

ЧЕВЫЧЕЛОВ СЕРГЕЙ ЮРЬЕВИЧ

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ
МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МОБИЛЬНОГО
ВИБРАЦИОННОГО ПРИВОДА С СУХИМ ТРЕНИЕМ**

Специальность 05.13.06 — Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Курск – 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Курский² государственный технический университет» на кафедре вычислительной техники в совместной научно-исследовательской лаборатории Центра информационных технологий в проектировании РАН и Курского государственного технического университета: «Информационные распознающие телекоммуникационные интеллектуальные системы».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Жусубалиев Жаныбай Турсунбаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки РФ
Сизов Александр Семенович

кандидат технических наук
Тюпин Дмитрий Викторович

Ведущая организация: *ГОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова»*

Защита состоится 21 декабря 2009 г. в 12-00 часов в конференц-зале на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.105.03 при ГОУ ВПО «Курский государственный технический университет» по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Курский государственный технический университет», по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Автореферат разослан 20 ноября 2009 г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций

_____ Старков Ф. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Точение является одним из распространенных методов обработки материалов резанием, выполняется на станках токарной группы и применяется для изготовления деталей типа тел вращения и корпусных деталей. Технологический процесс токарной обработки материалов состоит из двух движений: главного вращательного движения заготовки (обрабатываемого материала) и вспомогательного поступательного движения подачи резца (режущего инструмента). То и другое движения обеспечиваются в токарных станках приводами, в которых вращательный момент передается от двигателей на исполнительные устройства.

В процессе токарной обработки материалов в технологической системе станок-приспособление-инструмент-деталь возникают вибрации, для которых характерен эффект неуправляемого внезапного увеличения амплитуды [Wiercigroch M., de Kraker A., 1999; Faulkner L.L., Logan E., 2001; Zhusubaliyev Zh.T., Mosekilde E., 2003; di Bernardo M. et.al., 2007]. С одной стороны, это приводит к значительному уменьшению жесткости технологической системы и точности обработанных поверхностей деталей. С другой стороны, управляя вибрациями режущего инструмента, можно достичь положительного эффекта, заключающегося в кратковременном периодическом увеличении скорости резания, за счет чего понижаются сила резания и температура среды в зоне резания, обеспечиваются периодический отдых режущих кромок резца и дробление стружки, а также повышается точность обработки [Подураев В.Н., 1970; Кумабэ Д., 1985].

До настоящего времени вибрационная обработка применялась только на шлифовальных и полировочных (финишных) операциях технологического процесса обработки материалов. Однако большинство станков отечественных предприятий являются станками токарного типа и их износ составляет более 75%. Для модернизации этих станков предлагается использовать вибрационное резание, т.е. вместо стандартных исполнительных механизмов подачи резца токарного оборудования использовать мобильные вибрационные приводы с сухим трением, позволяющие увеличить скорость токарной обработки. Такие приводы в технологическом процессе токарной обработки материалов вибрационным резанием до настоящего времени не применялись.

Мобильные вибрационные устройства могут передвигаться без специальных движителей, взаимодействуя с внешней средой непосредственно своим корпусом, и обладают рядом преимуществ по сравнению с колесными, гусеничными и шагающими системами в первую очередь благодаря простоте конструкции (Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н., Зейдис И.М., Фигурина Т.Ю., Яцун С.Ф., Fidlin A., Zimmermann K.). Это преимущество позволяет создавать на основе таких принципов движения конструктивно простые устройства для вибрационного резания, объединяющие в себе функции механизмов поступательной подачи резца с вибрациями.

Важным типом взаимодействия мобильных вибрационных систем с внешней средой является сухое трение. Для реализации движения механической систе-

мы как целого необходимо, чтобы сила трения, препятствующая перемещению в направлении желаемого движения, была меньше, чем сила трения, препятствующая движению в противоположном направлении. Такая «асимметрия» трения обеспечивается разными способами, например, путем снабжения контактных поверхностей чешуйчатыми накладками, асимметрией колебаний внутренних масс или управлением силой трения за счет изменения нормального давления опоры [Болотник Н.Н., Зейдис И.М., Циммерманн К., Яцун С.Ф., 2006].

Известно, что для тел, взаимодействующих через элемент сухого трения, существует несколько бифуркационных механизмов, которые приводят к слипанию трущихся масс и возникновению участков движения с длительными остановками [Фейгин М.И., 1994]. Управляя силой трения и тем самым регулируя длительности участков колебательных движений с остановками на периоде вынуждающей силы, можно получать пошаговое прямолинейное колебательное движение вибрационной системы с заданными динамическими характеристиками, удовлетворяющее требованиям режима резания (подача резца, глубина и скорость резания), заданной частоте и амплитуде колебаний резца.

Изучению бифуркаций в системах с сухим трением в последние годы уделяется большое внимание [Kuznetsov Yu.A., Rinaldi S. and Gragnani A., 2003; di Bernardo M., Budd C., Champneys A.R., Kowalczyk P., Nordmark A.B., Olivar G. and Piiroinen P.T., 2007; Leine R.I. and van de Wouw N., 2008]. В то же время практически отсутствуют работы, посвященные анализу бифуркационного поведения мобильных вибрационных приводов. Имеющиеся результаты касаются, главным образом, динамических особенностей мобильных устройств без учета сухого трения. Более того, до настоящего времени остается невыясненным, какие типы бифуркаций ответственны за возникновение колебательных процессов, обеспечивающих управляемые движения.

