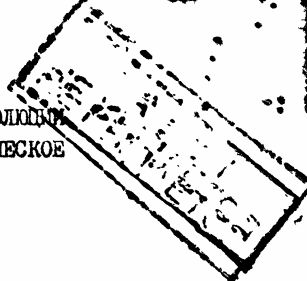


М 448146

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ
УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА



На правах рукописи

Широбоков Сергей Михайлович

УДК 621.91:62-187

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВЫХ
СМЕЩЕНИЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ТОЧНОСТЬ СТАНКОВ

Специальность 05.03.01 - Процессы механической и физико-
химической обработки, станки и инструмент

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1986

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель – кандидат технических наук,
доцент Чернянский П.М.

Официальные оппоненты – доктор технических наук,
профессор Орлов П.Н.

– кандидат технических наук
Плужников А.И.

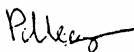
Ведущая организация – Московское производственное объединение по выпуску автоматических линий и специальных станков им. 50-летия СССР.

Защита состоится "5" декабря 1986 г. на заседании специализированного совета К.053.15.15. в Московском высшем техническом училище им. Н.Э. Баумана: г. Москва, 2-я Бауманская, д. 5.

Ваш отзыв в 1 экз., заверенный печатью, просим высылать по указанному адресу.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского высшего технического училища им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан "___" _____ 1986 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат технических наук,
доцент



Р.К. Мещеряков

Л - 64364 Подп. к печ. 3.12.86; Зак. 1347 Объем 1 п.л. Тир. 100 экз.
Ротапринт МВТУ. 107005, Б-5, 2-я Бауманская ул., д. 5.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В "Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года" поставлена задача существенно расширить выпуск станков высокой и особо высокой точности, повысить их производительность в 1,5-2 раза.

Дальнейшее развитие станкостроения и технологии машиностроения требует научного обоснования и решения ряда новых задач, связанных с точностью обработки.

Анализ показал, что смещения элементов несущей системы станков под действием сил резания приводят к погрешности обработки деталей, которые могут достигать 90 % суммарной погрешности.

Информацию о смещениях несущей системы станка в условиях силового воздействия несет его характеристика силовых смещений - зависимость относительных смещений инструмента и заготовки от внешней силы за цикл "нагрузка-разгрузка". До сих пор характеристики силовых смещений металлорежущих станков определяются только экспериментальными методами, получившими широкое распространение из-за их простоты и наглядности результатов. Известные аналитические методы учитывают только упругие свойства звеньев, что не отражает реальные условия эксплуатации станков. Поэтому эти методы не позволяют объяснить многообразие форм силовых характеристик, объективно оценить их влияние на точность и производительность, не дают ответа на вопрос, что представляют собой полученные экспериментально значения "жесткости" тех или иных узлов.

Из приведенного следует, что анализ и синтез характеристик силовых смещений, позволяющий выявить природу этих характеристик и механизм их формирования, создавать конструкции с наперед заданными свойствами, целенаправленно влиять на отжатия узлов, несущих заготовку и инструмент, точность их перемещения, аналитически рассчитывать с учетом реальных условий характеристики силовых смещений станков является актуальной научной задачей.

Цель исследования. Выполнить анализ и синтез характеристик силовых смещений технологических систем и выявить их влияние на точность станков.

Методика исследования. В работе использованы теоретические и экспериментальные методы исследования, базирующиеся на положениях теории упругости, теории колебаний, теории вероятности и математической статистики. Оценка влияния амплитуды и частоты вибраций на

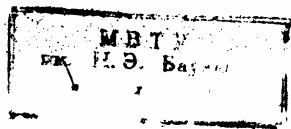
I

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1448146

Широбоков С.М. Анализ и син-



параметры силовой характеристики технологической системы и статистическая обработка результатов экспериментов по исследованию влияния вибраций на точность обработки деталей на токарном станке проведены с использованием ЭВМ единой серии. Экспериментальные исследования выполнены на оригинальных стендах и установке, оснащенных современной измерительной аппаратурой.

Научная новизна. Впервые экспериментально доказана возможность аналитического расчета характеристик силовых смещений технологических систем станков, подтверждены основные положения теории структур, предложенной П.М.Чернянским, в соответствии с которой любую деформируемую систему можно представить в виде совокупности элементов упругого (Σ) и неупругого (ΣT) сопротивлений.

