

Кристалль Марк Григорьевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ
УСТРОЙСТВ ПОВЫШЕННОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И
НАДЕЖНОСТИ ДЛЯ СБОРКИ**

Специальности: **05.02.08** – Технология машиностроения
05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва – 2009

2

Работа выполнена в Волгоградском государственном техническом университете

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор

Семенов Евгений Иванович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Волчкевич Леонид Иванович

доктор технических наук, профессор

Золотаревский Юрий Михайлович

У1862406

технических наук, профессор

Кристалль М.Г.

Разработка методов

сей Иванович

Ведущая орг:

проектирования

автоматических устройств

повышенной производительности

государственный универ-

ситета и информатики»

2009

0-00

У1862406

заседании диссертационного

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ

обозначенного здесь срока

м высылать по указанию

Э. Бауман



1862406

Кристалль М.Г. Разработка

Михайлов В. П

151

Актуальность работы. Сборка, одна из наиболее трудоемких составляющих технологических процессов производства машин, является конечным и ответственным этапом изготовления изделий. От качества и производительности сборочного процесса зависит производительность выпуска машин, их качество и конкурентоспособность. Трудоемкость сборочных работ достигает 25-30 % от общей трудоемкости изготовления изделий в машиностроении. Это обусловлено невысокой производительностью и надежностью автоматических сборочных систем. Поэтому актуально такое развитие научных направлений, представленных Российским Фондом фундаментальных исследований в разделах 2.5 "Гибкие производственные системы", 2.9 "Технологии производства массовой металлопродукции с новым уровнем свойств", которое могло бы ликвидировать этот недостаток.

Для массового производства применяют неперенастраиваемые сборочные автоматы и автоматические линии. В серийном производстве, в составе гибких сборочных систем, целесообразно модульное построение технологических и вспомогательных средств базе электромагнитных вибрационных и струйных пневматических устройств, как не имеющих кинематических связей.

Повышение производительности автоматической сборки изделий осуществлено в многопозиционных дискретных сборочных устройствах (ДСУ), где параллельно действуют несколько рабочих позиций. Параллельно-последовательное выполнение технологических и вспомогательных переходов реализуют в процессе транспортного перемещения сборочных позиций в роторных многопозиционных машинах - дискретно-непрерывных сборочных устройствах (ДНСУ). В непрерывных сборочных устройствах (НСУ) сборку комплектов деталей выполняют в процессе вибротранспортирования через зону сборки (ЗС) случайными потоками. В ДНСУ и НСУ производительность пропорциональна скорости транспортирования деталей, обратно-пропорциональна шагу между ними и ограничена вероятностью P_c сборки, не превышающей в НСУ величину $P_c = 0,3$, что не отвечает современным требованиям.

Производительность автоматического сборочного устройства (СУ) зависит, как от вероятности P_c , так и от коэффициента k_r готовности технологического и вспомогательного оборудования. Величина k_r падает с увеличением числа n рабочих позиций, исполнительных и вспомогательных механизмов СУ. Поэтому однопозиционные НСУ, реализованные на базе надежных в эксплуатации вибротранспортных устройств (ВТУ), целесообразнее использовать для сборки, нежели многопозиционные роторные машины. Производительность НСУ может быть повышена с одной стороны, за счет повышения скорости виброперемещения в ЗС, что требует создание новых прогрессивных типов вибробункерных ориентирующих устройств (ВБОУ) и ВТУ, а с другой стороны, за счет создания условий, повышающих вероятность сборки соединений.

Надежность сборки цилиндрических соединений в ДСУ и ДНСУ обеспечивают анализом размерных цепей и расчетом допустимых значений составляющих погрешности относительного расположения сопрягаемых деталей на сборочных позициях, а вероятность P_c сборки определяют при значениях этой погрешности, соизмеримой с величиной зазора s соединения. Этот подход неприемлем для НСУ, где в направлении транспортирования сопрягаемых деталей через ЗС отсутствуют базы, а суммарная по-

грешность относительного расположения сопрягаемых поверхностей на порядок и более превосходит аналогичную погрешность в ДСУ и ДНСУ.

Повышению вероятности P_c автоматической сборки способствуют методы пассивной адаптации, где детали сопрягаются с предварительным наклоном их осей, в плавающих базах и под вибрационным воздействием, реализованным вибраторами различной природы, в том числе и пневмовихревыми. В плавающих схемах на сопрягаемые детали воздействуют внешними силами сборки с 20% погрешностью по жесткости пружинных элементов. Это приводит к случаям заклинивания, снижающим надежность сборочного процесса. Для оценки времени сборки используют модели, описывающие характер движения исполнительных механизмов без учета характера взаимодействия сопрягаемых поверхностей. В НСУ сборка протекает под действием лишь сил тяжести одной из деталей и сил от вибрации вибротранспортного устройства. Аналогично сборка проходит в пневмовихревых ДСУ, где вибрация и относительное вращение сопрягаемых деталей вызвана турбулентностью струй сжатого воздуха. Такой способ сборки называют свободным. Однако динамика взаимодействия сопрягаемых поверхностей под действием вибрации различного происхождения в таких устройствах не разработана до методик расчета. Перспективно также исследование вибрационного перемещения деталей, помещенных в пневмовихревые захватные устройства (ПВЗУ) промышленных роботов для задач свободной сборки.

Обеспечение бесперебойности снабжения рабочих позиций деталями собираемых узлов из надежных в эксплуатации и высокопроизводительных ВБОУ достигают введением промежуточных накопителей деталей, которые также компенсируют потери, связанные с отказами оборудования в составе СУ. Расчеты объемов этих накопителей, оценка производительности средств ориентирования, разделения (объединения) потоков деталей выполнены в предположении, что выходные из ВБОУ потоки и потоки отказов есть потоки с отсутствием последствия. Тем не менее, выходной поток собранных узлов из работающей с заданным тактом рабочей позиции является регулярным (с высоким последствием). Это свидетельствует о неадекватности принятых в расчетах положений, приводящих к необоснованному росту габаритов, стоимости изготовления и отладки СУ, и обуславливает необходимость поиска новых подходов в описании характера потоков деталей.

Производительность НСУ вибротранспортного типа лимитирована также скоростью транспортирования в линейных ВТУ сборочной позиции. Поэтому исследования, направленные на исправление этого положения можно считать актуальными.

Применяемые при касетировании собранных узлов, при снабжении деталями из одного ВБОУ нескольких рабочих позиций механические устройства разделения потоков деталей (УРПД), в силу низкого их быстродействия, также ограничивают производительность СУ. Замена их на струйные, с практическим отсутствием холостых ходов, где перемещение деталей осуществляют под действием струй сжатого воздуха, позволит снять эти ограничения. В связи с этим своевременными могут быть исследования, направленные на повышение быстродействия УРПД путем управления движением деталей действием нескольких разнонаправленных струй сжатого воздуха.

Гарантированное сопряжение деталей при их автоматической сборке зависит от случайного характера многочисленных и разнообразных факторов, учет значений и направленности которых на стадии проектирования технологических и вспомогательных устройств не всегда возможен. Поэтому актуальна разработка таких сборочных уст-

роиств, где заведомо большие погрешности не влияли бы на вероятность выполнения сборки, а динамические процессы обеспечивали бы заданную производительность.

Данная работа выполнялась в рамках госбюджетной НИР №35-53/439-04 «Исследование процессов и систем автоматического управления нелинейными объектами в предельных состояниях».

Целью работы является повышение производительности и надежности автоматических устройств для сборки на основе разработки вероятностных и динамических моделей функционирования технологического и вспомогательного оборудования и создания на их основе средств сборки, загрузки, транспортирования, которые обеспечивают требуемый способ реализации функций быстрогодействия и надежности, соответствующий высокому уровню автоматической сборки.

Для достижения этой цели решены следующие задачи:

- Разработана методология оценки доминирующей погрешности относительно расположения сопрягаемых поверхностей для непрерывной автоматической сборки в процессе вибротранспортного перемещения деталей случайными потоками, и выделены группы факторов, влияющие на производительность и вероятность сборки с последующей их оптимизацией.

- Разработан комплекс динамических моделей вибрационного взаимодействия сопрягаемых поверхностей при свободной вибрационной сборке для различных наклонных схем расположения сопрягаемых деталей, в том числе и для новой схемы ротационной сборки, основанной на совмещении осей деталей при их совместном вращении вокруг оси охватывающей поверхности.

- Предложен и реализован метод определения объема межоперационного накопления деталей, обеспечивающий бесперебойность снабжения рабочих позиций сборочных устройств, учитывающий характер ориентирования деталей в вибрационных бункерно-ориентирующих устройствах, деление выходного потока, а также свойства потоков отказов и восстановления, предшествующих накопителю и следующих за ним, технологических и вспомогательных устройств.

- Реализованы принципы активизации и увеличения быстрогодействия и надежности захвата деталей вибробункерными ориентирующими и пневмовихревыми захватными устройствами промышленных роботов, снабжающими деталями сборочные позиции.

- Предложены динамические модели движения деталей в переменном поле сил жидкостного и сухого трения, методики синтеза колебательных систем линейных вибротранспортных устройств, и струйных устройств разделения потока деталей, повышенного быстрогодействия, при одновременном воздействии на них нескольких разнонаправленных струй сжатого воздуха и на их основе разработаны методы расчета вспомогательных устройств для сборки.

- Разработаны новые конструкции и методики проектирования автоматических устройств повышенной надежности и быстрогодействия для сборки.

Методы исследования. В работе использованы фундаментальные основы теоретической механики, технологии машиностроения, теории вероятностей и математической статистики, законов газовой динамики и вычислительной математики. Эксперименты проведены с применением физического и имитационного моделирования, статистической обработки результатов по одно и многофакторной схемам с использованием современных регистрирующих и вычислительных средств.

Научная новизна исследования.

1. Впервые установлены вероятностные критерии выбора конструктивных и рабочих параметров автоматических устройств непрерывной, с вероятностью близкой к 1,0, свободной сборки деталей в процессе их транспортирования случайными и детерминированными потоками.

2. Определены динамические условия гарантированного сопряжения цилиндрических деталей при их вибрационном взаимодействии, и в впервые предложенном способе ротационной сборки с использованием гироскопического эффекта, когда смещение сопрягаемых поверхностей соизмеримо с номинальными размерами соединения, а перекос осей достигает 0,5 рад.

3. Впервые, на основе полученного распределения разности случайных интервалов между событиями в потоках Эрланга, установлено, что величина объема накопителя, компенсирующего стохастичность поступления деталей в сборочную позицию, инвариантна к средней интенсивности и зависит от степеней последствия входного и выходного потоков. Определены критерии управления параметрами этих потоков с учетом влияния характера захвата, ориентирования, транспортирования деталей, разделения потоков, отказов оборудования.

4. На основе разработанных математических моделей функционирования средств автоматической сборки изделий, а также средств загрузки и транспортирования сопрягаемых деталей и алгоритмов их численного расчета, установлено оптимальное, по быстродействию, сочетание их рабочих параметров и законов управления ими, положенные в основу методологии проектирования усовершенствованных существующих и вновь разработанных автоматических устройств повышенной производительности и надежности для сборки.

Практическая ценность. Разработаны новые конструкции дискретных и непрерывных СУ, технологических захватных устройств промышленных роботов, вибротранспортных средств повышенной производительности и надежности, защищенные патентами РФ. Опытно-промышленные образцы технологических и вспомогательных устройств для автоматической сборки внедрены в производство с суммарным экономическим эффектом в 1711655 руб.: на Курганском машиностроительном заводе (784000 руб. в ценах 2008 г), в ОАО «Аврора-БиНиБ» (65870 руб.), на ОАО «Волжский подшипниковый завод» (840000 руб.), в ООО «Аврора-Элма» (21785 руб.).

Предложен новый метод расчета объема межоперационного накопления деталей для обеспечения бесперебойного снабжения комплектующими деталями рабочих позиций сборочного оборудования в случае транспортных потоков различной стохастичности. Разработаны методики проектирования автоматических сборочных устройств дискретного и непрерывного действия, вибрационных и пневмовибрационных средств загрузки и транспортирования повышенной производительности, пневмовихревых захватных устройств повышенной грузоподъемности для промышленных роботов, а также струйных средств разделения потоков деталей.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Автором впервые разработана методология оценки доминирующей погрешности относительного расположения сопрягаемых поверхностей для случая непрерывной автоматической сборки в процессе вибротранспортного перемещения деталей двумя случайными потоками, что позволило выделить группу факторов, влияющих на производительность и вероятность сборки для последующей их оптимизации.