Таким образом, в настоящее время имеет место **противоречие**, состоящее в том, что, с одной стороны, необходимо увеличить скорость резания с помощью мобильных вибрационных приводов с сухим трением, а с другой стороны — недостаточно изучены закономерности управляемых движений мобильных вибрационных систем, что сдерживает их применение в технологическом процессе токарной обработки материалов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект №06-01-00811-а «Бифуркационный анализ кусочно-гладких динамических систем».

Объект исследований. Мобильные вибрационные приводы для обработки материалов резанием на токарных станках.

Предмет исследований. Бифуркации и закономерности управляемых движений мобильного вибрационного привода для технологического процесса токарной обработки материалов.

Цель работы: увеличение скорости токарной обработки материалов и уменьшение мощности резания на основе применения мобильного вибрационного привода с сухим трением.

Основная научная задача состоит в разработке метода управления движением резца, особенностью которого является применение мобильного вибрационного привода с сухим трением, обеспечивающего задание требуемого режима резания и исключение бифуркационных переходов.

Эта задача декомпозирована на следующие частные **задачи**:

1. Анализ состояния вопроса управления процессом токарной обработки материалов на основе мобильного вибрационного привода.
2. Разработка математической модели мобильного вибрационного привода с регулированием силы сухого трения.
3. Разработка метода и алгоритма управления процессом токарной обработки материалов с применением мобильного вибрационного привода.
4. Определение областей пространства параметров, обеспечивающих заданный режим резания.
5. Разработка структуры мобильного вибрационного устройства с сухим трением и экспериментальное определение его характеристик.

Научная новизна работы. В диссертационной работе получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Математическая модель мобильного вибрационного привода в виде системы дифференциальных уравнений с разрывной правой частью, основанная на описании характеристики сухого трения в базисе разрывных функций, обеспечивающая общий подход к расчету динамических режимов и бифуркационных переходов для разных способов регулирования силы сухого трения.
2. Аналитические соотношения и алгоритмы определения бифуркационных границ, базирующиеся на гибридном алгоритме поиска периодических режимов, основанном на сканировании фазовой плоскости, особенностью которых является учет нарушения условий существования периодических движений, позволяющие определять области параметров мобильного вибрационного привода, обеспечивающих заданный режим резания.
3. Метод управления процессом токарной обработки материалов, состоящий в получении условий реализации скользящих режимов, определении областей требуемых режимов движения резца, обеспечивающий повышение скорости токарной обработки.

Методы исследования. Полученные в диссертационной работе результаты базируются на методах нелинейной динамики, математического моделирования, вычислительной математики и вибрационного резания, теории автоматического управления, теории устойчивости и бифуркаций, теории современного машиностроения.

Практическая ценность результатов работы заключается в следующем:

1. Разработанные математические модели, методы и алгоритмы численно-аналитического анализа динамических режимов могут быть использованы для моделирования и проектирования широкого класса систем со скользящими режимами движения, в частности — устройств вибрационной механики, прецизионных дозаторов жидких сред, релейных и импульсных систем автоматического управления. Полученные аналитические зависимости пригодны для инженерных расчетов при

проектировании мобильных вибрационных приводов для токарных станков с числовым программным управлением.

2. Разработанная структура мобильного вибрационного устройства с сухим трением, метод и алгоритм управления процессом токарной обработки материалов позволяют повысить скорость токарной обработки и уменьшить мощность резания.

Реализация и внедрение. Результаты диссертационного исследования внедрены в ОАО «Прибор» (г. Курск) и используются в учебном процессе Курского государственного технического университета в рамках дисциплин «Математические модели процессов и систем» и «Основы теории управления», что подтверждается соответствующими актами.

Научные результаты, выносимые на защиту:

1. Математическая модель мобильного вибрационного привода в виде системы дифференциальных уравнений с разрывной правой частью, обеспечивающая общий подход к расчету динамических режимов и бифуркационных переходов для разных способов регулирования силы сухого трения.

2. Аналитические соотношения и алгоритмы расчета бифуркационных границ, позволяющие определять области параметров мобильного вибрационного привода, обеспечивающих заданный режим резания.

3. Метод управления процессом токарной обработки материалов с использованием мобильного вибрационного привода, обеспечивающий повышение скорости токарной обработки и уменьшение мощности резания.

4. Структура мобильного вибрационного устройства с сухим трением на основе дебалансного вибровозбудителя, обеспечивающего реализацию предложенного принципа управления процессом токарной обработки материалов вибрационным резанием.