На базе теории структур получены аналитические зависимости для расчета новых характеристик силовых смещений однородных и неоднородных систем с зависимыми и независимыми от внешней нагрузки характеристиками трения. Разработаны новые средства физического моделирования свойств конструкций с целью изучения их характеристик силовых смещений. Впервые аналитически исследовано влияние внешних возмущений на формирование характеристики силовых смещений и изменение силы трения в стыках в процессе нагружения и разгружения системы, что позволило использовать результаты в реальных условиях для разработки рекомендаций по повышению точности обработки.

Практическая ценность. Проведенные исследования открыли путь для практического использования теории структур при оценке характеристик силовых смещений и точности станков на этапе проектирования. Даны и использованы рекомендации по целенаправленному изменению характеристик силовых смещений станка с целью повышения точности обработки деталей и позиционирования суппорта станка.

Реализация результатов работы. Внедрение результатов исследований на машиностроительном предприятии позволило добиться повышения точности обработки деталей в 4,6 раза, сократить брак деталей на 6,8 %, что только на однотипных деталях привело к сокращению 4 единиц оборудования, высвобождению 6 рабочих и 70 кв.м производственных площадей и экономии более 4,5 : металла.

Результаты работы использованы в методике аналитической оценки силовых характеристик станков на стадии проектирования, которая внедрена на Московском производственном объединении по выпуску автоматических линий и специальных станков им. 50-летия СССР. Применение методики позволило сократить затраты на экспериментальное

исследование и доводку проектируемых станков-автоматов. Экономический эффект в расчете на одну базовую модель станка составил 3500 рублей.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались: 1) на научно-технической конференции молодых специалистов Московского автомобильного завода им. И.А.Лихачева (февраль 1980 г., Москва, ПО "ЗИЛ"); 2) на Всесоюзной научно-технической конференции с международным участием "Надежность и качество машин: испытание, диагностика, прогнозирование" (сентябрь 1981 г., Москва); 3) на II Всесоюзной научно-технической конференции "Надежность и долговечность машин и приборов" (сентябрь 1984 г., Куйбышев); на заседаниях кафедры "Станки и автоматы механооборочного производства" МВТУ им. Н.Э.Баумана (декабрь 1981 г., март 1986 г.).

Публикации. Основные положения диссертационной работы отражены в пяти статьях и двух авторских свидетельствах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы из 159 наименований и приложений. Содержит 136 страниц машинописного текста, 103 рисунка и 21 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ исследований силовых характеристик металлообрабатывающих станков: рассмотрены взаимосвязь силовой характеристики и ее параметров: жесткости, величины предельных и остаточных смещений, площади петли гистерезиса с критериями работоспособности станков - точностью, виброустойчивостью, производительностью; роль силовой характеристики в оценке качества и точности станка; существующие точки зрения на природу ее формирования; факторы, влияющие на характеристику силовых смещений, экспериментальные и аналитические методы определения характеристик силовых смещений станков.

В работах, посвященных изучению жесткости и характеристик силовых смещений станков, среди которых следует выделить труды К.В.Вотинова, Д.Н.Решетова, В.В.Каминской, З.М.Левиной, А.П.Соколовского, А.М.Дальского, В.А.Скрагана, В.М.Кована, В.Н.Подураева, Г.Б.Фико-Марголина, З.П.Харлушаса, Р.Конноли, Х.Оспитца и других советских и зарубежных ученых. Общим для этих работ является то, что все авторы понимают под жесткостью способность системы сопротивляться

действию внешних сил, стремящихся ее деформировать. Численно эта способность выражается коэффициентом жесткости или просто "жесткостью" в виде постоянной величины, используемой в точностных расчетах. Между тем, одному и тому же значению нагрузки соответствуют два значения смещений, неоднозначность которых вызвана силами трения в стыках нагружаемой системы. Величины жесткости, определенные по предлагаемым способам, для одного и того же узла станка или иной системы могут отличаться многократно. Все это безусловно отражается на достоверности оценки точности обработки и рекомендаций по определению жесткости.

Информацию о реакции системы на внешнее силовое воздействие с учетом реальных условий взаимодействия элементов системы несет ее характеристика силовых смещений.

До выполнения настоящих исследований не существовало работ, в которых вскрывалась бы природа формирования характеристик силовых смещений. Имеются гипотезы, основанные на наблюдениях, о формировании выпуклой и вогнутой ветви характеристики силовых смещений, роли трения, о причинах появления остаточных смещений, различных изгибов, петель, скачков на ветвях характеристики силовых смещений.

В работах Г.Б.Фикс-Марголина подчеркивается важная роль характеристики силовых смещений в оценке качества станка, прогнозировании его состояния, точности обработки и геометрической формы деталей. Заключение делается по форме характеристики силовых смещений. Им предлагаются логически и частично экспериментально выделенные типовые характеристики силовых смещений.

