frac{\partial M_{\text{ГР}}}{\partial b}\right)^2 \sigma^2(b)} \quad (4)$$

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию возникновения деформаций деталей вакуумного привода при прогреве и влияния этих деформаций на показатели надежности и выходные параметры привода (собственный момент сопротивления и поток газовыделения).

Исследование деформации корпусных деталей привода проводилось на моделях, изготовленных из стали 12Х18Н10Т, при температурах прогрева 250-450⁰С, длительностях прогрева 4-29 часов. Модели были подвергнуты естественному старению и отжигу без нагрузки (400⁰С, 30 часов). Измерения деформаций проводились с помощью кругломера КД-290 по оригинальной методике. В результате экспериментов было установлено, что даже небольшие изгибные напряжения 2-4 МПа при прогреве приводят к возникновению остаточных радиальных деформаций и отклонению от соосности 3-19 мкм за прогрев на измерительной базе 65мм (Рис. 1).

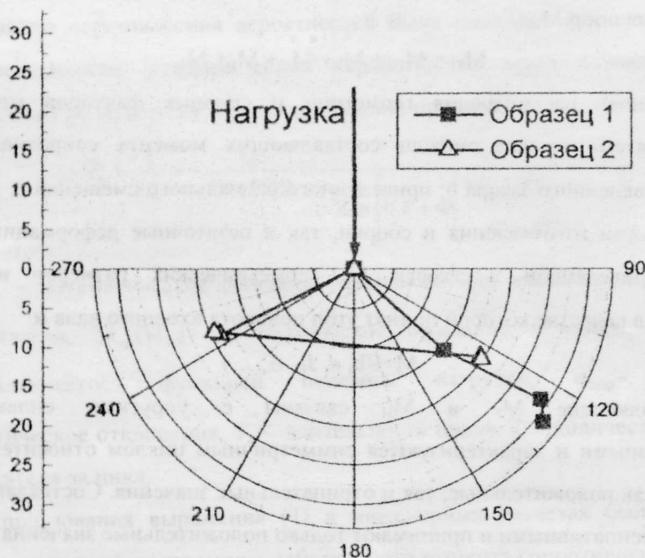


Рис. 1. Диаграмма остаточных деформаций моделей, вызванных прогревом.

(Полярная шкала в микрометрах)

Во всех экспериментах направление остаточной деформации при прогреве совпадало с направлением приложенной нагрузки: размах варьирования направления деформации составил 120⁰, а наибольшее отклонение от направления действия силы - 85⁰. Величина деформации имеет большой разброс и не зависит от температуры и

длительности прогрева в указанном интервале, что подтверждает гипотезу о переходном характере ползучести и наличии насыщения. Анализ составляющих ДПВП показывает, что остаточные деформации при прогреве сопоставимы с погрешностями изготовления и сборки деталей привода (Рис. 2).

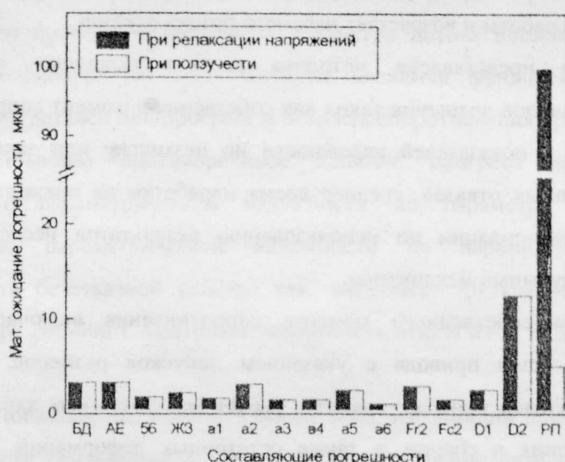


Рис.2. Математическое ожидание составляющих приведенной погрешности, проявляющейся с частотой первой гармоники, для случая больших поводок при первом прогреве (релаксация напряжений) и при ползучести.