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на: Международном конгрессе «Нелинейный динамический анализ», посвященном 150-летию со дня рождения академика А.М. Ляпунова (Санкт-Петербург, 2007); 3rd IFAC Workshop «Periodic Control Systems» (Saint-Petersburg, 2007); 7-й и 8-й международных конференциях «Распознавание» (Курск, 2005, 2008); Международной научной конференции «Информационно-математические технологии в экономике, технике и образовании» (Екатеринбург, 2007); 10th, 12th International Student Olympiads on Automatic Control (Saint-Petersburg, 2004, 2008); Всероссийской конференции «Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве» (Воронеж, 2008); научно-технических семинарах кафедры вычислительной техники КурскГТУ в 2007-2009 гг.

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 22 печатных работы, среди которых 8 статей, из них 5 — в журналах, входящих в перечень ВАК, 1 патент РФ на изобретение (№2364527) и 2 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ (№2007611309, №2008610950).

В работах, выполненных в соавторстве, лично автором в [1, 2, 9] разработаны

гибридный алгоритм поиска периодических режимов в системах с сухим трением, численно-аналитический метод расчета границ скользящих режимов, предложено аналитическое описание характеристики сухого трения в базисе разрывных функций и выполнен бифуркационный анализ в пространстве параметров; в [4] разработан алгоритм поиска периодических режимов, основанный на решении краевой задачи методом оптимизации и выполнен расчет динамических режимов; в [3, 5, 7, 8, 13] разработан глобально сходящийся алгоритм поиска устойчивых и неустойчивых периодических режимов в кусочно-гладких динамических системах (в [1, 2] алгоритм обобщен на класс кусочно-гладких систем со скользящими режимами); в [13, 14] разработан программный комплекс с открытой архитектурой для моделирования, бифуркационного анализа и расчета динамических режимов систем с сухим трением; в [12] разработана функциональная схема системы управления с комбинированным релейным регулированием.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, включающего 127 наименований, и приложения, изложена на 118 страницах (без приложения) и поясняется 57 рисунками и 4 таблицами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая ценность и научные результаты, выносимые на защиту.

Первая глава — обзорная и посвящена анализу состояния вопроса управления процессом токарной обработки материалов на основе мобильного вибрационного привода.

Процесс вибрационного резания заключается в том, что на поступательное движение подачи резца накладываются вибрации в радиальном, тангенциальном и осевом направлениях [Подураев В.Н., 1970; Кумабэ Д., 1985]. Это приводит к снижению мощности резания, температуры среды в зоне резания, увеличению скорости резания, стойкости резца и эффективности использования смазочно-охлаждающих жидкостей. Согласно [Подураев В.Н., 1974], колебания резца в осевом или тангенциальном направлениях являются эффективным средством дробления стружки и приводят к увеличению точности обработанных поверхностей, а радиальные колебания режущего инструмента её снижают.

Для обеспечения вибрационного резания токарные станки снабжаются электрическими, гидравлическими или механическими генераторами колебаний, устанавливаемыми на суппорте станка [Подураев В.Н., 1970; Кумабэ Д., 1985; Сергиев А.П. и Швачкин Е.Г., 2001; Лобусов А.В., 2009; Расторгуев Д.А. и др., 2003; Гоц Э.М. и Тихонов С.Н., 2005]. Это приводит к усложнению конструкции станка и понижению жесткости технологической системы станок-приспособление-инструмент-деталь. Одним из путей решения этой проблемы является применение мобильного вибрационного привода с сухим трением, что позволит упростить конструкцию токарного станка за счет исключения стандартных исполнительных

механизмов подачи резца.

Вопросам динамики и проектирования мобильных вибрационных систем в настоящее время уделяется самое пристальное внимание. Эти исследования стимулируются тем, что открываются широкие возможности для создания роботов, основанных на новых принципах движения (без специальных движителей, таких как колеса, гусеницы), способных перемещаться как по поверхности, так и внутри плотных или сыпучих сред. Сфера применения таких механизмов, как отмечается в работах (Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н., Зейдис И.М., Фигурин Т.Ю., Яцун С.Ф., Fidin A., Zimmermann K.), обширна: от выполнения технологических операций в зонах с «агрессивными средами» до использования в медицине для исследования внутренних полостей или сосудов человеческого организма. Исследована и обоснована перспективность применения мобильных вибрационных приводов в технологическом процессе токарной обработки материалов.

Вторая глава посвящена разработке математической модели мобильного вибрационного привода с регулированием силы сухого трения.

На рис. 1, а приведена упрощенная структурная схема токарного станка, состоящего из привода вращения заготовки M_1 и мобильного вибрационного привода, обеспечивающего поступательное движение резца с вибрациями в осевом направлении. Расчетная схема мобильного вибрационного привода приведена на рис. 1, б. Математическая модель мобильного вибрационного привода в безразмерной форме имеет вид