2. Разработан комплекс динамических моделей вибрационного взаимодействия сопрягаемых поверхностей для свободной вибрационной сборки при различных наклонных схемах относительного расположения сопрягаемых деталей, в том числе и для новой схемы ротационной сборки, основанной на гироскопическом эффекте совмещения осей деталей при их вращении вокруг оси прецессии охватывающей поверхности.

3. Предложен и реализован метод определения объема межоперационного накопления деталей, обеспечивающего бесперебойность снабжения рабочих позиций сборочных устройств, учитывающий характер ориентирования деталей в вибрационных бункерно-ориентирующих устройствах, деление выходного потока, а также свойства потоков отказов и восстановлений, предшествующих накопителю и следующим за ним, технологических и вспомогательных устройств

4. Предложены и технически реализованы принципы активизации и увеличения быстродействия захвата деталей пневмовихревыми вибрационными захватными устройствами промышленных роботов и вибробункерных ориентирующих устройств, позволившие повысить производительность и стабильность снабжения комплектующими деталями рабочих позиций сборочных устройств.

5. Разработаны, на основе предложенных динамических моделей, включая модели движения деталей в переменном поле сил жидкостного и сухого трения, методики синтеза колебательных систем для виброприводов линейных вибротранспортных устройств, подающих деталей на сборку, и струйных устройствах разделения потока деталей, повышенного быстродействия, при одновременном воздействии на них нескольких разнонаправленных струй сжатого воздуха.

6. Разработана методика проектирования новых конструкций технологических и вспомогательных средств повышенной производительности и надежности для автоматической сборки.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации были доложены и обсуждены на: Международной научн.-техн. конф. "TECHNOLOGY-94" (С-Петербург, 1994), Межд. научн.-техн. конф. «Измерение, контроль, информатизация» (Барнаул, 2000), Междунар. научн.-техн. семинаре «Сборка в машиностроении и приборостроении» (Брянск, 2001 г.), II международном научн.-техн. семинаре «Современные методы сборки в машиностроении и приборостроении» (Украина, Свалява, 2002), Междунар. научн.-техн. конф. «Высокие технологии в машиностроении» (Самара, 2002), Международной научн.-техн. конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» (Украина, Севастополь - 2003), Международной конференции «Актуальные проблемы конструкторско-технологического обеспечения машиностроительного производства» (Волгоград, 2003 г.), V, VI Международных научно-технических конференциях «Technika i technologia montazu maszyn» (Польша, 2004, 2008), IV международной научно-технической конференции «Modulowe technologie i konstrukcje w budowie maszyn» (Польша, 2006), Международной научн.-техн. конф. «Современные технологии в машиностроении и автомобилестроении» (Ижевск, 2005 г.), VII Международной научно-технической конференции "Фундаментальные и прикладные проблемы в машиностроительном и строительном комплексах" "Технология - 2006" (Орел, 2006 г.), научных конференциях профессорско-преподавательского состава Волгоградского государственного технического университета (Волгоград, 1997 – 2008 гг.).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 46 печатных работах, в том числе: в монографии, в 20 статьях журналов перечня ВАК, 4 – в материалах международных конференций, в 20 авторских свидетельствах и патентах РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, восьми глав, общих выводов, приложения на 27 страницах, списка литературы из 259 наименований. Общий объем работы составляет 509 страниц, из них основной текст работы изложен на 288 страницах, 241 рисунок на 149 страницах, список литературы на 24 страницах, 6 таблиц. Представлены акты внедрения и другие документы на 12 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, указаны научная новизна и практическая ценность.

В первой главе проведен анализ литературы по вопросам автоматической сборки распространенных в машиностроении соединений. Установлено, что наиболее часто встречаются цилиндрические соединения с зазором. При этом, по известной классификации, они могут быть как разъемные, так и неразъемные, но подвижные. Большая их номенклатура и объем партий в крупносерийном и массовом производстве обуславливает необходимость повышения производительности автоматических СУ. В зависимости от типа производства используют различные конструкции автоматических сборочных устройств, которые в соответствии с предложенной классификацией по степени непрерывности процесса могут быть дискретными, дискретно-непрерывными и непрерывными сборочными устройствами. В ДСУ сборка происходит под действием исполнительных механизмов на стационарной сборочной позиции. В ДНСУ сборку осуществляют в процессе транспортирования сборочных позиций и сопутствующих им исполнительных механизмов, а в НСУ операцию сборки осуществляют в процессе транспортирования деталей сборочного комплекта через зону сборки неподвижной сборочной позиции. В ДНСУ и НСУ производительность не зависит от времени выполнения сборочной операции. Величина этого времени определяет лишь размеры рабочей зоны, в пределах которой осуществляется соединение деталей. Существующие модели динамики сборки ограничены исследованием характера движения исполнительных механизмов сборочных устройств и не учитывают взаимодействие сопрягаемых поверхностей, а также динамические свойства сопрягаемых деталей, в частности при использовании различных технологических приемов: таких как сборка с предварительным наклоном сопрягаемых поверхностей, применение вибрационного воздействия или относительного вращения сопрягаемых деталей. Кроме временных факторов на фактическую производительность влияет фактор надежности, как выполнения соединения, так и бесперебойной доставки деталей собираемого узла в зону сборки. Для всех типов сборочных устройств существует необходимость автоматического ориентирования и подачи деталей собираемого узла в рабочую позицию СУ. Среди средств загрузки ВБОУ наиболее надежны и универсальны с точки зрения ориентирования деталей. Однако для компенсации случайного характера выходного из них потока деталей, а также компенсации потерь времени на отказы работающего оборудования используют накопители деталей, расположенные, как правило, на линейных вибротранспортных устройствах. Существующие конструкции ВБОУ обладают высокой производительностью подачи деталей. Этого нельзя сказать о линейных ВТУ. Здесь скорость вибротранспортирования, а, следовательно, и производительность загрузки рабочих

позиций деталями собираемых узлов, ограничена. С другой стороны, известные методы расчёта объемов накопления деталей основаны на предположении, что выходные потоки деталей из ВБОУ являются простейшими (т.е. с отсутствием последствий). Это приводит к необоснованному увеличению габаритных размеров накопителей деталей. Кроме того, величина случайного интервала между событиями в простейшем потоке подчиняется показательному закону, имеющему один параметр - интенсивность потока, что приводит к ошибочному выводу при расчете накопителей - интенсивность выходного из накопителя потока (производительность сборочной позиции) должна быть меньше интенсивности входного потока (производительность ВБОУ). Такой подход неприемлем, в особенности для НСУ, где производительность питания и производительность СУ равны по определению.

Как отмечалось выше, на величину фактической производительности СУ, кроме быстродействия оказывает влияние их надежность, которая складывается из надежности технологических и вспомогательных средств и надежности выполнения сборочной операции. Надежность сборки зависит от суммарной погрешности относительного расположения сопрягаемых поверхностей и количественно выражается вероятностью осуществления сборочного процесса. Известны расчеты вероятности P_c сборки для ДСУ и ДНСУ только при независимых случайных составляющих суммарной погрешности относительного расположения сопрягаемых поверхностей и величине Δ систематической составляющей погрешности, меньшей величины гарантированного радиального зазора s соединения. Эти расчеты применимы для стационарных сборочных позиций и не учитывают влияние описанных выше технологических приемов, способствующих выполнению сборочной операции. Кроме того, отсутствует расчет вероятности сборки для НСУ, где погрешность относительного смещения сопрягаемых поверхностей определяется случайным характером прихода сопрягаемых деталей в зону сборки при транспортировании их двумя случайными потоками. Невысокая надежность выполнения сборочных операций в автоматическом режиме во многом связана с принудительным характером сопряжения, приводящим к заклиниванию сопрягаемых деталей под действием сил сборки. Введение упругих компенсаторов суммарной погрешности относительного расположения сопрягаемых поверхностей, в виде плавающих баз, ограничено погрешностью ($\pm 10\%$) изготовления упругих элементов (пружин) по параметру их жесткости. В этой связи более перспективными являются схемы свободной сборки, под действием собственного веса одной из сопрягаемых деталей и приложенной вибрации, которые используют в пневмовихревых ДСУ и которые могут быть применены в НСУ. Актуальна разработка моделей динамики сопряжения деталей для оценки быстродействия таких схем сборки и их эффективного применения.

При автоматической сборке многоэлементных соединений разделяют поток одноименных деталей на несколько подпотоков для одновременного снабжения ими рабочих позиций из одного ВБОУ. Противоположная задача имеет место при комплектовании сборочной позиции разноименными деталями, сводя их из разных транспортных каналов в один поток. Для этой цели целесообразно, с точки зрения производительности и надежности, использовать струйные делители потока, не имеющие холостых ходов. В литературе мало сведений о динамике движения деталей под одновременным действием на них разнонаправленных струй сжатого воздуха.

Во второй главе предложена гипотеза о том, что материальные потоки в автоматических сборочных системах представляют собой потоки с ограниченным после-

действием и интервал между событиями в таком потоке подчиняется распределению

$$\text{Эрланга: } f(t) = (k\lambda)^k t^{k-1} \exp(-k\lambda t) / (k-1)!, \quad (1)$$

где $k \in [1, 2, \dots, n]$ – коэффициент последствия, характеризующий степень стохастичности потока; λ – средняя интенсивность (производительность) потока.

Поток Пальма образуется просеиванием простейшего потока, где, при отсутствии последствия ($k = 1$), случайный интервал времени t между событиями имеет показательный закон распределения: $f(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$ со средней интенсивностью λ . При последовательном разделении этого потока интенсивность λ_i каждого из входящих потоков будет уменьшаться в n раз по сравнению с интенсивностью λ , а коэффициент k_i последствия во столько же раз возрастать. Этим создаются условия снижения стохастичности потоков деталей при одновременном пропорциональном снижении производительности, что позволяет выработать концепцию одновременной загрузки из одного высокопроизводительного загрузочного устройства нескольких одноименных деталей при многоэлементной сборке. Тем не менее, этот подход предполагает необходимость n -кратного повышения производительности загрузочных средств, в плане преодоления существующих ограничений этой производительности, либо разработать другие условия снижения стохастичности потоков.

Для обеспечения бесперебойного снабжения рабочих позиций СУ необходимо создание буферных накопителей необходимого объема V , компенсирующих случайный характер потоков деталей. В общем случае накопитель может представлять собой некое хранилище с входным (параметры λ_1, k_1) и выходным (параметры λ_2, k_2) потоками Пальма. Так как при значениях $k = 25 \dots 30$ приближение распределения Эрланга к распределению Гаусса составляет более 95%, то поток деталей, входящий в рабочую зону технологической машины, при детерминированном сборочном процессе, можно считать также потоком Пальма с ограниченным последствием. Тогда, определение объема V накопителя может быть сведено к случаю наполнения и опорожнения его потоками 1, 2 Пальма, соответственно, с параметрами λ_1, k_1 и λ_2, k_2 . В таком накопителе транзитного типа детали во входном и выходном потоках обладают некоторыми значениями средних скоростей V_1 и V_2 движения, соответственно. При этом средние шаги (и соответствующие им коэффициенты $K_{\text{зап}_1}$ и $K_{\text{зап}_2}$) между деталями в этих потоках, соответственно равны значениям h_1 и h_2 . Тогда, при равенстве средней интенсивности каждого из потоков $\lambda = \lambda_1 = \lambda_2$, получим следующие соотношения: $\lambda = V_1 / h_1 = V_2 / h_2 = \sigma_{t_1} \sqrt{1/k_1} = \sigma_{t_2} \sqrt{1/k_2}$. Отсюда $V_1 / V_2 = h_1 / h_2 = h_1 l_n / h_2 l_n = K_{\text{зап}_2} / K_{\text{зап}_1}$; $\sigma_{t_1} / \sigma_{t_2} = \sqrt{k_2 / k_1}$, где l_n – размер детали, измеренный в направлении ее транспортирования; $K_{\text{зап}_1}$, $K_{\text{зап}_2}$ – соответственно, коэффициенты заполнения входного и выходного потоков. Полученные соотношения показывают, что при торможении деталей в выходном потоке или разгоне их во входном потоке, снижается стохастичность первого, увеличивается степень его заполнения деталями.

За начальный принимают момент времени, когда в накопитель из потока 1 поступает, а из накопителя в поток 2 выходит деталь. Для одного цикла «наполнения – опорожнения» время нахождения в накопителе деталей есть разность $t = t_2 - t_1$ случайных интервалов между деталями во входном и выходном потоках с плотностью ве-

роятности $p(t)$. Здесь t_1, t_2 — соответственно, случайные величины интервалов времени между деталями во входящем и выходящем потоках. Частное значение объема V_ξ накопителя, для одного цикла «наполнения — опорожнения», выражаемое в количестве деталей, должно иметь величину, обеспечивающую выдачу деталей с интенсивностью λ в течение интервала времени λt , удаленного от своего среднего значения не больше, в соответствии с неравенством Чебышева, чем на $\pm 3\sigma$; $V_\xi > 6\lambda\sqrt{D(t)}$,

где $D(t) = \sigma(t)^2$ — дисперсия случайной величины t ; λ — интенсивность входящего и выходящего потоков деталей.