Исследования деформаций оболочек волновых передач показали, что прогрев в сборе с генератором волн при рабочей радиальной деформации 1 мм, температуре прогрева 400°C и длительности 6 часов приводит к появлению остаточных деформаций оболочки и отклонению поперечного сечения от круглости. При этом направление большей оси деформации совпадало с положением генератора волн при прогреве. Наибольшая радиальная деформация оболочки составила 65 мкм.

Исследования влияния остаточных деформаций на величину собственного момента сопротивления и поток газовыделения ГПП-Э проводились на высоковакуумном стенде. Остаточные деформации корпуса моделировались радиальным смещением входного вала. Результаты экспериментов в целом подтвердили полученные теоретические зависимости. Показано, что увеличение радиального

смещения до 678 мкм при приведенном зазоре ~300 мкм приводит к возрастанию пикового значения потока газовой выделения в 37.5 раз, среднего потока газовой выделения в 2.53 раза; пикового значения момента сопротивления в 6 раз, среднего момента сопротивления в 1.15 раза. С увеличением радиального смещения уменьшается вероятность безотказной работы и возрастает параметр потока отказов.

В пятой главе представлена методика расчета выходных параметров герметичных зубчатых вводов вращения таких как собственный момент сопротивления и поток газовой выделения и показателей надежности по незапуску или заклиниванию (параметр потока внезапных отказов, среднее время наработки на внезапный отказ). Даны методические рекомендации по использованию результатов исследования в системе диагностики вакуумных механизмов.

Методика расчета собственного момента сопротивления включает в себя построение расчетной схемы привода с указанием допусков размеров, формы и взаимного положения деталей привода; анализ и расчет вероятностных характеристик погрешностей изготовления и сборки, а также остаточных деформаций вследствие прогрева; расчет параметров распределения величины интерференции; расчет составляющих момента сопротивления (2). На основании рассчитанных динамических факторов определяются величины контактных напряжений и относительных скоростей скольжения, что позволяет рассчитать поток газовой выделения по известным эмпирическим формулам.

В качестве основного информационного сигнала в системе диагностики вакуумного привода рекомендуется использовать собственный момент сопротивления привода. Спектральные оценки сигнала момента очень чувствительны к увеличению радиального смещения входного вала и возникновению интерференции зубчатого зацепления, что следует использовать для оценки качества сборки привода, а также для контроля технического состояния привода после проведения прогрева.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ существующих методов регулирования надежности показал, что существенное повышение надежности привода как в системе ППР, так и при использовании системы диагностирования технического состояния возможно лишь при

использовании вероятностной информации о параметрах привода, в том числе точностных, включая остаточную деформацию деталей в результате обезгаживающего прогрева.

2. Получены теоретические зависимости для расчета ряда показателей надежности привода, в том числе параметра потока внезапных отказов и среднего времени наработки на отказ, которые являются функцией величины остаточных деформаций деталей при прогреве и момента сопротивления привода.

3. Показано противоречивое влияние прогрева на параметры привода: повышение параметрической надежности по параметру "вакуум" приводит к понижению параметрической надежности по параметру "точность", снижает вероятность безотказной работы: так, например, трехкратный прогрев ГПП-Э при температуре $200-400^{\circ}\text{C}$ повышает вероятность отказа из-за незапуска или заклинивания в 5-10 раз.

4. Показано, что величина остаточных деформаций деталей вакуумного привода при прогреве соизмерима с допусками на отклонение размеров, формы и взаимного положения деталей привода: прогрев корпусных деталей привода при температурах $200-450^{\circ}\text{C}$ и даже малых изгибных нагрузках (2-4 МПа) приводит к возникновению остаточных деформаций 3-140 мкм за прогрев; прогрев волновых оболочек в рабочем деформированном состоянии (в сборе с генератором воли) приводит к возникновению остаточных деформаций и отклонению от круглости поперечного сечения оболочки (~65 мкм по радиусу).