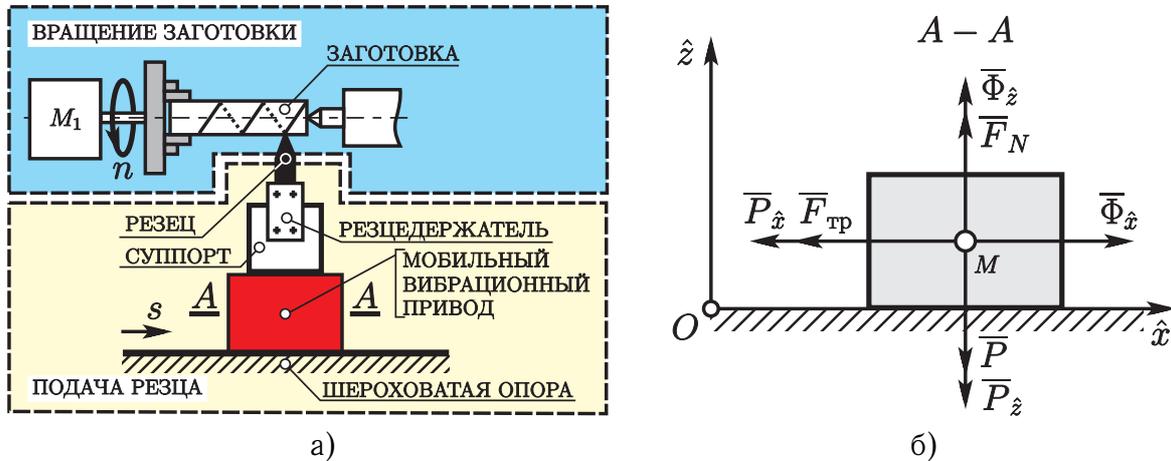


Рис. 1. а — Упрощенная структурная схема токарного станка на основе мобильного вибрационного привода; б — расчетная схема мобильной вибрационной системы

$$\ddot{x} = \gamma_m \sin t + \varphi(t, \dot{x}), \quad (1)$$

$$\varphi(t, \dot{x}) = -\frac{f_{тр}N + \rho_x}{2}(1 + \text{sign } \dot{x}) + \frac{\chi f_{тр}N + \rho_x}{2}(1 - \text{sign } \dot{x}), \quad \text{при } \dot{x} \neq 0 \quad (2)$$

$$\text{и } -f_{тр}N - \rho_x \leq \varphi(t, \dot{x}) \leq \chi f_{тр}N + \rho_x, \quad \text{при } \dot{x} = 0, \quad N = 1 + \rho_z + \beta_m \sin(t + \Omega_0). \quad (3)$$

Безразмерные переменные и параметры связаны с соответствующими размерными величинами следующими соотношениями:

$$x = \frac{\omega^2}{g} \hat{x}, \quad t = \omega \hat{t}, \quad \gamma_m = \frac{F_{\hat{x}}}{P}, \quad \beta_m = \frac{F_{\hat{z}}}{P}, \quad \rho_x = \frac{P_{\hat{x}}}{P}, \quad \rho_z = \frac{P_{\hat{z}}}{P}, \quad N = \frac{F_N}{P}, \quad P = Mg.$$

Здесь функция $\varphi(t, \dot{x})$ имеет смысл силы сухого трения $F_{\text{тр}}$, χ и $f_{\text{тр}}$ — асимметрия и коэффициент этой силы, F_N — сила нормального давления опоры, M — масса привода, g — ускорение силы тяжести, $P_{\dot{x}}$ и $P_{\dot{z}}$ — осевая и тангенциальная составляющие силы резания, $F_{\dot{x}}$ и $F_{\dot{z}}$, ω , Ω_0 — соответственно амплитуды, частота и разность фаз гармонических вынуждающих сил $\Phi_{\dot{x}}$ и $\Phi_{\dot{z}}$.

В работе рассматриваются два способа управления движением резца с использованием мобильного вибрационного привода: в первом случае — за счет асимметрии сухого трения, при этом в (1)-(3) $\beta_m = 0$ (рис. 2, а); во втором — за счет гармонической силы нормального давления опоры N , при этом в (1)-(3) $\chi = 1$ (рис. 2, б).

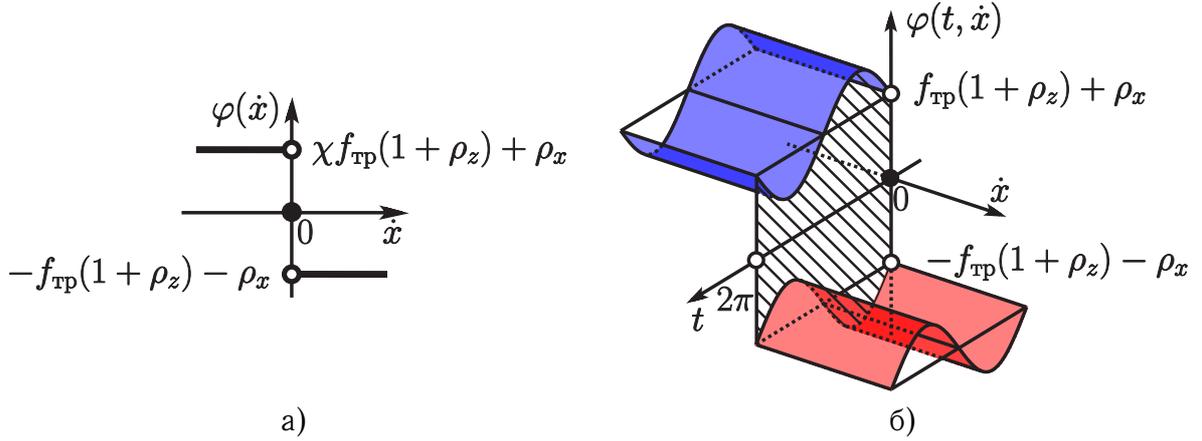


Рис. 2. а — Асимметричная сила сухого трения; б — гармоническая сила нормального давления опоры