Аналитически плотность вероятности величины t определена нами на основе композиции законов распределения случайных величин t_1 и t_2 . Плотность вероятности, каждой из которых, в соответствии с уравнением (1), имеет вид:

$$f_1(t_1) = (k_1\lambda_1)^{k_1} t_1^{k_1-1} \exp(-k_1\lambda_1 t_1) / (k_1 - 1)!; \quad (2)$$

$$f_2(t_2) = (k_2\lambda_2)^{k_2} t_2^{k_2-1} \exp(-k_2\lambda_2 t_2) / (k_2 - 1)!, \quad (3)$$

где $k_1, k_2, \lambda_1, \lambda_2$ — соответственно, параметры, характеризующие степени последствий и средние интенсивности потоков деталей.

Тогда, плотность вероятности величины t может быть выражена функцией:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{A \exp(k_2\lambda_2 t) (k_2 - 1)!}{b^{k_1+k_2-1}} \sum_{i=0}^{k_2-1} \frac{(-tb)^i (k_1 + k_2 - i - 2)!}{(k_2 - i - 1)! i!}, & \text{при } t < 0; \\ \frac{A \exp(-k_1\lambda_1 t) (k_1 - 1)!}{b^{k_1+k_2-1}} \sum_{i=0}^{k_1-1} \frac{(tb)^i (k_1 + k_2 - i - 2)!}{(k_1 - i - 1)! i!}, & \text{при } t > 0; \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{где } A = \frac{(k_1\lambda_1)^{k_1} (k_2\lambda_2)^{k_2}}{(k_1 - 1)! (k_2 - 1)!}; \quad b = k_1\lambda_1 + k_2\lambda_2.$$

Основными характеристиками предложенного распределения являются математическое ожидание $M(t) = (\lambda_1)^{-1} - (\lambda_2)^{-1}$; дисперсия $D(t) = (k_1\lambda_1^2)^{-1} + (k_2\lambda_2^2)^{-1}$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma(t) = \sqrt{D(t)} = \sqrt{(k_1\lambda_1^2)^{-1} + (k_2\lambda_2^2)^{-1}}$. Это распределение $f(t)$ обладает асимметрией, зависящей от соотношения параметров λ_1/λ_2 , k_1/k_2 . Дисперсия возрастает с уменьшением значений параметров k_1, k_2 , и λ_1, λ_2 . Диапазон Δt разброса величины времени t нахождения одной детали в накопителе определяется величиной $\Delta t = n\sqrt{(k_1\lambda_1^2)^{-1} + (k_2\lambda_2^2)^{-1}}$, где n — количество среднеквадратических отклонений в общем диапазоне разброса значений случайной величины t . За максимальный принят разброс при $n=6$. Если интенсивность λ_1 входного потока больше интенсивности λ_2 выходного потока, то накопитель переполняется. В противном случае произойдет полное его опорожнение. При равенстве средних значений интенсивностей входного и выходного потоков $\lambda = \lambda_1 = \lambda_2$, величина

$$\Delta t = \frac{n}{\lambda} \sqrt{(k_1)^{-1} + (k_2)^{-1}} = \frac{n}{\lambda} \sqrt{\frac{k_1 + k_2}{k_1 k_2}}, \text{ а плотность вероятности (4) примет вид:}$$

$$f_{\lambda}(t) = \begin{cases} \frac{\lambda \exp(k_2 \lambda t) k_1^{k_1} k_2^{k_2}}{(k_1 - 1)!(k_1 + k_2)^{k_1 + k_2 - 1}} \sum_{i=0}^{k_2 - 1} \frac{(-t\lambda[k_1 + k_2])^i (k_1 + k_2 - i - 2)!}{(k_2 - i - 1)!i!}, & \text{при } t < 0; \\ \frac{\lambda \exp(-k_1 \lambda t) k_1^{k_1} k_2^{k_2}}{(k_2 - 1)!(k_1 + k_2)^{k_1 + k_2 - 1}} \sum_{i=0}^{k_1 - 1} \frac{(t\lambda[k_1 + k_2])^i (k_1 + k_2 - i - 2)!}{(k_1 - i - 1)!i!}, & \text{при } t > 0. \end{cases} \quad (5)$$

Тогда частная величина объема V_{ξ} накопителя для единичного цикла «наполнения – опорожнения»: $V_{\xi} = \Delta(t)\lambda = 6\sqrt{(k_1 + k_2)/k_1 k_2}$. Полный же объем V будет определяться цепью событий накопления и опорожнения, и его можно вычислить как произведение: $V = \xi V_{\xi}$, где $\xi = (p_{\xi})^{-1}$ – коэффициент обратно-пропорциональный вероятности p_{ξ} нахождения в накопителе как минимум одной детали в частном цикле накопления – опорожнения. Вероятность p_{ξ} есть вероятность одновременного осуществления двух независимых событий: $p_{\xi} = p_1 p_2$, где $p_1 = p\{t_1 < t\}$ – вероятность того, что интервал t_1 между деталями во входящем потоке меньше интервала t одного цикла наполнения-опорожнения накопителя. Вероятность p_1 характеризует поступление в накопитель, по крайней мере, одной детали в пределах данного цикла. Аналогично $p_2 = p\{t < t_2\}$ есть вероятность превышения над временем t одного цикла наполнения-опорожнения интервала времени t_2 между деталями в выходящем потоке, что характеризует наличие в накопителе, по крайней мере, одной детали в пределах этого же цикла. Для определения величины p_1 сравним случайные величины: интервала t нахождения детали в накопителе в пределах одного цикла его наполнения-опорожнения и интервала времени t_1 между деталями во входном потоке. Величина t , имеет распределение с плотностью вероятности $f_{\lambda}(t)$ (выражение 5), а величина t_1 – распределение Эрланга с плотностью вероятности (выражение 2).

$$\text{Тогда вероятность } p_1 = \int_0^{\alpha} \left[\int_{t_1}^{\beta} f_{\lambda}(t) dt \right] dt_1, \quad (6)$$

где $\alpha = 6(\lambda)^{-1} \sqrt{(k_1)^{-1}}$, а $\beta = 3(\lambda)^{-1} \sqrt{(k_1)^{-1} + (k_2)^{-1}}$. Вероятность p_2 , вычисляют аналогично: $p_2 = \int_0^{\alpha} \left[\int_t^{\beta} f_2(t_2) dt_2 \right] dt$, где $\alpha = 3(\lambda)^{-1} \sqrt{(k_1)^{-1} + (k_2)^{-1}}$, а $\beta = 6(\lambda)^{-1} \sqrt{(k_2)^{-1}}$.

Полученные зависимости определяют объем V накопителя деталей для различных параметров входного и выходного потоков. Расчетами установлено, что величина V зависит от коэффициентов k_1 и k_2 последствия этих потоков и не зависит от их средней интенсивности λ (производительности).

На параметры входных и выходных потоков оказывает влияние принятая схема ориентирования деталей в ВБОУ, количество потоков при их разделении, а также параметры, характеризующие надежность функционирования устройств, расположенных до и после накопителя. При пассивной схеме ориентирования в ВБОУ, с долей s отбрасываемых, имеющих неверную ориентацию деталей, предложено параметры выход-

ного потока оценивать по следующим зависимостям: $\lambda_{\text{пас ор}} = \lambda_{\text{исх}}(1-s)$; $k_{\text{пас ор}} = (k_{\text{исх}} - 1) \exp[-a(k_{\text{исх}})s] + 1$. При активном ориентировании ($s = 0$), степень последствия $k_{\text{пас ор}} = k_{\text{исх}}$, а при $s \approx 0,9 \dots 0,95$, степень $k_{\text{пас ор}}$ последствия в результирующем потоке равна $k_{\text{пас ор}} = 1$. Здесь $\lambda_{\text{пас ор}}$, $\lambda_{\text{исх}}$ — соответственно, интенсивности выходного и исходного, до устройств ориентирования, потоков деталей; $k_{\text{пас ор}}$, $k_{\text{исх}}$ — соответственно, степени последствия выходного и исходного потоков деталей. Теоретически установлено, что при разделении выходного потока на n подпотоков, параметры каждого из них изменяются следующим образом: $\lambda_{\text{рез}} = \lambda_{\text{исх}}/n$; $k_{\text{рез}}$ последствия возрастет в n раз: $k_{\text{рез}} = nk_{\text{исх}}$.

Влияние надежности оборудования на характеристики выходящего из него потока учтено использованием наложения временных потерь, позволившее, для наихудшего случая, получить эквивалентные значения интенсивности $\lambda_{\text{эКВ}}$ и степени $k_{\text{эКВ}}$ последствия выходного потока в функции от исходных значений интенсивности $\lambda_{\text{исх}}$, коэффициента $k_{\text{исх}}$ последствия входного в устройство потока и коэффициента k_1 готовности оборудования: $\lambda_{\text{эКВ}} = k_1 \lambda_{\text{исх}}$; $k_{\text{эКВ}} = a(1 - \exp(-b k_{\text{исх}}))$. (7)

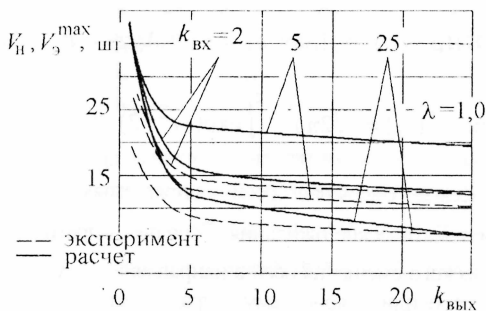


Рис. 1. Влияние степени последствия $k_{\text{вых}}$ выходящего из накопителя потока деталей на объем V_n при различных значениях степени последствия $k_{\text{вх}}$ во входящем потоке деталей

Здесь величина V_n — теоретическое значение объема накопителя, $V_3^{\text{max}} = \bar{V}_3 + 3\sigma_V$ — максимальное экспериментально полученное значение объема накопителя; $\bar{V}_3$ — среднее по нескольким испытаниям значение объема накопителя; σ_V — среднее квадратическое отклонение от среднего значения; λ — средняя интенсивность потоков деталей; $k_{\text{вх}}$, $k_{\text{вых}}$ — коэффициенты степени последствия потоков.

Оценка адекватности полученных моделей выполнена статистическими испытаниями для широкого круга значений параметров с использованием генератора псевдослучайных чисел Филлипса. Для рандомизации, каждый новый запуск генерации начинали с нового числа из массива записанного случайного шума. Результаты моделирования подтвердили полученные аналитические решения, как для оценок объема накопителя деталей (рис. 1), так и для значений коэффициентов в выражении (7): $a = 0,0135 \exp(9,13292 k_1)$; $b = 382,47 \exp(-10,75 k_1)$. Было также установлено, что на характеристики $\lambda_{\text{эКВ}} = f(\lambda_{\text{исх}}, k_1)$ не оказывает влияние величина степени последствия $k_{\text{исх}}$, а на вид характеристики $k_{\text{эКВ}} = f(k_{\text{исх}})$ — величина интенсивности $\lambda_{\text{исх}}$ потока деталей. Проверка гипотезы о подчинении гамма-распределению слу-

чайных интервалов времени в эквивалентном потоке по критерию согласия ω^2 показала, что при $k_r \geq 0,7$, характерных для реально действующего оборудования, распределение Эрланга с параметрами $\lambda_{\text{экв}}$ и $k_{\text{экв}}$ может служить адекватной моделью случайных интервалов времени между деталями в потоке Пальма.