5. Показано, что возникновение остаточных деформаций корпусных деталей привода в диапазоне 344-678 мкм приводит к выборке зазоров и возникновению интерференции зубчатого зацепления ГПП, что приводит к увеличению пикового значения потока газовыделения в 37.5 раз, среднего потока газовыделения в 2.53 раза; пикового значения момента сопротивления в 6 раз, среднего момента сопротивления в 1.15 раза.

6. Разработана вероятностная модель формирования выходных параметров герметичных зубчатых вводов вращения: собственного момента сопротивления, потока газовыделения, кинематической погрешности; показано влияние первичных погрешностей, в том числе погрешностей изготовления и сборки деталей привода, а

также остаточных деформаций, возникающих в деталях привода при обезгаживающем прогреве.

7. Показано, что собственный момент сопротивления вращению герметичных зубчатых вводов вращения является периодическим полигармоническим сигналом, хорошо выделяется при спектральном анализе и может использоваться при компьютерном диагностировании привода в качестве основного информационного источника.

8. Показано, что сигнал потока газовыделения состоит из периодически возникающих пиков с последующим переходным процессом, которые сильно коррелированы с пиками собственного момента сопротивления, однако использование коррелограммного метода оценки СПМ сигнала потока газовыделения не позволяет выделить периодическую составляющую в сигнале.

9. Показано, что возрастание собственного момента сопротивления при возникновении интерференции сопровождается увеличением максимального пикового значения сигнала момента, что может использоваться для диагностики состояния привода в качестве дополнительного источника информации.

10. Даны рекомендации по расчету показателей надежности с учетом влияния обезгаживающего прогрева: параметра потока внезапных отказов и вероятности безотказной работы по незапуску или заклиниванию привода, вероятности превышения давлением допустимого значения, - выходных характеристик привода (момента сопротивления и потока газовыделения), а также по использованию результатов исследований в системе диагностики вакуумного привода.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Ахмадиев Д.Р., Деулин Е.А., Невшупа Р.А. Влияние обезгаживающего прогрева на параметры сверхвысоковакуумных вводов вращения // Вакуумная наука и техника: Тезисы 1-й Российской научно-технической конференции. - М., 1994. - С. 165.

2. Ахмадиев Д.Р., Деулин Е.А., Невшупа Р.А. Исследование пластической деформации деталей вакуумного привода, возникающих вследствие обезгаживающего прогрева // Высокие технологии в промышленности России: Материалы 5-й международной научно-технической конференции. - М., 1999. - С. 45-49.