Фазовая плоскость (t, \dot{x}) динамической системы (1) разделяется на две области: D_+ , где $\dot{x} > 0$ и D_- , где $\dot{x} < 0$. Граница S , разделяющая D_+ и D_- , состоит из областей S_+ , S_- и S_0

$$S_+ = \{(t, \dot{x}) : \tau_L^+ \leq t \leq \tau_R^+, \dot{x} = 0\}, \quad S_- = \{(t, \dot{x}) : \tau_L^- \leq t \leq \tau_R^-, \dot{x} = 0\}; \quad (4)$$

$$S_0 = \{(t, \dot{x}) : -\chi f_{\text{тр}}(1 + \rho_z + \beta_m \sin(t + \Omega_0)) - \rho_x < \gamma_m \sin t, \\ \gamma_m \sin t < f_{\text{тр}}(1 + \rho_z + \beta_m \sin(t + \Omega_0)) + \rho_x, \dot{x} = 0\}, \quad (5)$$

где τ_L^+ , τ_R^+ и τ_L^- , τ_R^- — границы областей S_+ и S_- с областью S_0 соответственно.

Здесь S_+ — часть S , с которой фазовая точка уходит в область D_+ , а S_- — та часть S , с которой фазовая точка уходит в D_- . В окрестности $S_0 \subset S$ фазовые траектории с обеих областей D_+ и D_- направлены к S . Поэтому фазовая точка, оказавшаяся на S_0 , не может сойти с S ни в область D_+ , ни в область D_- . Движение по S_0 принято называть *скользящим*, а саму S_0 — *областью скользящих движений*. В системах с сухим трением такому режиму соответствует слипание массы с неподвижным основанием или колебания массы с длительными остановками [Уткин В.И., 1974; Филиппов А.Ф., 1985; Фейгин М.И., 1994; di Bernardo M. et al., 2008].

Участки фазовых траекторий в подпространстве D_+ будем обозначать Γ_+ , в D_- — Γ_- , а участок скользящего движения — Γ_0 . В динамической системе (1) возможны различные типы периодических движений. Периодический режим конкретного типа характеризуется фазовой траекторией, определенным образом сшитой из глад-

ких участков Γ_0 , Γ_- и Γ_+ . Для определения типа периодического решения введена символическая характеристика, определяющая порядок сшивания траектории периодического движения. Эта характеристика представляет собой последовательность, составленную из трех символов Γ_0 , Γ_- и Γ_+ . Использование символической характеристики позволяет существенно упростить понимание общей картины возможных типов движения и бифуркационных переходов.

В табл. 1 приведена классификация типов периодического решения системы (1). В строке №1 табл. 1 приведено обозначение области существования периодического режима в пространстве параметров и указана символическая характеристика периодического движения. Следует отметить, что характеристики, переходящие друг в друга при циклической перестановке символов, отвечают периодическому движению одного типа. В строке №2 приведены условия существования периодического режима, тип которого приведен в строке №3. В системах с сухим трением

Таблица 1. Классификация типов периодического решения системы (1)

№	Тип периодического решения	Тип периодического решения
1	$\Pi_{2,0}^\pm : \Gamma_+ \Gamma_-$	$\Pi_{4,2}^\pm : \Gamma_+ \Gamma_0 \Gamma_- \Gamma_0$
2	$\tau_L^+ \leq \tau_+ \leq \tau_R^+, \tau_L^- \leq \tau_- \leq \tau_R^-$	$\tau_R^+ < \tau_+ < \tau_L^-, \tau_R^- < \tau_- < \tau_L^+$
3		
1	$\Pi_{3,1}^\pm : \Gamma_- \Gamma_+ \Gamma_0$	$\Pi_{2,1}^- : \Gamma_- \Gamma_0$
2	$\tau_R^+ \leq \tau_+ \leq \tau_L^-, \tau_L^+ < \tau_- < \tau_R^+$	$\tau_R^- \leq \tau_- < \tau_L^-$ или $\tau_R^+ \leq \tau_- < \tau_L^+$
3		
1	$\Pi_{3,1}^\pm : \Gamma_+ \Gamma_- \Gamma_0$	$\Pi_{2,1}^+ : \Gamma_+ \Gamma_0$
2	$\tau_L^- \leq \tau_+ \leq \tau_R^-, \tau_R^- < \tau_- < \tau_L^+$	$\tau_R^- \leq \tau_+ < \tau_L^+$ или $\tau_R^+ \leq \tau_+ < \tau_L^+$
3		

возможен особый тип состояния равновесия, соответствующий сплошному сколь-

заящему движению или просто неподвижному состоянию. Область существования такого режима обозначим через Π_0 .