В третьей главе полученная модель разности временных интервалов между деталями в потоке Эрланга, заменой $x_1 = Vt_1$; $x_2 = Vt_2$; $\gamma_1 = \lambda_1 / V$; $\gamma_2 = \lambda_2 / V$, преобразована в распределение случайного смещения x осей сопрягаемых поверхностей в направлении вибротранспортирования сопрягаемых деталей двумя случайными потоками. На основе данного распределения для принятых схем базирования деталей в направлении, перпендикулярном транспортному, получен алгоритм определения вероятности P_c^B сборки деталей в вибротранспортных НСУ согласно выражениям (рис. 2):

$$P_c^B = 0,5 \begin{cases} P_c(q_1) + P_c(q_2), & q_2 \geq 0; |q_2| \geq 3\sigma_s; \\ P_c(q_1) - P_c(q_2), & q_2 < 0; |q_2| \geq 3\sigma_s; \\ P_c(q_1) + P_c(q_2) - P_c(-q_2), & q_2 \geq 0; |q_2| < 3\sigma_s \\ P_c(q_1) + P_c(q_2) - P_c(|q_2|), & q_2 < 0; |q_2| < 3\sigma_s \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{где } P_c(q_i) = \int_0^{q_i + 3\sigma_s} \psi(p) \{1 - \Phi^*[(p - q_i) / \sigma_s]\} dp; \quad q_1 = E_s + \Delta; q_2 = E_s - \Delta;$$

$$\Phi^*(z_l) - \text{интеграл вероятности } \Phi^*(z_l) = (\sqrt{2\pi})^{-1} \int_{-\infty}^{z_l} \exp(-t^2 / 2) dt;$$

$$\Delta = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} - \text{систематическое смещение осей сопрягаемых деталей};$$

$E_x, E_y, \sigma_x, \sigma_y$ - соответственно, математические ожидания и среднеквадратические отклонения составляющих систематического смещения осей в направлении OX транспортирования сопрягаемых деталей, и перпендикулярном ему направлении OY ; E_s, σ_s - соответственно, математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение радиального зазора s соединения; l - параметр равномерного распределения погрешности базирования деталей в направлении, перпендикулярном транспортному; $\varepsilon = \gamma_2 / \gamma_1$ - отношение интенсивностей приходящих в зону сборки потоков деталей; $\nu = k_2 / k_1$ - коэффициент, учитывающий относительное последствие в этих потоках.

Для удобства введены следующие относительные к величине математического ожидания радиального зазора E_s параметры: $E_s^* = 1,0$; $E_y^* = E_y / E_s$; $E_x^* = E_x / E_s$; $E_y^* = E_y / E_s$; $\sigma_s^* = \sigma_s / E_s$; $\sigma_x^* = \sigma_x / E_s$; $\sigma_y^* = \sigma_y / E_s$; $\Delta^* = \Delta / E_s$; $l^* = l / E_s$; $\lambda^* = \gamma_2 E_s$.

Результаты расчета (рис. 3) показали, что погрешность смещения сопрягаемых поверхностей в направлении транспортирования сопрягаемых поверхностей является доминирующей. А максимальная вероятность сборки P_c^B изделий в вибротранспортных НСУ достигается при равенстве интенсивностей $\gamma = \gamma_1 = \gamma_2$ и степеней последствия

$k_1 = k_2$ потоков деталей, и имеет тенденцию к росту при уменьшении стохастичности потоков и увеличении коэффициента λ^* заполнения потока зазоров.

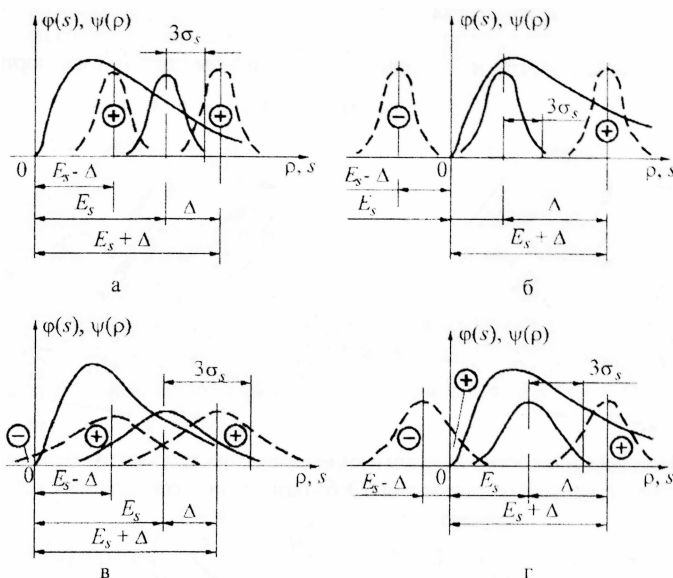


Рис. 2. Схема вычисления вероятности сборки при наличии систематической погрешности смещения сопрягаемых поверхностей: а) - $q_2 \geq 0$; $|q_2| \geq 3\sigma_s$; б) - $q_2 < 0$; $|q_2| \geq 3\sigma_s$; в) - $q_2 \geq 0$; $|q_2| < 3\sigma_s$; г) - $q_2 < 0$; $|q_2| < 3\sigma_s$. Знаки соответствуют знакам перед интегралами $P_c(q_i)$ в выражениях (8)

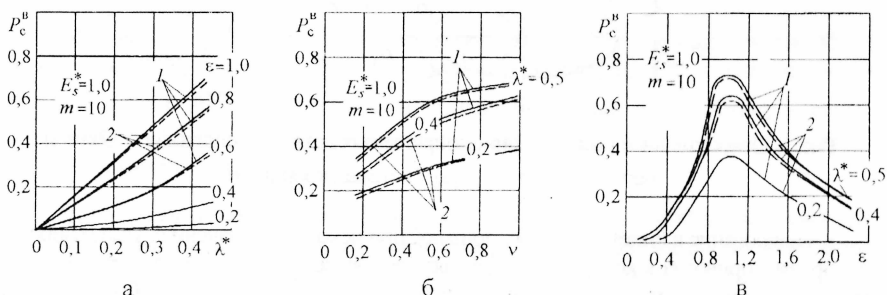


Рис. 3. Зависимость вероятности сборки P_c^B от: а - коэффициента λ^* заполнения при различных значениях коэффициента ε ; б - коэффициента ν при различных значениях коэффициента заполнения λ^* ; в - отношения ε интенсивностей потоков деталей при различных значениях коэффициента λ^* заполнения. (Закон распределения погрешности смещения сопрягаемых поверхностей вдоль оси OY : 1 - Гаусса; 2 - равной вероятности)

Полученные результаты позволили синтезировать новый принцип непрерывной сборки цилиндрических соединений в кинематических призмах, образованных совокупностью базирующих элементов (БЭ), совершающих возвратно-поступательное движение в плоскости, перпендикулярной направлению транспортного перемещения сопрягаемых деталей. Движение каждого БЭ сдвинуто относительно соседнего на некоторый фазовый угол $\Delta\varphi = 2\pi/n$, где n – количество БЭ на одном шаге h транспортирования (рис. 4).

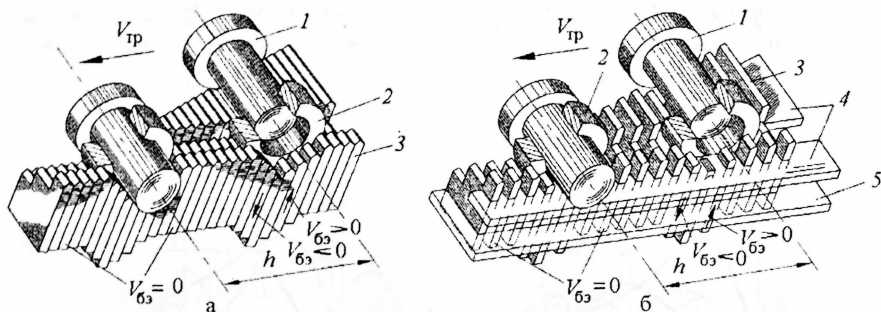


Рис. 4. Непрерывная сборка изделий в кинематических призмах: а - базирование сопрягаемых деталей подвижными БЭ; б - базирование сопрягаемых деталей подвижными и неподвижными БЭ

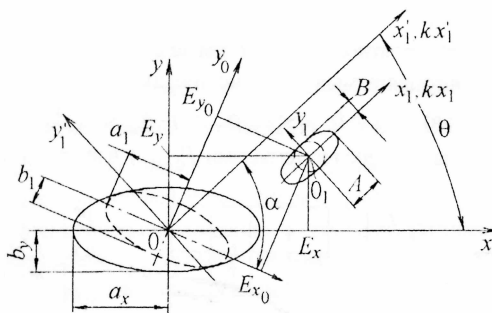


Рис. 5. Относительное расположение сопрягаемых деталей в подвижной $Oxyz$ и неподвижной $OX_1Y_1Z_1$ системах координат

Базирование в кинематических призмах, при некоторых значениях угла базирования призмы приводит к корреляционной связи между составляющими погрешности относительного расположения сопрягаемых поверхностей. Такая же связь образуется при использовании схемы сборки с предварительным наклоном осей сопрягаемых деталей, неравнозначного двухкоординатного вибрационного воздействия, если оси эллипса равной вероятности двумерного распределения этой погрешности и оси эллипса зоны относительного сканирования расположены под углом (рис. 5). В этом случае рассматривается эффективное отверстие, увеличенное по координатам вибрационного воздействия на величину соответствующей амплитуды колебаний или на величину зоны наклонного сопряжения (эллипс с полуосями A и B).

При двойном преобразовании систем координат: сжатии в $k = A/B$ раз вдоль координаты x_1 и повороте на угол α образованной из системы x_0y_0 , при ее сжатии, систему $x_1'0y_1'$, получаем расчетные независимые значения систематических и случайных составляющих погрешностей:

$$E_{x_0} = E_{x_1'} \cdot \cos \alpha + E_{y_1'} \cdot \sin \alpha; E_{y_0} = -E_{x_1'} \cdot \sin \alpha + E_{y_1'} \cdot \cos \alpha;$$

$$\sigma_{x_0}^2 = \sigma_{x_1'}^2 \cdot \cos^2 \alpha + K\{X_1', Y_1'\} \sin 2\alpha + \sigma_{y_1'}^2 \cdot \sin^2 \alpha;$$

$$\sigma_{y_0}^2 = \sigma_{x_1'}^2 \cdot \sin^2 \alpha + K\{X_1', Y_1'\} \sin 2\alpha + \sigma_{y_1'}^2 \cdot \cos^2 \alpha;$$

$$\alpha = \arctg[K\{X_1', Y_1'\} / (\sigma_{x_1'}^2 - \sigma_{y_1'}^2)] / 2.$$

Получена вероятность $P_c^{\text{кп}}$ непрерывной сборки в кинематических призмах для приведенных значений математических ожиданий и среднеквадратических отклонений, соответственно составляющих смещения сопрягаемых поверхностей E_{x_0} , E_{y_0} , σ_{x_0} , σ_{y_0} и радиального зазора соединения E_{s_0} , σ_{s_0} , как для случая $E_{x_0} = E_{y_0} = 0$:

$$P_c^{\text{кп}} = \int_0^{E_{s_0} + 3\sigma_{s_0}} \left\{ \Psi(\rho) \left[1 - (\sqrt{2\pi\sigma_{s_0}^2})^{-1} \int_{-\infty}^{\rho} \exp\left[-(s_0 - E_{s_0})^2 / 2\sigma_{s_0}^2\right] ds_0 \right] \right\} d\rho, \quad (9)$$

где $\Psi(\rho) = \rho \exp\left(-\rho^2 / 2\sigma_{x_0}^2\right) [\exp(-t) J_0(t)] / c\sigma_{x_0}^2$ – плотность вероятности радиального приведенного смещения сопрягаемых поверхностей, $c = \sigma_{y_0} / \sigma_{x_0}$;

$t = \rho^2 (1 - c^2) / 4c^2 \sigma_{x_0}^2$; $J_0(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(t \cos 2\theta) d\theta$ – модифицированная функция Бесселя. Для случая, когда $E_{x_0} \neq E_{y_0} \neq 0$ используют зависимости (8) с соответствующими заменами.

Адекватность разработанных вероятностных моделей надежности сборки, как для НСУ, так и для ДСУ (вероятность сборки определяется аналогично вероятности $P_c^{\text{кп}}$) подтверждена примененным методом статистических испытаний с использованием генераторов случайных чисел Лемсера, Марсальи-Брея и Филлипса.

Четвертая глава посвящена разработке моделей вибрационного сопряжения деталей по цилиндрическим поверхностям (схема свободной сборки под действием составляющей силы тяжести одной из сопрягаемых деталей) с предварительным наклоном осей. Рассмотрено два случая: с нижней или верхней опорой торца одной из сопрягаемых деталей. Приняты допущения о том, что детали абсолютно твердые тела, трение между ними сухое и подчиняется закону Амонтона-Кулона; одна из сопрягаемых деталей, рассматривается как физический маятник с массой, сосредоточенной в центре масс; взаимодействие сопрягаемых поверхностей безударное.