Механизму образования различных форм характеристик силовых смещений уделил внимание и З.П.Харлушас, получивший множество характеристик силовых смещений узлов фрезерных и сверлильных станков при различных вариантах и условиях нагружения.

Однако эти авторы, как и большинство других, считают, что характеристики силовых смещений станков в настоящее время еще невозможно получать расчетным путем.

Имеющиеся единичные примеры аналитического построения характеристик силовых смещений и распределения жесткости системы не отражают реальных условий при их формировании, не учитывают трения в стыках, не обосновывают влияния трения на точность станка и обработки.

Разработанная П.М.Чернянским теория структур позволяет объяснить природу и многообразие силовых характеристик, оценить точность станка по силовым смещениям.

Исходя из изложенного, поставлена цель: провести анализ и синтез силовых характеристик, выявить их влияние на точность станков, экспериментально подтвердить основные положения теории структур.

Вторая глава посвящена аналитическому исследованию характеристик силовых смещений однородных и неоднородных технологических систем (ТС).

Однородные ТС состоят из одинаковых модулей, неоднородные ТС включают модули как с независимой, так и функционально зависимой от внешней нагрузки силами неупругого сопротивления. В основу расчетов легли положения теории структур, разработанной П.М.Чернянским, согласно которой внешние силы, воздействующие на ТС станка, уравниваются в статическом состоянии силами упругого и неупругого сопротивлений, а каждую деталь, стык и ТС станка в целом можно представить в виде совокупности элементов упругого (ЭУ) и неупругого (ЭТ) сопротивлений с включением, при необходимости, зазоров и пластических деформаций. Данное представление позволило выработать единый системный подход к оценке характеристик силовых смещений станков, определить пути повышения и дать количественную оценку их точности. Рассмотрены ТС с различными видами связи между элементами: последовательной, последовательно-параллельной (с параллельными ЭУ и ЭТ) и параллельной. Для них получены аналитические зависимости, описывающие смещения в ТС под воздействием нагрузки в течение цикла "нагрузка-разгрузка", которые реализованы и графически. Для однородных систем даны формулы, позволяющие определить площадь силовой характеристики.

Сделан вывод, что для всех реальных ТС характерно наличие даже при полной разгрузке остаточных сил упругости и остаточных смещений. При построении силовых характеристик важно иметь в виду, что природа сил нагрузки и разгрузки различна: разгрузка осуществляется силой упругости, накопленной в ЭУ при первичном нагружении.

Силовая характеристика беззазорной ТС с независимыми силами трения, схема которой изображена на рис. 1, а, всегда должна начинаться с горизонтального участка, по величине равного силе трения в стыке. При дальнейшем увеличении нагрузки происходит смещение системы за счет последовательного преодоления сил трения и деформации элементов. После преодоления сил трения во всех стыках смещения носят упругий характер. На графике (рис. 1) этот процесс отображается цепочкой наклонных участков, каждый из которых равен силе трения в соответствующем ему стыке. При разгрузке эти участки должны повто-

ряться в той же последовательности, но их размеры в 2 раза больше (см. рис. I). Однако, если у ТС, воспринимающих нагрузку последовательно, участки численно равны преодолеваемым силам трения, то у ТС с параллельными ЭУ и ЭТ, одновременно воспринимающими одну и ту же нагрузку, величины этих участков соответствуют разности большей и меньшей сил трения. Поэтому при равенстве сил трения в стыках характеристика силовых смещений ТС с параллельными ЭУ и ЭТ (см. рис. I.3) аналогична характеристике одномодульной ТС (см. рис. I.I).

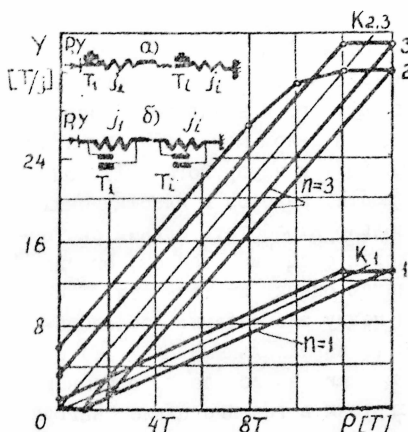


Рис. I. Характеристики силовых смещений ТС с независимыми от внешней нагрузки характеристиками трения