Известно, что в кусочно-гладких динамических системах возможны специфические бифуркации, не имеющие аналогов в гладких системах. При изменении параметров траектория периодического движения проходит через границу S или касается её. Это вызывает нарушение условий существования периодического режима и соответствует исчезновению или появлению участков, из которых сшивается траектория этого движения. Такие топологические изменения структуры фазового пространства получили название С-бифуркаций [Фейгин М.И., 1970, 1994; di Bernardo M., Feigin M., Hogan S. and Homer M., 1999] или «border-collision bifurcation» [Nusse H.E., Yorke J.H., 1992]. Простейшей С-бифуркационной картине соответствует непрерывный переход решения одного типа в решение другого типа. Возможны и более сложные ситуации, например, удвоение, «умножение» периода колебаний, рождение хаотического аттрактора или инвариантного тора из периодической орбиты (Фейгин М.И., Nusse H.E., Yorke J.H., Banerjee S., Жусубалиев Ж.Т., Mosekilde E., di Bernardo M. и др.). Численно и аналитически доказано, что в рассматриваемой системе С-бифуркации приводят только к изменению типа периодического режима.

В табл. 2 приведена классификация бифуркаций системы (1). В строке №1 табл. 2 приводится обозначение бифуркационной границы и символические характеристики фрагментов периодической траектории до и после бифуркации (возникающий/исчезающий участок выделен квадратом), описание которой приведено в строке №2.

Таблица 2. Классификация бифуркаций

№	Бифуркация	Бифуркация
1	$C_\alpha^+ : \Gamma_- \Gamma_+ \leftrightarrow \Gamma_- \boxed{\Gamma_0} \Gamma_+$	$C_\alpha^- : \Gamma_+ \Gamma_- \leftrightarrow \Gamma_+ \boxed{\Gamma_0} \Gamma_-$
2	касание участком Γ_+ поверхности S в точке τ_L^+	касание участком Γ_- поверхности S в точке τ_L^-
1	$C_\beta^+ : \Gamma_- \Gamma_0 \leftrightarrow \Gamma_- \boxed{\Gamma_+} \Gamma_0$	$C_\beta^- : \Gamma_+ \Gamma_0 \leftrightarrow \Gamma_+ \boxed{\Gamma_-} \Gamma_0$
2	приход конца участка Γ_- в точку τ_R^+	приход конца участка Γ_+ в точку τ_L^+
1	$C_\delta^+ : \Gamma_0 \leftrightarrow \Gamma_0 \boxed{\Gamma_-}$	$C_\delta^- : \Gamma_0 \leftrightarrow \Gamma_0 \boxed{\Gamma_+}$
2	трансверсальное пересечение участком Γ_+ поверхности S в точке $\tau_L^+ = \tau_R^+$	трансверсальное пересечение участком Γ_- поверхности S в точке $\tau_L^- = \tau_R^-$

Задача поиска периодического решения системы (1) заданного типа и построения бифуркационных границ была сведена к решению системы уравнений вида

$$\begin{cases} \cos(\tau_+ - \psi_0^+) - \cos(\tau_1 - \psi_0^+) + [f_{\text{тр}}(1 + \rho_z) + \rho_x](\tau_+ - \tau_1)/\gamma_m^+ = 0; \\ \cos(\tau_- + \psi_0^-) - \cos(\tau_2 + \psi_0^-) - [\chi f_{\text{тр}}(1 + \rho_z) + \rho_x](\tau_- - \tau_2)/\gamma_m^- = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь ψ_0^+ , ψ_0^- , γ_m^+ , γ_m^- определяются параметрами системы (1), а переменные τ_1 и τ_2 — типом периодического решения или бифуркационным переходом.

Для решения этой системы разработан гибридный глобально-сходящийся алгоритм, основанный на сканировании фазовой плоскости динамической системы (1).

Уравнение в вариациях для анализа устойчивости периодического решения динамической системы (1) имеет вид:

$$\ddot{\varepsilon} = \alpha_k \delta(t - t_k) \dot{\varepsilon}, \quad \dot{\varepsilon}(0) = \varepsilon_0; \quad (7)$$

$$\alpha_k = \frac{f_k^+ - f_k^-}{f_k^-}, \quad f_k^\pm = \lim_{t \rightarrow t_k \pm 0} f_\pm(t, \dot{x}_c), \quad f_\pm(t, \dot{x}_c) = \gamma_m \sin t + \varphi_\pm(t, \dot{x}_c).$$

Здесь $t_k, k = \overline{1, q}$ – моменты разрыва правой части (1) на траектории периодического режима $\dot{x}_c(t)$, $\dot{x}_c(t + 2\pi) \equiv \dot{x}_c(t)$, отвечающие моментам времени $\tau_L^\pm, \tau_R^\pm, \tau_\pm$, где q – число точек разрыва на периоде $T = 2\pi$; $\delta(t - t_k)$ – функция Дирака; $\varphi_+(t, \dot{x}_c)$ соответствует характеристике сухого трения $\varphi(t, \dot{x}_c)$ в области $t > t_k$, а $\varphi_-(t, \dot{x}_c)$ – в области $t < t_k$. Решение $\dot{\varepsilon}(t)$ уравнения (7) кусочно-непрерывно с разрывом первого рода в точках t_k : $\dot{\varepsilon}_k^+ = \frac{f_k^+}{f_k^-} \dot{\varepsilon}_k^-$, $\dot{\varepsilon}_k^\pm = \lim_{t \rightarrow t_k \pm 0} \dot{\varepsilon}(t)$. Для того чтобы периодический режим $\dot{x}_c(t)$ был устойчивым, т.е. $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\varepsilon}(t) = 0$, достаточно, чтобы

мультипликатор Флоке $\rho = \prod_{k=1}^q \frac{f_k^+}{f_k^-}$ был по модулю меньше единицы $|\rho| < 1$.