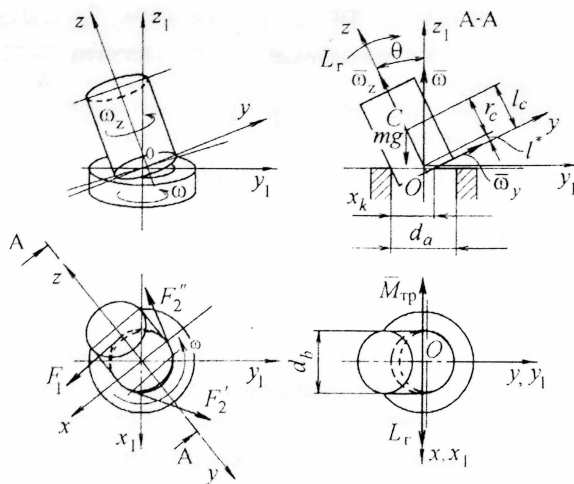


Рис. 6. Схема определения приведенных параметров погрешности относительного расположения сопрягаемых поверхностей и радиального зазора соединения при вибрационном и наклонном сопряжении цилиндрических деталей

В первом случае для обеспечения относительного перемещения сопрягаемых деталей до совмещения их сопрягаемых поверхностей впервые предложено опереть охватываемую деталь на торце отверстия охватывающей поверхности под некоторым начальным углом между их осями и придать им совместное вращение вокруг вертикальной оси (ротационная автоматическая сборка). В этом случае возникает гироскопический момент, обеспечивающий, согласно правилу Жуковского, гласящему, что при вращении вокруг оси прецессии наклонно расположенного вращающегося вокруг собственной оси гироскопа, его ось стремится к совмещению с осью прецессии. В отличие от гироскопа, на охватываемую деталь действует также момент сил трения в точках контакта торцов сопрягаемых поверхностей, направление которых неизвестно.

Предложена приближенная модель динамики поведения охватываемой детали в описанных условиях. Модель позволяет определить время t_{Σ} протекания сборочного процесса, состоящее из двух составляющих: $t_{\Sigma} = t_1 + t_2$, где $t_1 = -\tau \ln(1 - \omega_{кр} / \omega^{\max})$

(τ – постоянная времени разгона, $\omega^{\max}$ – максимальная скорость вращения ротора сборочного устройства), определяется разгоном вращающихся деталей до некоторой критической круговой частоты $\omega_{кр}$. При достижении ее начинает выполняться неравенство:

$$J_x \omega^2 \cos \theta \sin \theta (1 + \frac{J_x - J_z}{J_x})(1 - f) \geq mgf|r_c| \cos \theta, \text{ где } f - \text{коэффициент трения}$$

скольжения материалов сопрягаемых деталей; θ – угол нутации; m – масса охватываемой детали; J_x, J_z – моменты инерции охватываемой детали относительно, соответственно, осей OX и OZ (рис. 6); $|r_c|$ – модуль радиуса вектора от мгновенного центра поворота охватываемой детали до ее центра масс. Время t_2 второго этапа, в условиях трех-

904 2981

При опоре охватываемой детали на верхнем торце (ступенчатый валик) сборка с предварительным наклоном осей осуществляется под действием горизонтально направленной вибрации с амплитудой a и круговой частотой ω . Модель динамики движения описывается как движение физического маятника с допущениями, подобными приведенным выше:

$$m[(\rho^2 + l^2)\ddot{\phi} + \ddot{x}l \cos \varphi] = Q_{\phi}.$$

При этом возможны различные этапы движения: а) двухстороннее проскальзывание без отрыва; б) одностороннее проскальзывание без отрыва; в) сочетание двухстороннего проскальзывания с отрывом; г) сочетание одностороннего проскальзывания с отрывом от поверхности втулки.

Величины обобщенных сил:

1) для безотрывного режима (рис.7-а):

$$Q_r = ma\omega^2 \sin(\omega t) - Nf \operatorname{sign}(\dot{x}) + R \cos(\varphi - \alpha);$$

$$Q_\varphi = mla\omega^2 \sin(\omega t) - mgl\varphi + Rh/\cos(\varphi - \alpha).$$

2) для отрывного режима (рис.7-б):

$$Q_x = ma\omega^2 \sin(\omega t) - Nf \operatorname{sign}(\dot{x}); Q_\varphi = mla\omega^2 \sin(\omega t) - mgl\varphi.$$

Решение, выполнялось численно, методом припасовывания этапов движения по уравнениям связи. Получены зависимости времени $t_{сб}$ сопряжения деталей от их массы m , начального угла $(\varphi_0 - \alpha)$ наклоне осей, размерных факторов: l_B - длины детали, l - радиуса вектора от точки подвеса до центра масс; высоты h расположения точки подвеса охватываемой детали над плоскостью торца охватывающей детали.

Вариант свободного подвеса охватываемой детали на верхнем торце может быть реализован при захвате и удержании ее пневмовихревым вибрационным захватным устройством (ПВЗУ) повышенной грузоподъемности, разработанным автором. ПВЗУ в

процессе удержания детали придает ей вращение под некоторым углом и вибрационное перемещение.

С учетом принятых в работе допущений, разработаны модели динамики вибрационного и вращательного движения захватываемой детали (ЗД) в ПВЗУ. При величине z расстояния между торцом вихревой камеры (ВК) ПВЗУ и рабочей поверхностью ЗД, большей некоторого критического значения z_k , на ЗД действуют разрежение, приводящее к уменьшению величины z до значений $z < z_k$, когда перекрывается исходящий вихревой поток, и в полости ВК создается избыточное давление, отталкивающее деталь от среза ВК на величину $z < z_k$. Затем процесс повторяется.

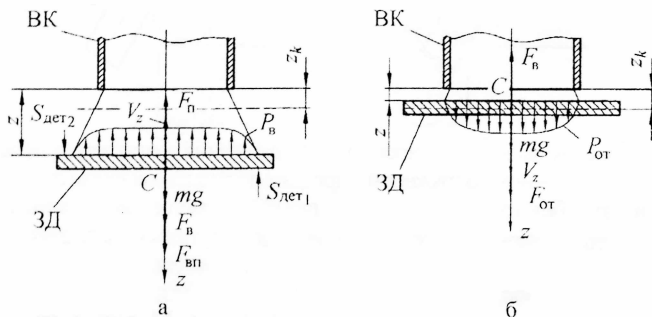


Рис. 8. Силы, действующие на деталь в процессе ее захватывания ПВЗУ

На деталь действуют приведенные к центру масс C силы: mg – тяжести ЗД, $F(z)$ – от разрежения p_v в ПВЗУ (рис. 8 а), или избыточного давления $p_{от}$ (рис. 8 б) на поверхности детали; F_v – сопротивления воздуха, при движении детали со скоростью V_z ; $F_{вп}$ – сопротивления воздушной подушки, в уменьшающемся зазоре между торцевой поверхностью ПВЗУ и поверхностью детали. Перемещение детали определяется скоростью $V_z = dz/(dt)$.

Тогда модель динамики имеет вид: $m \dot{V}_z + F(z) - mg - F_v \text{sign } V_z - F_{вп} = 0$.

Сила F_v сопротивления воздуха действует равномерно по нижней и верхней поверхности детали: $F_v = p S_{дет} = 0,5 S_{дет} \rho V_z^2$, где $S_{дет}$ – односторонняя площадь поверхности захвата детали.

Сила $F(z)$ представлена в виде кусочно-непрерывной функции $F(z) = \begin{cases} F_{от} = f_1(z), & \text{при } z < z_k \\ F_{п} = f_2(z), & \text{при } z > z_k \end{cases}$, где отталкивающая сила $F_{от} = f_1(z)$, создается избыточным давлением $p_{от}$, когда деталь перекрывает выходящий из ВК вихревой поток: $F_{от} = F_{от}^{\max} + (F_{п}^{\max} - F_{от}^{\max})(z/z_k)^n$, где $F_{от}^{\max} = p_{вх} \pi r_c^2$ – максимальная величина отталкивающей силы, $n = 5 \dots 7$ – показатель степени. На участке $z > z_k$ со стороны ПВЗУ на ЗД действует подъемная сила $F_{п} = f_2(z)$, возникающая за счет разрежения p_v . Величина силы $F_{п}$ на этом участке определяют по выражению:

$F_{\Pi} = \pi p_{\text{в}} r_{\text{ст}}^2 k / (2 + k)$, где $r_{\text{ст}}$ – радиус средней линии встречи струи с поверхностью захватываемой детали; $k = 3,8$ – коэффициент конструкции ВК.

Силу $F_{\text{вп}}$ вычисляют как: $F_{\text{вп}} = \begin{cases} k(z)V_z, & \text{при } V_z < 0 \\ 0, & \text{при } V_z \geq 0 \end{cases}$, где V_z – скорость взаимного сближения ПВЗУ и ЗД; $k(z)$ – функция массового расхода от координаты z :

$k(z) = \begin{cases} az^2 + bz + c, & \text{при } z < z'_k \\ 0, & \text{при } z > z'_k \end{cases}$, где a [кг/(с·м²)], b [кг/(с·м)], c [кг/с] – размерные коэффициенты.

$$\ddot{z} + K^2 z - g - \xi \operatorname{sign} V_z - \psi(z, V_z) = 0,$$

где $K^2 = F(z)/mz$ – частотная характеристика колебаний детали; $\xi = F_{\text{в}}/m$ – коэффициент сопротивления воздушного потока; $\psi(z, V_z) = F_{\text{вп}}/m$ – коэффициент сопротивления воздушной прослойки между деталью и срезом ВК. Результаты численного решения по данной модели приведены на рис. 9.

В реальных условиях деталь наклонена к плоскости среза ВК под некоторым углом δ . Кроме того, наблюдается еще и вращательное движение ЗД под действием вращающегося потока истекающих струй сжатого воздуха. Из условия, что расчетный кольцевой зазор, определенный величиной $z(t)$ на оси ПВЗУ, соответствует угловому зазору, с идентичным расходом, то этот угол $\delta(t) = \arcsin[z(t)/d_{\text{зд}}] \approx z(t)/d_{\text{зд}}$, где $d_{\text{зд}} = 2r_{\text{зд}}$ диаметр захватываемой детали. Ограничившись первой гармоникой функции $z(t)$ с амплитудой

$a_z = z^{\max} - z^{\min} / 2$ и частотой ω_z колебаний в установившемся режиме, установлен закон $x(t)$ вибрационного перемещения торца детали в направлении оси OX (рис. 9): $x(t) = (l_{\text{зд}} a_z / d_{\text{зд}}) \sin(\omega_z t)$. Вращение ЗД осуществляется под действием

суммарной силы $F_{\mu} = (Q^*)^2 \rho / 4(r_c - r_r)z_{\text{ср}} - \mu\pi(r_c^2 - r_r^2)V_0 / z_{\text{ср}}$ вязкости, действующей на деталь со стороны воздушной прослойки, где μ – коэффициент вязкостного трения; ρ – плотность воздуха; r_c – радиус стенки ВК; r_r – радиус границы вихревого потока; $z_{\text{ср}}$ – средняя толщина воздушной прослойки; V_0 – окружная скорость вращательного движения ЗД. Из уравнения раскручивания ЗД

$$\frac{d\omega_0}{dt} = \frac{(Q^*)^2 \rho (r_c + r_r)}{8J(r_c - r_r)z_{\text{ср}}} - \frac{\mu\pi(r_c^2 - r_r^2)(r_c + r_r)^2}{4Jz_{\text{ср}}} \omega_0, \text{ с учетом начальных условий, по-}$$

лучено: $\omega_0 = \omega_0^{\max} [1 - \exp(-t/\tau)]$, где $\omega_0 = 0,5V_0(r_c + r_r)$ – угловая скорость вращения детали; $\omega_0^{\max} = 0,125(Q^*)^2 \rho / (r_c^2 - r_r^2)^2 \mu\pi$ – предельная угловая скорость

вращения детали; $\tau = 4Jz_{\text{ср}} / \mu\pi(r_c + r_r)^2 (r_c^2 - r_r^2)$ – постоянная времени; J – момент инерции детали относительно оси ВК. Таким образом, определены необходимые параметры для осуществления сборочного процесса под вибрационным воздействием, создаваемым технологическим ПВЗУ.

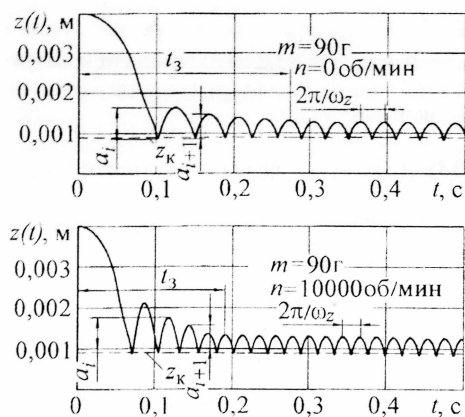


Рис. 9. Закон перемещения детали при захватывании ПВЗУ

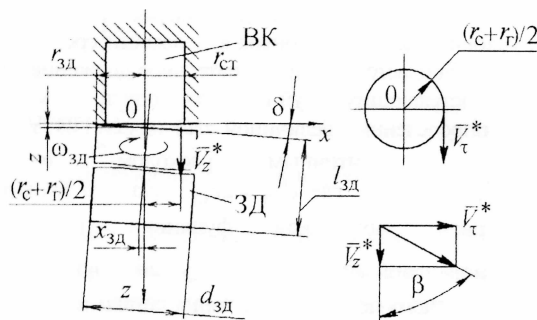


Рис. 10. Определение параметров вибрации детали в ПВЗУ

В пятой главе для обеспечения заданной величины производительности сборочных устройств рассмотрены вопросы синтеза колебательных систем в задачах межоперационного одно- и многопоточного транспортирования потоков деталей, поступающих на сборку.