3. Ахмадиев Д.Р., Деулин Е.А., Невшупа Р.А. Повышение надежности вакуумных механизмов на основе учета влияния обезгаживающего прогрева// Материалы научно-технической конференции, посвященной 130-летию факультета «Машиностроительные технологии» МГТУ им. Н.Э.Баумана – М., 1998. – С. 65.
4. Деулин Е.А., Коновалов В.В., Невшупа Р.А. Анализ точности вакуумного привода с учетом влияния остаточных деформаций, возникающих при обезгаживающем прогреве // Высокие Технологии в Промышленности России: Материалы 5-й Международной Научно-технической Конференции. - М., 1999. - С. 91-95.
5. Деулин Е.А., Невшупа Р.А. Компьютерное моделирование газообмена при работе шарикоподшипника в вакууме // Вакуумная наука и техника: Сборник трудов 3-й Российской научно-технической конференции. – М., 1996. – С. 87.
6. Деулин Е.А., Невшупа Р.А. Новый метод расчета механически стимулированного газовыделения// Вакуумная наука и техника: Тезисы 2-й Российской научно-технической конференции. – М., 1995. – С. 99.
7. Заявка на патент № 97122170. Способ диагностики технического состояния механических элементов, работающих в вакууме / Е.А.Деулин, Р.А.Невшупа. - 1997.
8. Деулин Е.А., Невшупа Р.А. Экспериментальное исследование газовыделения из пар трения в вакуум // Вакуумная наука и техника: Тезисы 3-й Российской научно-технической конференции. – М., 1996. – С. 121.
9. Деулин Е.А., Невшупа Р.А., Сеговия де Х.Л. Газовыделение из нержавеющей стали при трении и свойства поверхности // Вакуумная наука и техника: Сб. трудов 5-й Российской научно-технической конференции. – М., 1998. – С. 43.
10. Деулин Е.А., Невшупа Р.А., Сеговия де Х.Л. Исследование явлений газовыделения и газопоглощения при трении металлов в вакууме // Вакуумная наука и техника: Сборник трудов 4-й Российской научно-технической конференции. – М., 1997. – С. 53.
11. Интеллектуальная система предсказания отказов вакуумного оборудования /Е.А.Деулин, Р.А.Невшупа, А.Г.Пересадько, Р.Рой // Вакуумная наука и техника: Сборник трудов 4-й Российской научно-технической конференции. – М., 1997. – С. 60.
12. Компьютерная система предсказания отказов элементов высоковакуумных механизмов/ Е.А. Деулин, Р.А. Невшупа, А.Г.Пересадько и др.// Вакуумная наука и техника: Тезисы 3-й Российской научно-технической конференции. – М., 1996. – С. 44.
13. Основы разработки экспериментальной модели компьютерной системы защиты вакуумных устройств: Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка теоретических методов и экспериментальное исследование молекулярно-вязкостного насоса с периферийным

каналом» / МГТУ. Руководитель темы К.Е.Демидов, Исполнители Е.А.Деулин, Р.А. Невшупа, А.Г.Пересадько и др. – ГР № 01.9.80005928, инв. № 02.9.80004407. - М., 1997. – С. 46.

14. Разработка системы предсказания отказов механических элементов высоковакуумного оборудования: Отчет о научно-исследовательской работе/ МГТУ. Руководитель темы Е.А. Деулин. Исполнители Р.А. Невшупа, А.Г.Пересадько и др. – ГР№ 01.9.60000548, инв. № 02.9.60000015. - М., 1995. – 90 с.

15. Computer system of predicting of mechanical elements failures of high vacuum equipment based on pressure measuring / S.G. Demidov, E.A.Deulin, I.V.Guschin, R.A.Nevshupa et al // 10th International Conference on Thin Films and 5th European Vacuum Conference: Book of Abstracts. - Salamanca (Spain), 1996. - P.168.

16. Deulin E.A., Nevshupa R.A., de Segovia J.L. An UHV system to study gassing and outgassing of metals under friction // Vacuum. - 1999. - V 52, n1/2. – P.79-87.

17. Deulin E.A., Nevshupa R.A., de Segovia J.L.. New UHV system for research of gassing and outgassing of metals during friction. // Proceedings of the 3rd Iberian Vacuum Meeting and 2nd European Topical Conference on Hard Coatings. – Lisbon, 1997. - P. 45.

18. Deulin E.A., Nevshupa R.A., de Segovia J.L.. Outgassing Of Stainless Steel During Sliding Friction In Ultra High Vacuum // Book of abstracts of the 14th International Vacuum Congress. - Birmingham, 1998. - P.171.

19. Deulin E.A., Nevshupa R.A. Computer simulation of gas-surface interaction during sliding friction in vacuum/ 10th International Conference on Thin Films and 5th European Vacuum Conference: Book of Abstracts. - Salamanca (Spain) 1996. - P.106.

20. Deulin E.A., Nevshupa R.A.. Equipment and procedure of investigations of kinetics of gas-surface interaction during sliding friction in vacuum // Proceedings of the 5th International Conference on the Structure of Surfaces. - Aix en Provence (France), 1996. - P.76.