Установлено, что если t_k соответствует границе области скользящих режимов S_0 , с которой $\dot{x}_c(t)$ уходит в область D_+ или в D_- , то решение $\dot{\varepsilon}(t)$ в точке t_k непрерывно. Доказано, что периодический режим $\dot{x}_c(t)$ с участками скользящих движений является сверхустойчивым. Доказательство основано на том, что в точке t_k , $\tau_R^\pm \leq t_k < \tau_L^\mp$, величина $f_k^+/f_k^- = 0$ и, следовательно, мультипликатор Флоке ρ обращается в нуль.

Третья глава посвящена анализу бифуркаций в пространстве параметров мобильного вибрационного привода с различными способами регулирования силы сухого трения с целью определения областей пространства параметров, обеспечивающих заданный режим движения резца, разработке метода и алгоритма управления процессом токарной обработки материалов на основе мобильного вибрационного привода.

Исследования показали, что управление мобильным вибрационным приводом путем варьирования асимметрии характеристики сухого трения обеспечивает движение резца только в одном направлении. Для реверса движения резца требуется вводить асимметрию в противоположной ветви характеристики сухого трения, что усложняет систему управления мобильным вибрационным приводом. Установлено, что для технологического процесса токарной обработки материалов целесообразно использовать мобильный вибрационный привод, управляемый за счет регулирования силы нормальной реакции опоры, который обеспечивает прямолинейное колебательное движение резца в различных направлениях вдоль оси вращения заготовки.

На рис. 3 приведена трехпараметрическая бифуркационная диаграмма системы (1) с таким способом регулирования силы сухого трения.

В областях $\Pi_{2,1}^-$ и $\Pi_{2,1}^+$ существует периодическое решение, траектория которого сшивается из двух участков с характеристиками $\Gamma_- \Gamma_0$ и $\Gamma_+ \Gamma_0$, соответственно. Резец совершает пошаговое движение с одной остановкой на периоде вынуждающей силы, причем в области $\Pi_{2,1}^-$ (рис. 4, а) направление движения противоположно по отношению к $\Pi_{2,1}^+$ (рис. 4, д).

При переходе в область $\Pi_{4,2}^\pm$ нарушается условие существования периодических решений $\Gamma_- \Gamma_0$ и $\Gamma_+ \Gamma_0$ за счет изменения числа сшиваемых участков фазовых траекторий на бифуркационных границах C_δ^+ и C_δ^- пространства параметров $(f_{\text{тр}}, \Omega_0, \beta_m)$. При пересечении границы C_δ^+ к фазовой траектории $\Gamma_- \Gamma_0$ добавляется участок Γ_+ , а при переходе через C_δ^- в область $\Pi_{4,2}^\pm$ к траектории периодического режима с символической характеристикой $\Gamma_+ \Gamma_0$ добавляется участок Γ_- . В результате этого возникают вынужденные колебания с двумя участками скользящего режима, символическая характеристика которых за период имеет вид $\Gamma_+ \Gamma_0 \Gamma_- \Gamma_0$. Движение резца происходит с откатом и с двумя остановками на периоде вынуждающей силы. Исследования показали, что при $\pi/2 < \Omega_0 < 3\pi/2$ средняя скорость отрицательная, а при $0 < \Omega_0 < \pi/2$ и $3\pi/2 < \Omega_0 < 2\pi$ — положительная (рис. 4, б, е).

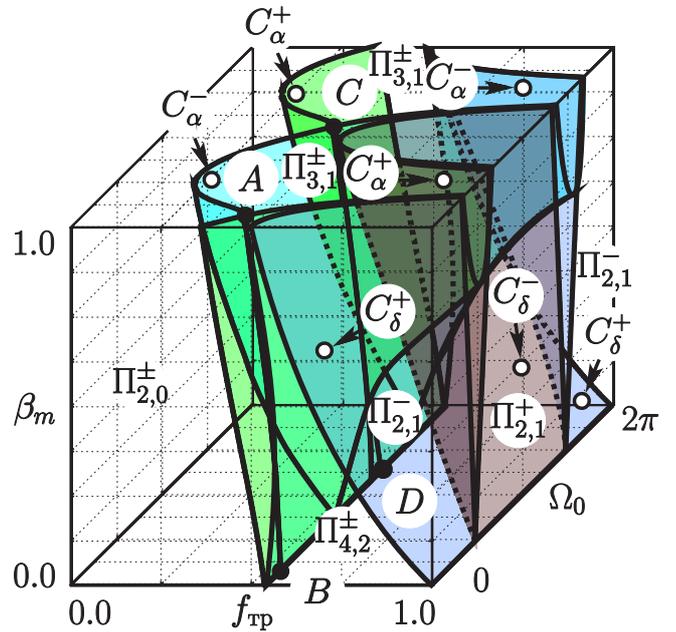


Рис. 3. Бифуркационная диаграмма в пространстве параметров $(f_{\text{тр}}, \Omega_0, \beta_m)$ динамической системы (1) ($\rho_x = 0, \rho_z = 0, \gamma_m = 1, \chi = 1$)