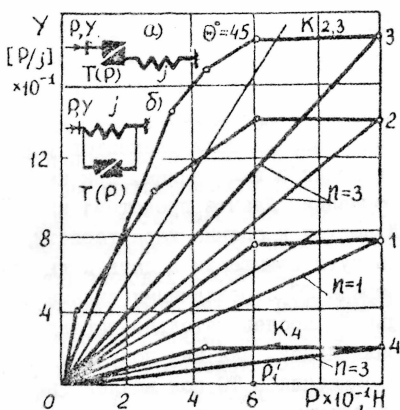


Рис. 2. Характеристики силовых смещений с зависимыми от внешней нагрузки характеристиками трения

Зависимость смещений от внешней нагрузки определяется отдельно для случая нагружения и разгружения и имеет вид: для ТС с последовательной связью между элементами и независимыми характеристиками трения

$$Y^H = \sum_{i=1}^n (P - \sum_{i=1}^K T_{i1}) / j_i;$$

а для ТС с параллельными ЭУ и ЭТ

$$Y^H = \sum_{i=1}^n (P - T_{i1}) / j_i;$$

$$Y^P = \sum_{i=1}^n (P_{Y_i}' + \sum_{i=1}^K T_{i1}) / j_i;$$

$$Y^P = \sum_{i=1}^n (P_{Y_i}' + T_{i1}) / j_i;$$

где $Y^{H,i=1}$ и Y^P - смещения в системе соответственно в процессе ее нагружения и разгружения;

P - текущее значение внешней силы;

P_{max} - величина максимальной нагрузки;

P_{Y_i}' - величина силы упругости в i -том элементе, начиная с которой происходит смещение i -го элемент-

та при разгрузке;

для ТС с последовательной связью между элементами

$$P'_{Y_i} = P_{\max}^n - 2 \sum_{i=1}^K T_i,$$

а для ТС с параллельными ЭУ и ЭТ $P'_{Y_i} = P_{\max}^n - 2T_i$;

T_i - величина силы трения в i -том элементе;

J_i - величина жесткости i -ого элемента упругости;

n - порядковый номер элемента ТС;

K - количество элементов в ТС.

Остаточные смещения для этих систем равны соответственно:

$$Y_{\text{ост.}} = \sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^K T_i / J_i; \quad Y_{\text{ост.}} = \sum_{i=1}^n T_i / J_i.$$

Силы трения в рассмотренных ТС проявляются косвенно через изменение крутизны ветвей силовых характеристик и создают впечатление нелинейности упругой системы при заведомо линейных ЭУ.

В ТС, имеющей ЭТ с зависимыми от внешней нагрузки характеристиками трения, смещения начинаются после преодоления сопротивления сил трения, вызванных силой тяжести перемещающихся элементов и изменяющейся внешней нагрузкой. Пренебрегая весом элементов системы, получим:

$$Y^H = \sum_{i=1}^n [P - \sum_{i=1}^n \mu_i \text{ctg} \theta_i (P - \sum_{i=1}^K T_{i-1})] / J_i;$$

$$Y^P = \sum_{i=1}^n [P'_i + \sum_{i=1}^n \mu_i \text{ctg} \theta_i (P'_i - \sum_{i=1}^K T_{i-1})] / J_i,$$

где μ_i - коэффициент трения в i -том стыке;

θ_i - угол приложения внешней нагрузки к i -тому элементу;

$P'_i = P_{i \max}^p / (1 + \mu_i \text{ctg} \theta_i)$ значение внешней силы P , приведенной к элементу, относительно которого измеряются смещения, при которой начинается при разгрузке смещение i -того элемента;

$$P_{i \max}^p = P_{\max}^n - \sum_{i=1}^n \mu_i \text{ctg} \theta_i (P_{\max}^n - \sum_{i=1}^K T_{(i-1) \max}) / (1 + \mu_i \text{ctg} \theta_i)$$

значение внешней силы на i -том элементе, при которой начинается при разгрузке его смещения;

T_i - сила трения, соответствующая нагрузке P'_i .

Остаточные смещения для такой ТС отсутствуют.

Нагрузочная ветвь характеристик силовых смещений этих ТС состоит из одного линейного участка, отражающего суммарные смещения. Разгрузочная ветвь имеет $(n+1)$ участков, где n - число ЭТ в ТС, и начинается с участка, названного "зоной нечувствительности" (см.

рис.2). На рис.2 показаны схемы модуля с последовательной и параллельной связью между ЭУ и ЭТ.

Используя зависимости, полученные при анализе ТС с зависимыми и независимыми от внешней нагрузки характеристиками сил трения, изменяя порядок расположения ЭУ и ЭТ, вид связи между ними и модулями, синтезированы различные характеристики силовых смещений, отличающиеся формой, площадью петли гистерезиса, предельными смещениями, участками "зоны нечувствительности", остаточными смещениями.