В линейных ВТУ для обеспечения асимметричных колебаний, обеспечивающих более высокую скорость виброперемещения, предложено использовать вибропривод новой конструкции. Разработана модель колебательной системы этого привода, описываемая уравнением Матвея с правой частью, где жесткость упругой подвески изменяется в пределах цикла колебаний. Для этого упругая подвеска кроме пружинного элемента жесткости (ПЭЖ) содержит электромагнитный элемент жесткости (ЭЭЖ).

В этом случае уравнение движения, описывающее перемещение x рабочего органа вибротранспортера будет иметь вид: $\ddot{x} + k\dot{x} + a(t)x = F(t)/m$, где $\delta = 0,5k/m$ – коэффициент демпфирования; $F(t)/m = a\omega^2 \sin(\omega t)$ – ускорение вынуждающей силы; k – демпфирование в колебательной системе; ω – круговая частота колебаний вынуждающей силы; m – приведенная масса колебательной системы; a –

амплитуда колебаний вынуждающей силы; $a(t)$ – квадрат нелинейной частоты собственных колебаний, который определяется выражением:

$$a(t) = \begin{cases} \omega_0^2, & \text{при } 0 \leq t < \theta \\ [c + c_3(t)]/m, & \text{при } \theta \leq t < \theta + \pi \end{cases}, \text{ где } c_3(t) = F_3(t)/x - \text{переменная}$$

составляющая жесткости упругой подвески колебательной системы; $F_3(t)$ – сила, развиваемая электромагнитным элементом жесткости (ЭЭЖ) при номинальном токе I , протекающем по его обмотке; $\omega_0 = \sqrt{c/m}$ – частота собственных колебаний рассматриваемой колебательной системы без ЭЭЖ; c – жесткость упругой подвески постоянно-го элемента жесткости (ПЭЖ); θ – угол сдвига фазы подключения ЭЭЖ.

При формировании такой колебательной системы необходимо выполнить следующие условия. Во-первых, максимальное значение жесткости в данном уравнении, для сохранения дорезонансного режима, должно удовлетворять неравенству: $\sqrt{[c + c_3(t)]/m} > \omega$. С другой стороны, угол θ ограничен, и должен соответствовать неравенству: $0 \leq \theta \leq \pi$.

Сила $F_3(t) = Fx/h$, где F – сила притяжения между намагниченными ферромагнитными деталями, которая при малом, по сравнению с площадью S магнитных полюсов, зазоре h , определяется как: $F = \mu_0(Iw)^2 S / 2h^2$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость воздушного зазора; I , w – соответственно, значения величины тока и количество витков в обмотке ЭЭЖ. Поскольку усилие F является также функцией изменения квадрата величины тока I , а ток I (случай переменного тока) является функцией времени $I = I_n \sin(\omega t)$, где I_n – номинальная величина тока в обмотке ЭЭЖ. Для введения изменения жесткости колебательной системы в соответствующий момент времени, а также учитывая, что электромагнит обладает силой притяжения в любой из полупериодов, для реализации предлагаемого режима колебаний достаточно обеспечить однополупериодное выпрямление питания обмотки ЭЭЖ и сдвиг по фазе на угол θ относительно фазы питания электромагнитного вибратора: $I = I_n \sin(\omega t - \theta)$. Тогда жесткость $c_3(t)$ ЭЭЖ в соответствующий момент времени будет равна:

$$c_3(t) = F_3(t)/x = \mu_0(Iw)^2 S / 2h^3 = \mu_0(I_n w \sin[\omega t - \theta])^2 S / 2h^3.$$

В этом случае параметр колебательной системы, в пределах одного периода колебаний, будет находиться в различных состояниях.

Предлагаемый закон колебаний смоделирован в среде «Maple». Установлено, что в зависимости от соотношения жесткостей УЭЖ и ЭЭЖ существенно меняется характер движения РО данной колебательной системы. В диапазоне значений $0,5 < \gamma < 1,73$ реализуются асимметричные режимы колебаний достаточно близкие к идеальному закону вибротранспортирования Лавендела Э.Э.

Для обеспечения высокой скорости вибротранспортирования объектов большой массы предлагается управление силами трения между несущей поверхностью (НП), совершающей гармонические колебания по закону $x = a \sin(\omega t)$ вдоль направления транспортирования, и транспортируемым объектом, путем попеременного создания между НП и объектом либо разрежения, либо воздушной прослойки. При этом максимум скорости транспортирования

достигается созданием воздушной прослойки в момент, когда транспортируемый объект, захваченный НП созданным под ним разрежением, достигнет вместе с НП максимума виброскорости – $a\omega$.

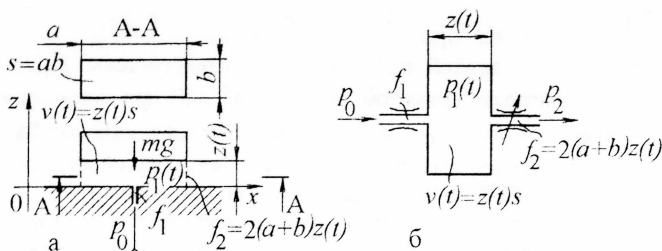


Рис. 11. Всплытие детали на воздушной прослойке: а – механизм всплытия; б – эквивалентная расчетная схема

Момент времени t захвата НП объекта, массой m , определяют из условия, что сила трения $F_{\text{тр}} = [mg + sp(t)]f = m\omega^2 \sin(\omega t)$. Здесь: g – ускорение свободного падения; s – площадь опорной поверхности транспортируемого объекта; $p(t)$, f – соответственно: закон изменения величины степени разрежения и коэффициент трения скольжения между рабочими плоскостями транспортируемого объекта и несущей поверхности; a , ω – соответственно: амплитуда и крутовая частота колебаний ИП.

Максимальную величину степени разрежения Δp выбирают из условия: $\Delta p \geq m(a\omega^2 / f_0 - g) / s$, где f_0 – коэффициент трения покоя между рабочими плоскостями транспортируемого объекта и несущей поверхности.

Образование воздушной прослойки представлено, как процесс течения воздуха через камеру переменного объема $v(t)$ с двумя турбулентными дросселями на входе и выходе. Суммарная площадь этих дросселей равна, соответственно: $f_1 = \pi n d^2 / 4$ и $f_2 = 2(a + b)z$. Здесь: n , d – соответственно, количество сопел под опорной поверхностью транспортируемой детали, и их диаметр; $2(a + b)$ – периметр опорной поверхности транспортируемой детали с габаритами a и b . Всплытие объекта, в допущении, что струи воздуха в прослойке несжимаемы, имеют надкритический характер, а сам процесс адиабатический, описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m \frac{d(\dot{z})}{dt} = [p_1(t) - p_2]ab - mg; \\ \Delta M = M_0 - M_1 = \frac{1}{RT} (v(t) \frac{dp_1(z)}{dz} \dot{z} + p_1(t) \frac{dv(t)}{dt}) \end{cases}$$

где $M_0 = \alpha_0 f_1 P_0 \sqrt{\frac{2}{RT} \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_1(t)}{P_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_1(t)}{P_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}$,

$$M_1 = \alpha_1 f_2 p_1(t) \sqrt{\frac{2}{RT} \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1(t)} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1(t)} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]},$$

$R=287$ Дж/кг °К – газовая постоянная; $k=1,4$ – коэффициент адиабаты; $\alpha_0=0,7, 0,8$; $\alpha_1=1,0$ – коэффициенты расхода, соответственно, для входного и выходного дросселей (рис. 11); $T=293$ К; $\rho=1,293$ кг/м³ – плотность воздуха. Вычисления проведены в среде Delphi. Аналогично получена система дифференциальных уравнений для захватывания детали вакуумом, создаваемом в том же зазоре между деталью и несущей поверхностью:

$$\begin{cases} m\ddot{z} = [p_1(t) - p_2]s - mg; \\ M_1^* - M_0^* = \frac{v(t)}{RT} \frac{dp_1(t)}{d(t)} + \frac{p_1(t)}{RT} \frac{dv(t)}{d(t)}, \end{cases}$$

$$\text{где } M_0^* = \alpha_1 f_2 p_2 \sqrt{\frac{2}{RT} \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1(t)} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1(t)} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]},$$

$$M_1^* = \alpha_0 f_1 p_1(t) \sqrt{\frac{2}{RT} \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1(t)} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1(t)} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}.$$

Таким образом, имеются все необходимые данные для попеременного включения воздушной прослойки и разрежения в зазоре «транспортируемый объект – НП».

В установившемся, после всплытия объекта, движении, с начальной скоростью $V_{\text{тр}}^{\text{max}} = a\omega$, равнозамедленное движение, описывается как: $m(dV/dt) = -\mu s V / z_{\text{ср}}$, где $\mu=1,808 \times 10^{-5}$ кг/м с – коэффициент вязкого трения воздуха; $z_{\text{ср}}$ – средняя толщина воздушной прослойки; V, m, s – соответственно, скорость, масса и площадь рабочей поверхности транспортируемой детали.

Решение данного уравнения, при условии, что в начальный момент времени скорость детали максимальна ($V_{\text{тр}}^{\text{max}}$), имеет вид: $V = V_{\text{тр}}^{\text{max}} \exp(-t/\tau_1)$, где $\tau_1 = z_{\text{ср}} m / \mu s$.

При заданном значении коэффициента $\varepsilon = \exp(-2\pi q_2 / \omega \tau_1)$ снижения скорости транспортирования детали на воздушной прослойке, величина q_2 количества периодов колебаний НП, в течение которого осуществляется это движение, равна: $q_2 = -\omega \tau_1 \ln \varepsilon / 2\pi$. Анализ величины q_2 показывает, что снижение скорости перемещения незначительно за достаточно большой промежуток времени. Тогда, с большой степенью приближения, можно считать, что средняя скорость вибротранспортирования составит: $\bar{V}_{\text{тр}} = 0,5 \{ V_{\text{тр}}^{\text{max}} [1 + \exp(-2\pi q_2 / \omega \tau_1)] \} / (q_1 + q_2)$, где $q_1 = 1, 2, 3 \dots$ – количество целых периодов колебаний, в пределах которых осуществляется формирование воздушной прослойки.

Согласно предложенному принципу вибрационного транспортирования путем попеременного изменения характера трения (сухое – жидкостное) созданы конструкции типовых шаговых транспортеров, горизонтально-замкнутых конвейеров и поворотных устройств для автоматической сборки повышенного быстродействия.

Усовершенствована конструкция линейных ВТУ, с эллиптическим законом колебания РО, где, за счет поворота вектора деформации упругих элементов (горизонтальной колебательной системы) в плоскость, перпендикулярную вектору вертикальной амплитуды колебаний, увеличена амплитуда A , горизонтальных колебаний, обеспечивающая высокую скорость перемещения деталей, что особенно важно для НСУ.

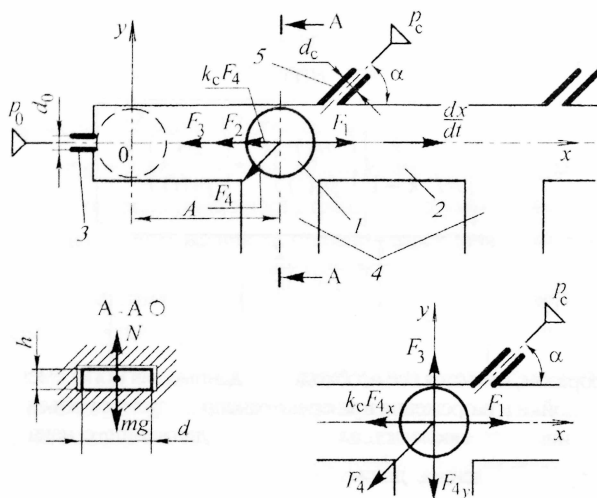


Рис. 12. Расчетная схема струйного разделителя потока деталей с распределением их через боковые окна транспортного канала

Для задач разделения (объединения) потоков деталей при их сортировке, кассетировании, предложен синтез струйных устройств разделения потока деталей (УРПД) на основе одновременного воздействия разнонаправленных струй сжатого воздуха. При этом сформирована струйная колебательная система, описываемая уравнением:

$m(d^2x/dt^2) = F_1(u, x, \dot{x}) - F_2(\dot{x}) - F_3 - F_4(u_c, x, \dot{x})$, где силы: F_1 – динамического давления струи воздуха, истекающей из транспортного сопла 3 диаметром d_0 , F_2 – лобового сопротивления, F_3 – кулонова трения, F_4 – противодействия струи воздуха, истекающей из направляющего сопла 5 диаметром d_c на деталь диаметром d , высотой h и массой m в прямоугольном транспортном канале закрытого типа (рис. 12).

Поиск рациональных сочетаний рабочих параметров УРПД, обеспечивающих достижение деталью (узлом) точки деления потока с нулевой скоростью выполнен по оптимизационному алгоритму, в среде «Maple 8».

Установлены зависимости времени t_c достижения детали заданных отводных каналов от давления p_0 питания транспортного и p_c направляющего сопл, геометрических размеров и массы m детали, ее аэродинамических характеристик, коэффициента f трения детали по опорной поверхности, расстояния A от исходной позиции до отводного окна..

Шестая глава посвящена разработке методик и проведению экспериментальных исследований характеристик потоков деталей выходящих из ВБОУ (рис. 13, 14). Экспериментально подтверждена гипотеза о том, что эти потоки являются потоками Пальма с ограниченным последствием. Показана возможность управления (рис. 13) степенью k последствия выходного потока и его интенсивностью λ (производительностью) путем вращения в направлении транспортирования введенного в донную часть ВБОУ донного активатора (ДА), а также уменьшением, по сравнению со скоростью V_6 транспортирования деталей в ВБОУ, скорости V_d их вибротранспортирования на выходном лотке ($\xi = V_d / V_6 < 1,0$) (рис. 14).

Методом хронофотографии (рис. 15) определена возможность использования полученных численных моделей динамики вибрационного свободного сопряжения цилиндрических деталей с предварительным наклоном сопрягаемых поверхностей.

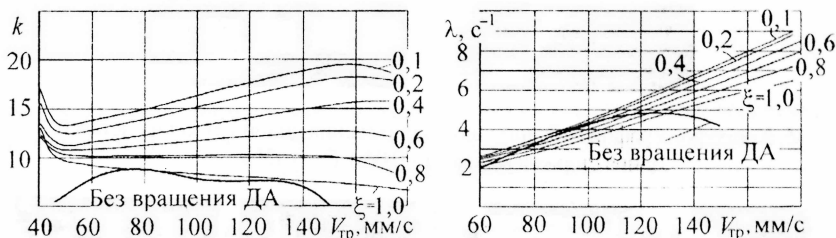


Рис. 13. Влияние величины скорости вибротранспортирования $V_{тр}$ на степень k последствия и интенсивность λ выходного потока деталей при различных значениях относительной скорости $\xi = V_{тр} / V_{ДА}$

На основе многофакторных экспериментов НСУ вибротранспортного (рис. 16 а) и волнового (рис. 17 б) типов получены уравнения регрессии, позволившие выявить значимые факторы, определяющие максимум производительности и надежности функционирования подобных устройств, которые и были положены в основу теоретических моделей. Результаты (рис. 17) экспериментального исследования ДСУ ротационной сборки роликовых подшипников методом скоростной видеосъемки, подтвердившие гарантированную свободную сборку цилиндрических деталей под действием гироскопического момента, при их совместном вращении вокруг вертикальной оси (прецессии).

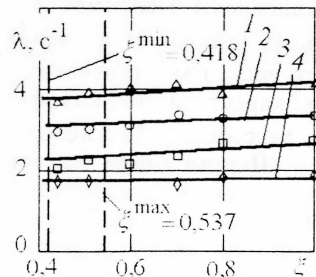
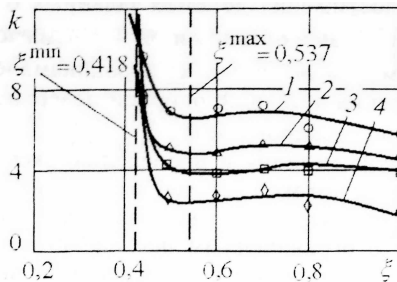


Рис. 14. Влияние отношения $\xi = V_{\text{л}} / V_{\text{б}}$ на величину параметров k и λ распределения случайного интервала между деталями в выходном потоке, где скорость $V_{\text{б}}$ транспортирования в бункере: 1 – 0,085; 2 – 0,07; 3 – 0,05; 4 – 0,04 м/с; $V_{\text{л}}$ – скорость транспортирования на выходном лотке

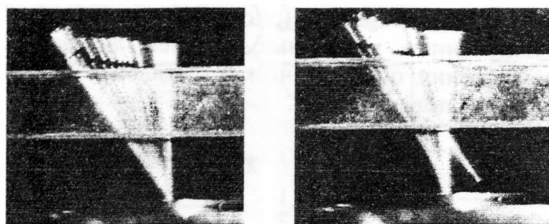


Рис. 15. Хронофотографии вибрационного сопряжения цилиндрических деталей.
Длина стержня налика: а – 0,04м; б – 0,025м

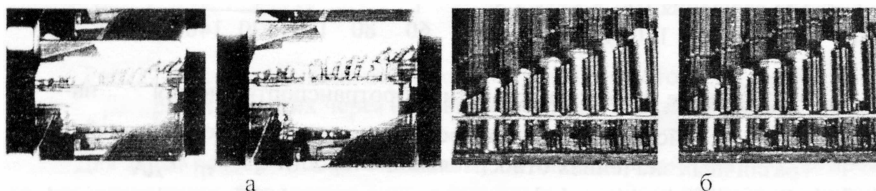
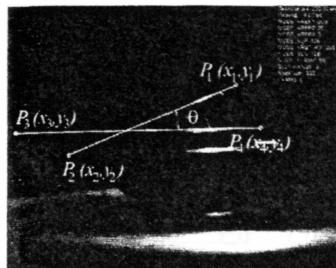
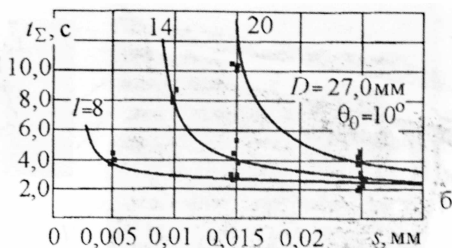


Рис. 16. Кинограммы сборочных процессов в НСУ вибрационного (а) и волнового (б) типов

Исследования опытно-промышленного образца ПВЗУ (рис. 18), показали: разработанные модели динамики захвата и удержания деталей адекватны экспериментальным данным. Они могут быть использованы, как для определения условий надежного захвата и удержания деталей по поверхностям малой площади (по торцам) при подаче их в рабочие позиции СУ, так и для оценки параметров вращательного и вибрационного движений захватываемых деталей, необходимых для надежного выполнения сборки промышленными роботами.

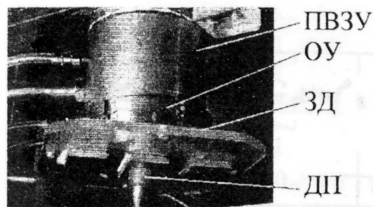


а

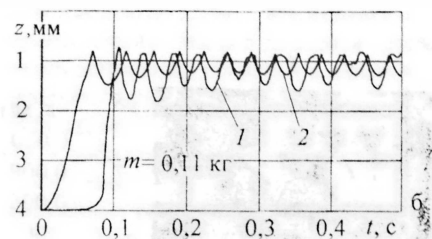


б

Рис. 17. Экспериментальное исследование ДСУ для ротационной сборки роликовых подшипников: а - обработка кадров высокоскоростной видеосъемки; б - сравнение теоретических и экспериментальных данных по времени t_{Σ} протекания сборочного процесса



а



б

Рис.18. Опытно-промышленный образец ПВЗУ (а) и сравнение теоретических и экспериментальных данных (б) по вибрационному перемещению при удержании захватываемой детали

В седьмой главе приведены методики и результаты экспериментального исследования опытно-промышленных образцов линейных ВТУ новых конструкций. В частности экспериментально установлено, что введение электромагнитного элемента жесткости в конструкцию вибротранспортера (рис. 19), содержащего основание 1, рабочий орган 2, пружинные элементы жесткости 3, электромагнитные элементы жесткости 4, электромагнитный привод 5, при низкочастотных колебаниях (до 12 Гц) позволяет получить асимметричные колебания (рис. 20), приводящие к увеличению скорости виброперемещения деталей. Увеличение грузонесущей способности предложенных конструкций пневмовибротранспортеров, экспериментально оценивалось на установке (рис. 21). Здесь на основании 1 смонтирован на опорах 3 рабочий орган 2, с пневматическими камерами с подключенными манометрами 4 и 5 и стабилизатором давления 6. На стойке 7 закреплен датчик перемещений 8, подключенный через блок ADB 140x30 к ЭВМ.

Транспортируемый образец 10 снабжался сменными грузами 9, а динамика его движения (рис. 22) показала, что время всплытия на воздушной прослойке определяется в основном быстротечием пневмоклапана.

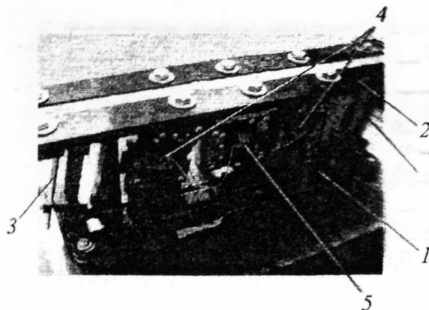


Рис. 19. Экспериментальный виброконвейер с управляемым электромагнитным элементом жесткости

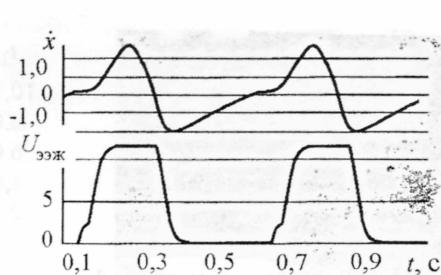


Рис. 20. Осциллограммы скорости $\dot{x}(t)$ рабочего органа и напряжения $U_{\text{эжж}}(t)$ питания электромагнитного элемента жесткости

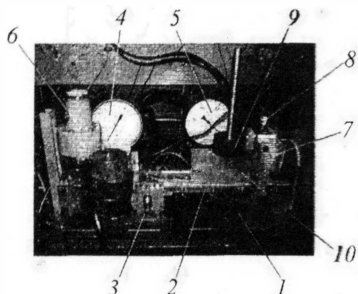


Рис. 21. Экспериментальная установка для исследования влияния массы объекта вибротранспортирования на характер всплыва его на воздушной прослойке

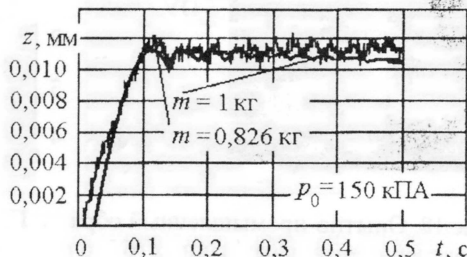


Рис. 22. Теоретические ($m = 1 \text{ кг}$) и экспериментальные ($m = 0,826 \text{ кг}$) характеристики динамики всплыва транспортируемого объекта на воздушной прослойке

Из результатов исследований работы вибротранспортера (рис. 21) с изменяемым характером трения (сухое – жидкостное) установлено, что теоретические и экспериментальные значения скорости вибротранспортирования качественно совпадают. С ростом частоты колебаний лотка происходит некоторое снижение фактической скорости, вызванное инерционностью захвата деталей и их обратным проскальзыванием относительно несущей поверхности. Тем не менее, расчетные данные с понижающим коэффициентом $k_{\text{п}} = 0,6$ для определения скорости транспортирования могут быть использованы в практике проектирования предложенного устройства.

Определение характера распределения давления и законов движения деталей в каналах струйных УРПД, проводилось методом хронофотографии (рис. 23) на установке, где изменяли основные параметры струйных разделителей. Относительное отклонение расчетных и экспериментальных значений времени t достижения деталью отводного окна на базовом расстоянии $A = 80 \text{ мм}$ (рис. 24) колебалось от 1,85% до 3%.