Анализ показал, что управляя величиной сил трения в элементах системы и связью между этими элементами, можно получить внешне одинаковые характеристики силовых смещений для ТС, состоящих из различного числа элементов (см. рис.1.1 и 1.3, рис. 2.1 и 2.4). Подбирая материал с различными коэффициентами трения и углы приложения внешней нагрузки, можно добиться отсутствия смещений в ТС, несмотря на рост нагрузки.

В третьей главе разработаны методы и средства исследования характеристик силовых смещений ТС.

Приведены разработанные с участием автора оригинальные стенды и устройства для моделирования свойств конструкций и исследования их характеристик силовых смещений, методика экспериментальных исследований свойств этих характеристик ТС, предусматривающая автоматизацию обработки входных и выходных данных.

Выполнена оценка погрешности эксперимента при регистрации сил и перемещений с помощью графопостроителя и осциллографа, составившей 2,2-2,5 %. При оценке погрешности эксперимента учитывались погрешности, вносимые средствами измерения и механической системой. Принималось во внимание, что погрешность измерения является комплексной величиной и включает погрешность собственно прибора, метода измерений и ряда других погрешностей, зависящих от температуры, измерительного усилия, способа крепления и перемещения регистрирующего устройства и т.п.

Как показал анализ, силы трения носят случайный характер. Учитывая, что изменение сил трения приводит к изменению остаточных смещений, экспериментально проверено рассеивание последних. Проведена математическая обработка экспериментальных данных с использованием статистических методов. Выявлено значительное рассеивание величины тангенциальных смещений в стыках, которая увеличивается пропорционально числу элементов трения в ТС.

Четвертая глава отведена экспериментальной проверке основных положений теории структур.

Экспериментально получены характеристики силовых смещений ТС, аналитически описанные во второй главе. В ходе эксперимента одновременно фиксировались: внешняя нагрузка, сдвигающие усилия, приложенные к элементам системы, силы упругости и смещения системы относительно элемента, к которому приложена внешняя нагрузка. Осциллограммы сил и смещений снимались одновременно с записью характеристик силовых смещений на графопостроителе. Чтобы наглядно показать роль сил трения при формировании характеристики силовых смещений ТС, шлейфы гальванометров, фиксирующих изменение движущей силы и силы упругости, совмещались. При изменении нагрузки шлейфы смещались друг относительно друга на величину силы трения в данном стыке. Величина смещения для ТС с независимыми от внешней нагрузки характеристиками сил трения при работе всех элементов оставалась постоянной, а для ТС с зависимыми характеристиками сил трения — увеличивалась или уменьшалась пропорционально нагрузке. Характер изменения сил и смещений на осциллограммах и сопоставление их с величинами внешней силы и перемещений по характеристике силовых смещений подтвердили, что трение в системе влияет на процесс формирования характеристики силовых смещений любой ТС. Отклонения ветвей указанной характеристики связаны с изменением сил упругого и неупругого сопротивления в ТС.

Расхождение между расчетными и экспериментальными величинами сил и перемещений составило 2–5 % для ТС с независимыми от нагрузки характеристиками сил трения и 2–16 % для ТС с зависимыми характеристиками сил трения.

Подтверждено, что даже беззазотная ТС имеет остаточные смещения, которые определяют потенциал точности станка и зависят от сил трения и жесткости элементов системы. Рассеивание сил трения приводит к рассеиванию относительных положений несущих узлов станка. Величина остаточных смещений функционально связана с количеством элементов трения в ТС. Увеличение последних вызывает при равных силах трения примерно квадратичное увеличение остаточных смещений.

Изучено влияние циклического нагружения на характеристику силовых смещений и жесткость ТС. Несовпадение ветвей характеристики силовых смещений при втором и последующих циклах нагружения-разгружения вызвано некорректностью эксперимента, а не пластическими деформациями, как предполагалось. Предварительные циклические повторения нагрузки и разгрузки не приводят к изменению жесткости испытуемой системы и ее характеристики силовых смещений.

Увеличения точности станка и снижения погрешности обработки

можно добиться, управляя величиной сил трения в элементах несущей системы станка.

Таким образом, экспериментально доказана возможность аналитического расчета характеристик силовых смещений ТС станков и подтверждены основные положения теории структур, изложенные в главе II.

Пятая глава посвящена изучению влияния вибрационного воздействия на характеристики силовых смещений ТС и разработке рекомендаций по повышению точности обработки с учетом результатов исследований.

Получены аналитические зависимости, описывающие процесс формирования характеристики силовых смещений ТС в условиях вибрационного воздействия на несущую систему станка, когда вектор амплитуды направлен нормально или параллельно плоскости стыка. В первом случае движение системы будет складываться из движений в вертикальной плоскости под действием вибраций (1) и в горизонтальной под действием внешней силы $P(t)$ (2). На основании уравнений (1) и (2) получены зависимости, позволяющие определить положение точки, принадлежащей характеристике силовых смещений, в любой момент времени, а также решение, описывающее поведение характеристики силовых смещений по ходу изменения нагружающей силы.

$$m(\ddot{X} - A\omega^2 \sin \omega t) = mg - j_x X; \quad (1)$$

$$m\ddot{Y} + (j_g + j_y)Y = P(t) - T(t); \quad (2)$$

Вибрации приводят к периодическому изменению нормальной реакции и сил трения. Переменная составляющая сил трения, определяющая границы возможных положений ветвей характеристики силовых смещений, равна

$$\Delta T = \frac{A j_x}{1 - \rho^2} \left(\frac{1}{\rho} \sin K_1 t - \sin \omega t \right), \quad (3)$$

где A — амплитуда колебаний;

j_x — жесткость контактного слоя;

K_1 — частота собственных колебаний ТС в направлении вибраций;

$\rho = K_1 / \omega$.

Осредненная характеристика силовых смещений при наличии вибраций, вектор которых направлен нормально плоскости стыка, приведена на рис. 3. Движение в системе начинается после преодоления минимальной силы трения. Далее происходит "ползущее" движение — участок I-2. Участок 2-3 характеризуется монотонно возрастающей зависимостью

без возвратных движений. Величина участка 3-4 зависит от величины силы трения в момент прекращения движения. С учетом скорости нагружения характеристика силовых смещений будет иметь все характерные участки, а ее ветви будут находиться внутри зоны $2\Delta T$ ближе или дальше от граничных линий в зависимости от конкретной силы P , а вибрации придадут ветвям ступенчатый вид (см. рис. 3,б).

При наличии отрыва движение может начаться при появлении нагрузки сразу же скачками, соответствующими моментам времени, в течение которых нет контакта в стыке. Силовая характеристика в этом случае вырождается в прямую, характеризующую чисто упругие свойства ТС.

В случае, когда вектор амплитуды вибраций направлен вдоль вектора нагрузки и плоскости стыка, наряду с движением без проскальзывания относительно вибрирующего основания, возможно движение с проскальзыванием. Условие скольжения:

$$\left| \frac{\mu mg(\ell^2 - \omega^2)}{A\omega^2 j_Y} \right| < 1, \quad (4)$$

где j_Y - жесткость элементов ТС
 $\ell^2 = j_Y / m$.

Левая часть уравнения (4) представляет собой изменение силы трения ΔT за счет инерционной силы. Уравнение движения для рассматриваемой ТС:

$$m\ddot{Y} + j_Y Y = F(t) > 0 \quad (5)$$

распадается на два случая

$$F(t) = \begin{cases} P(t) - T(t) + Am\omega^2 \sin \omega t & (6) \\ P(t) + \text{sign}(\cos \omega t) T(t) & (7) \end{cases}$$

Выражение (6) соответствует отсутствию, а (7) - наличию проскальзывания в стыках ТС. Характеристики силовых смещений, построенные в соответствии с уравнениями (5)-(7), показаны на рис. 4, а, б. Они построены без учета фактора времени. С учетом скорости нагружения и непрерывности процесса получим ступенчатые ветви характеристики силовых смещений (см. рис. 4, в).

Используя полученные аналитические зависимости, разработаны и отлажены программы на языке "Фортран", отражающие процесс формирования характеристик силовых смещений простейших ТС при наличии вибрации разной направленности. С помощью данных программ получены и проанализированы характеристики силовых смещений при наличии виб-

раций с частотой от 5,0 до 30 кГц и амплитудами от 0,01 до 40 мкм для вариантов: 1) $A=const, f=var$; 2) $A=var, f=const$; 3) $A=const, f=const$.

Изучено влияние скорости нагружения на форму характеристики силовых смещений и ее площадь.

Для проверки полученных данных была создана на базе вибростенда ВЭДС-200 экспериментальная установка. Проведенные эксперименты подтвердили основные теоретические выводы. Подтверждено, что вибрации приводят к снижению сил трения, которые, в свою очередь, влияют на процесс формирования характеристики силовых смещений. Наиболее эффективны высокочастотные колебания, нормальные плоскости стыка.

Разработаны рекомендации по повышению точности изготовления деталей с использованием вибраций.