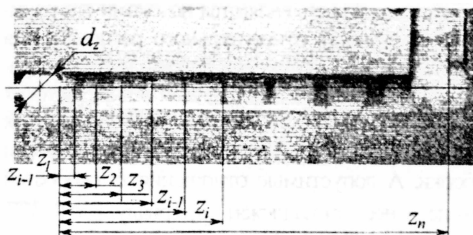


Рис. 23. Хронофотографии перемещения z_i детали в струйном УРГД

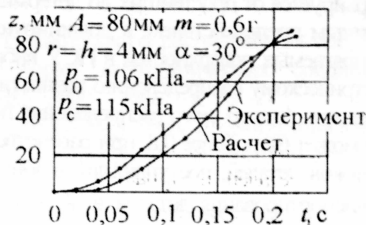


Рис. 24. Теоретические и экспериментальные законы движения детали в струйном УРПД

Расхождение расчетных и экспериментальных значений времени достижения деталями, массой $m \leq 1$ г, базового расстояния возрастало до 3,5 % ... 8%, в связи с обтеканием их потоками воздуха. Анализ экспериментальных законов движения деталей в транспортном канале подтвердил корректность допущений, принятых в динамических моделях и возможность использования их при проектировании струйных УРГД.

В восьмой главе, на основе предложенных моделей, приведены методики расчета конструктивных и рабочих параметров НСУ вибротранспортного и волнового типов; ДСУ ротационной сборки (на примере сборки роликового подшипника), как в стационарных устройствах, а также ПВЗУ промышленных роботов, обеспечивающих повышенную надежность и производительность СУ. Рассмотрены условия выбора объема накопителей деталей, в зависимости от условий их захвата и ориентирования в ВБОУ, параметров отказов оборудования, входящего в состав автоматических СУ.

Приведена методика определения параметров струйных разделителей (объединителей) потоков деталей в автоматических сборочных устройствах. Дано описание новых предложенных типовых конструкций технологических и вспомогательных устройств повышенной производительности и надежности для сборки. Предложены методики выбора рабочих параметров ВБОУ с донным активатором, управляющим характеристиками выходного потоков деталей, а также линейных ВТУ с асимметричным характером движения рабочего органа и с попеременным изменением характера трения (сухое - жидкостное) между транспортируемым объектом и несущей поверхностью.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Анализ литературы показал, что вероятностные и динамические модели функционирования автоматических технологических и вспомогательных средств для сборки не учитывают ряд факторов, а именно характер формирования, при свободной сборке в процессе транспортирования, величины смещения сопрягаемых поверхностей, соизмеримой с номинальным размером соединения и углах перекоса до 0,5 рад, а также динамику взаимодействия деталей при вибрационном воздействии. Вместе с тем, вероятностные и динамические модели лежат в основе методик проектирования автоматических СУ, что приводит к снижению их производительности и надежности, к затруднениям при разработке и внедрению этих устройств в производство. Поэтому тема диссертационной работы, направленная на разработку методик проектирования автоматических сборочных устройств повышенной производительности и надежности является актуальной.

2. Установлено, что в транспортных системах автоматических СУ потоки деталей, варьируясь от простейших до детерминированных, то есть являются потоками с ограниченным последствием, а доминирующая погрешность относительного расположения сопрягаемых поверхностей в НСУ вибрационного типа подчинена новому четырехпараметрическому распределению разности между случайными интервалами в двух потоках Эрланга. Анализ этого распределения показал, что вероятность сборки в этих устройствах не может быть более 0,8, при равенстве производительностей и степеней стохастичности потоков деталей, поступающих в зону сборки. А допустимые отношения ξ скоростей транспортирования деталей в ЗС и на входе в нее принадлежат интервалу $\xi \in [0,377, 0,577]$. Определены условия гарантированной непрерывной сборки деталей в кинематических призмах, с производительностью до 600 компл./мин., что подтверждено статистическими испытаниями и физическими экспериментами.

3. Разработана методика расчета объемов накопителей деталей для бесперебойного снабжения рабочих позиций, учитывающая условия захвата деталей, их ориентирование, а также показатели надежности средств загрузки и сборки. В основе методики - сравнение распределений случайных интервалов между деталями во входном в накопитель и выходном из него потоках с предложенным четырехпараметрическим распределением.

4. На основе разработанной модели динамики вибрационного сопряжения предложена методика определения времени выполнения свободной вибрационной сборки деталей при углах перекоса осей до 0,5 рад. и относительном смещении сопрягаемых поверхностей, соизмеримом с номинальным размером соединения, позволяющая рассчитать длину сборочной зоны вибротранспортного НСУ. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что для цилиндрических соединений с зазорами 0,002...0,010 мм и перекосом в 30°...36° осей, создаваемый, при совместном вращении сопрягаемых деталей вокруг оси охватывающей поверхности, гироскопический момент обеспечивает гарантированную сборку, названную ротационной. Экспериментально, с применением высокоскоростной видеосъемки, установлено, что величина времени выполнения ротационной сборки инвариантна к начальному углу перекоса осей сопрягаемых поверхностей.

5. Разработаны методики определения параметров вибрационного и вращательного движений деталей, удерживаемых ПВЗУ с вращающимися вихревыми камерами, способствующих обеспечению надежной установки деталей в базовые детали или приспособления. Предложена программа интерактивного расчета рабочих параметров ПВЗУ в широком диапазоне действующих факторов.

6. Предложены методики выбора параметров ВТУ, реализующих асимметричный закон колебаний рабочего органа, а также ВТУ с изменяемым характером сил трения (сухое – жидкостное), на несущей поверхности, обеспечивающих виброперемещение объектов массой в несколько килограммов, со скоростью, близкой к величине виброскорости рабочего органа.

7. При экспериментальных исследованиях применены современные цифровые регистрирующие средства, в том числе высокоскоростная видеосъемка, что позволило подтвердить адекватность теоретических положений.

8. Разработаны новые типовые конструкции грузочных, транспортных и сборочных устройств, в том числе вибротранспортных и волновых НСУ, а также ДСУ ротационной сборки, повышенной производительности и надежности, средств струйного деления материальных потоков и методики их проектирования. Ряд устройств нашел применение на предприятиях отечественной промышленности и внедрен в производство с суммарным экономическим эффектом в 171 1655 руб., а их новизна подтверждена патентами РФ.

1. Кристаль М.Г. Оценка погрешности относительного расположения сопрягаемых поверхностей при автоматической сборке цилиндрических соединений//Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2000. – № 6. – С.20 –23.
2. Кристаль М.Г. Динамика вибрационного сопряжения цилиндрических деталей под углом между осями//Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2003. – № 1. – С. 6 – 9.
3. Кристаль М.Г. Обеспечение надежности сложных технических систем в процессе сборки//Надежность сложных технических систем типа подвижных установок на этапах производства и эксплуатации. – М.: Машиностроение-1, 2005. – С. 61-128.
4. Семенов Е.И., Кристаль М.Г. Расчет непрерывных сборочных устройств//Вестник машиностроения. – 1987. – № 7. – С. 51-55.
5. Бабушкин М.Н., Кристаль М.Г., Харькин О.С. О возможности применения общей теории управления в задачах автоматизации сборочных процессов//Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2001. – № 9. – С.19 – 22.
6. Бабушкин М.Н., Кристаль М.Г. Перспективы повышения производительности автоматических сборочных систем (АСС)//Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2003. – № 8. – С.11 – 14.
7. Кристаль М. Г., Широкий А. В., Стегачев Е. В., Филимонов В. В. Метод повышения производительности вибрационных бункерных загрузочных устройств//Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2002. - №4. - С. 16 - 19.
8. Кристаль М.Г., Стегачев Е.В. Классификация и основные типы захватных устройств промышленных роботов//Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2005. – № 11. – С. 26 – 31.
9. Кристаль М.Г., Стегачев Е.В. Моделирование пневмовихревого захватного устройства с вращающейся вихревой камерой//Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2004. – №1. – С. 19 – 23.
10. Кристаль М.Г., Стегачев Е.В. Определение радиуса внутренней границы вихревого потока в пневмовихревых захватных устройствах//Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2005. – № 5. – С. 13 – 16
11. Кристаль М.Г., Стегачев Е.В. Повышение эффективности пневмовихревых захватных устройств промышленных роботов//Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2006. – № 1. – С.11 – 14.
12. Кристаль М.Г., Широкий А.В., Стегачев Е.В. Вакуумное захватное устройство//Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2002. – №11. – С. 10 – 12.
13. Кристаль М.Г., Чувилин И.А.. Исследование динамики вибрационного сопряжения с нижней опорой торца охватываемой детали//Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. – № 4. – С. 13 –17.
14. Кристаль М.Г., Широкий А.В. Оценка параметров выходного потока деталей в каналах питания технологического оборудования//Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2004. – № 7. – С.3 – 6.
15. Кристаль М.Г., Широкий А.В. Имитационное моделирование потоков деталей в каналах питания технологического оборудования//Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2004. – № 11. – С.22 – 26.

16. Кристаль М.Г., Широкий А.В., Чувилин В.А. Новый подход в определении объема накопителей деталей//Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2007. - № 12. - С. 6 – 9.
17. Пневмовакuumный транспортер с цикловым движением симметричных рабочих органов / М.Г. Кристаль, В.В. Филимонов, И.А. Смирнов, А.В. Широкий // Сборка в машиностроении, приборостроении. — 2002. — №10. — С. 26 — 27.
18. Динамика перемещения деталей в струйных сортировочных устройствах/О.С. Харькин, А.В. Дроботов, Е.В. Стегачев, М.Г. Кристаль//Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2007. – №1. – С. 17–19.
19. Кристаль М.Г., Стегачев Е.В. Применение пневмовихревых захватных устройств для вибрационной сборки//Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. – №7. – С. 21–24.
20. Кристаль М.Г., Чувилин И.А. Модель динамики ротационной сборки цилиндрических деталей//Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. – №8. – С. 12–15.
21. Кристаль М.Г., Харькин О.С., Дроботов А.В. Оценка производительности струйных разделителей потоков деталей//Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. – №9. – С. 14–17.
22. А.с. 823062 (СССР). Устройство для сборки винтов с шайбами/М.Г. Кристаль/Б.И. – 1981. – № 15.
23. А.с. 1445897 (СССР). Устройство для сборки комплектов винт-шайба/М.Г. Кристаль/Б.И. – 1988. – №47.
24. А.с. 663526 (СССР). Устройство для комплектования болтов с шайбами/М.Г. Кристаль, Б.А. Дремчук/Б.И. – 1979. – № 19.
25. А.с. 1036489 (СССР). Устройство для автоматической сборки винтов с шайбами/М.Г. Кристаль, В.В. Зайцев, С.Е. Самохин/Б.И. – 1983. – № 31.
26. Пат. РФ №2147503. Устройство для подачи деталей/М.Г. Кристаль, Н.Я. Смольников, Ф.В. Шамаков/Б.И. – 2000. – № 11.
27. Пат. РФ №2173662. Вибробункер/М. Г. Кристаль, А. В. Широкий, С. В. Шостенко, В. В. Еремеев/Б.И. – 2001. – №26.
28. Пат. РФ №2179504. Вакуумное захватное устройство/М.Г. Кристаль, Е.В. Стегачев, В.В. Филимонов, В.В. Еремеев, С.В. Шостенко, А.В. Широкий/Б.И. – 2002. – №5.
29. Пат. РФ №2199432. Пневматический схват/ М.Г. Кристаль, Е.В. Стегачев, В.В. Филимонов, В.В. Еремеев, С.В. Шостенко, А.В. Широкий/Б.И. – 2003. – №6.
30. Пат. РФ № 2201860, Устройство для подачи деталей/М.Г. Кристаль, А.В. Широкий, В.В. Филимонов, Е.В. Стегачев //Б.И. – 2003. – № 10.
31. Пат. РФ №2215680. Устройство для подачи деталей/М.Г. Кристаль, А.В. Широкий, В.В. Филимонов, Е.В. Стегачев, В.П. Широкий/Б.И. – 2003. – №31.
32. Пат. РФ № 2239735. Устройство для сборки роликовых подшипников / М.Г. Кристаль, Е.В. Стегачев, А.В. Широкий//Б.И. – 2004. – № 31.
33. Пат. РФ № 68482. Вибрационный лоток / М.Г. Кристаль, А.С. Рыбников, А.В. Широкий, Е.В. Стегачев и др./Б.И. – 2007. – № 33.
34. Пат. РФ № 74847. Поворотный стол/М.Г. Кристаль, Е.В. Стегачев, А.А. Астапенко, А.В. Дроботов, И.А. Чувилин/Б.И. – 2008. – № 20.
35. Пат. РФ № 76899. Электромагнитный конвейер / М.Г. Кристаль, А.С. Рыбников, А.В. Широкий, К.В. Лымарь, А.Ю. Буйлин, С.Н. Гиварчук/Б.И. – 2008. – № 28.

Подписано в печать 30. 01 .2009 г. Заказ № 57 . Тираж 100 экз. Печ. л. 1,0
Формат 60 x 84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Типография ИУНЛ
Волгоградского государственного технического университета.
400131, г. Волгоград, ул. Советская, 35