Влияние вибраций ультразвуковой частоты на точность обработки исследовалось при обработке стальных валов на токарно-винторезном станке нормальной точности. При помощи ультразвукового магнитострикционного вибратора возбуждались колебания суппорта. Для измерения и анализа вибраций в различных точках суппортной группы использовалась современная электронная аппаратура. Исследования показали, что при чисто синусоидальном возбуждении колебаний инструмента вибрации других точек суппортной группы характеризуются широкополосным спектром, наличие которого является следствием нелинейных искажений, вносимых элементами трения. На величину нелинейных искажений оказывает влияние и амплитуда колебаний, с увеличением которой при неизменной частоте эти искажения растут.

Как следует из анализа, приведенного в главе IV, управляя величиной сил трения в стыке и связанных с ними остаточных смещений, являющихся параметрами характеристики силовых смещений, можно повысить точность обработки. Измерения диаметров деталей, обработанных на станке при различных параметрах колебаний: 1) $f = 28-31$ кГц; 2) $f = 22-12,5$ кГц; 3) $f = 8,0-8,5$ кГц; 4) $f = 0$ кГц, подтвердили данный тезис и показали (см. рис. 5), что применение вибрации с частотой $f = 28-31$ кГц позволило повысить точность обработки в 7,3 раза и поднять качество допуска на размер с 12 до 8.

Режимы обработки для всех деталей были неизменными. Массивы данных обрабатывались с помощью ЭВМ по специальной программе "АСОСД". Гистограммы приведены на рис. 5.

Стабилизирующее влияние высокочастотных вибраций на величину сил трения и резания установлено при моделировании процесса обработки. Резец был заменен имитатором, контактирующим с деталью через сферу

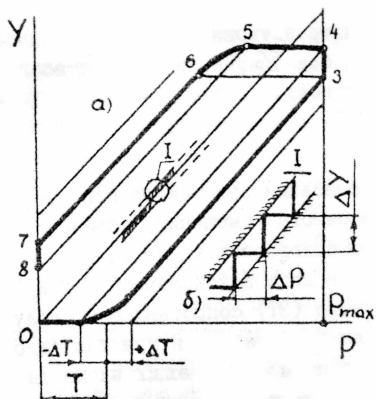


Рис. 3. Влияние вибраций, направленных перпендикулярно плоскости стыка, на форму характеристики силовых смещений

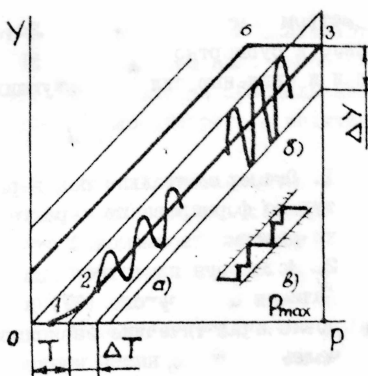


Рис. 4. Влияние вибраций, параллельных плоскости стыка, на форму характеристики силовых смещений без учета фактора времени

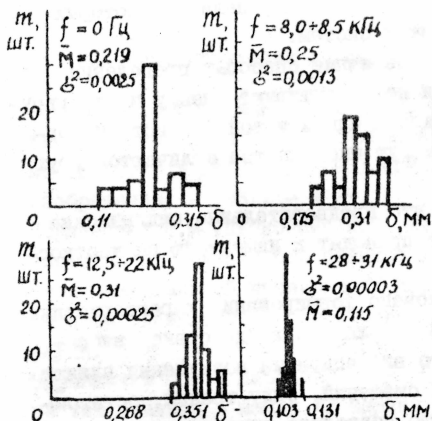


Рис. 5. Гистограммы рассеивания размеров диаметров деталей, обработанных с наложением вибраций

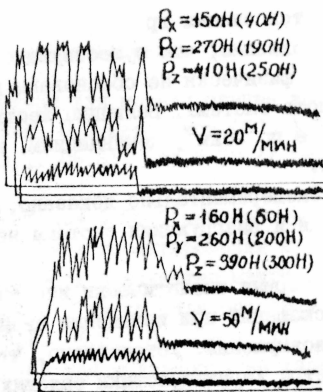


Рис. 6. Стабилизация сил, действующих на суппорт станка при воздействии на него вибрациями с частотой 22 КГц и амплитудой 3 мкм.

диаметром 5 мм. Из рис. 6 видно, что ультразвуковые вибрации, приложенные к суппортной группе станка вдоль оси Z , приводят к стабилизации и снижению сил, действующих на суппорт.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально подтверждены основные закономерности теории структур по формированию характеристик силовых смещений, устанавливающих зависимость смещений от внешнего силового воздействия.

2. Используя известное описание ТС в виде закономерной совокупности элементов упругого (ЭУ) и неупругого (ЭТ) сопротивлений, получены новые аналитические зависимости для расчета характеристик силовых смещений однородных и неоднородных систем, включающих элементы с зависимой и независимой характеристиками трения от внешнего силового воздействия.

3. Разработаны оригинальные стенды для физического моделирования конструкций с целью изучения свойств их характеристик силовых смещений.

4. Экспериментально установлено, что форма силовой характеристики, ее площадь, величина остаточных и предельных смещений зависят от свойств ЭУ и ЭТ, их количества, вида связи.

5. Подтверждено, что любая технологическая система характеризуется наличием остаточных сил упругости и смещений, величина которых определяется силами трения в элементах систем.

6. Показано, что существующие различные способы определения жесткости физически не обоснованы и не гарантируют оценку чисто упругих свойств системы. Величины жесткости одной и той же системы, определенные по этим рекомендациям, могут многократно отличаться друг от друга.

7. Экспериментально доказано, что предварительные циклические нагружения и разгрузки системы не приводят к изменению ее жесткости.

8. Впервые аналитически исследовано формирование характеристики силовых смещений при изменении силы трения под воздействием вибрационных возмущений. Установлено, что вибрационные возмущения влияют на параметры характеристики силовых смещений, силу трения, остаточные смещения, площадь и ее форму. Это позволило выработать рекомендации по повышению точности обработки.

9. Экспериментально подтверждено, что вибрации приводят к снижению сил трения в стыках системы, что вызывает дискретное движение

элементов системы. На величину дискрет силы и перемещений оказывают влияние условия скольжения и скорость нагружения. Чем выше скорость нагружения, тем больше величина дискрет. При появлении проскальзывания контактирующих поверхностей возрастает число дискрет, а величина их уменьшается.

10. Изменение характеристики силовых смещений вибрационным воздействием с частотой $f = 28...31$ кГц позволило повысить точность обработки стальных валов на токарно-винторезном станке нормальной точности в 7,3 раза и обеспечить 8-ой квалитет точности вместо 12-го.

11. Использование рекомендаций автора по изменению силовой характеристики вибрационным воздействием на машиностроительном предприятии позволило повысить точность обработки в условиях данного производства в 4,6 раза, сократить 4 единицы оборудования для одного изделия, высвободить 6 рабочих, 70 кв. м производственных площадей и сэкономить свыше 4,5 т металла.

Материалы диссертации использованы при разработке методики аналитической оценки силовых характеристик станков на стадии проектирования, которая внедрена на Московском производственном объединении по выпуску автоматических линий и специальных станков им. 50-летия СССР с экономическим эффектом в среднем 3,5 тыс. рублей на каждую проектируемую модель станка.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. А.С. 853453 СССР МКИ³ G 01 5/00. Стенд для моделирования жесткости узлов механизмов / П.М.Чернянский, С.М.Широбоков (СССР). Заявлено 30.II.79 № 2848569/25-28; Опубл. 17.08.81. Бюл. № 29 // Открытия. Изобретения. - 1981. - № 29.
2. Чернянский П.М., Дьяконова Н.П., Широбоков С.С. О методе оценки характеристик жесткости станков в стадии проектирования и его экспериментальной проверке // Надежность и качество машин: испытание, диагностика, прогнозирование: Тезисы докл. Всесоюз. научн.-техн. конф. - М.: ВСНТО, 1981. - Ч.П. - С. 109 - 111.
3. Чернянский П.М., Широбоков С.М. Стенд для моделирования характеристик станков и машин // Машины, приборы, стенды. Каталог МВТУ. - 1982. - № 8. - С. 8.
4. Широбоков С.М. Экспериментальная проверка метода расчета характеристик жесткости станков // Известия вузов. Машиностроение. - 1982. - № 8. - С. 120-124.

5. Широбоков С.М. Моделирование характеристик жесткости станков // Известия вузов. Машиностроение. - 1982. - № 10. - С.133-134.
6. А.С. 101 7941 СССР МКИ³ G 01 5/00. Стенд для моделирования жесткости узлов механизмов / П.М.Чернянский, С.М.Широбоков, Н.П.Дьяконова (СССР). - Заявлено 25.01.82 № 3391930 /25-28; Оpubл. 15.05.83. Бюл. № 18 // Открытия. Изобретения. -1983.-№ 18.
7. Дьяконова Н.П., Широбоков С.М. Повышение надежности металлорежущих станков в стадии проектирования с учетом их будущих характеристик жесткости // Надежность и долговечность машин и приборов: Тезисы докл. II Всесоюз. научн.-техн. конф. - Куйбышев, 1984.- С. 71-72.