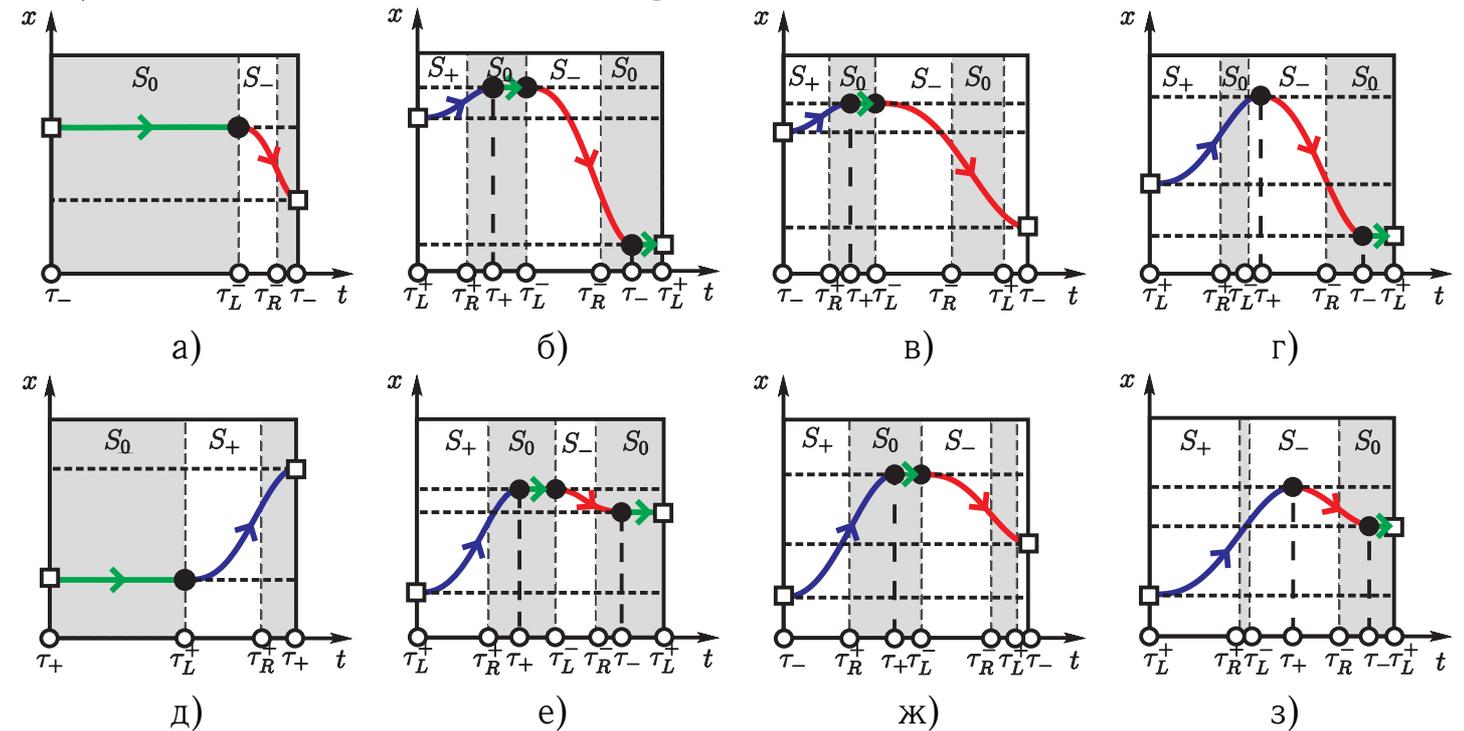


Рис. 4. Диаграммы движения резца $x(t)$ с остановками

На бифуркационной поверхности C_α^- , разделяющей области $\Pi_{4,2}^\pm$ и $\Pi_{3,1}^\pm$, конец участка Γ_+ периодического движения $\Gamma_+\Gamma_0\Gamma_-\Gamma_0$ попадает на границу τ_L^- области S_0 , а на другой поверхности C_α^+ конец участка Γ_- приходит в точку τ_L^+ (см. табл. 1), что приводит к исчезновению участка Γ_0 фазовой траектории. Таким образом, при переходе в область $\Pi_{3,1}^\pm$ возникает движение с одним участком скользящего режима, а именно: при пересечении границы C_α^- рождается режим с символической характеристикой $\Gamma_+\Gamma_-\Gamma_0$; при пересечении C_α^+ — режим с $\Gamma_-\Gamma_+\Gamma_0$. В области $\Pi_{3,1}^\pm$ резец движется с одной остановкой и откатом на периоде вынуждающей силы (рис. 4, в, г, ж, з).

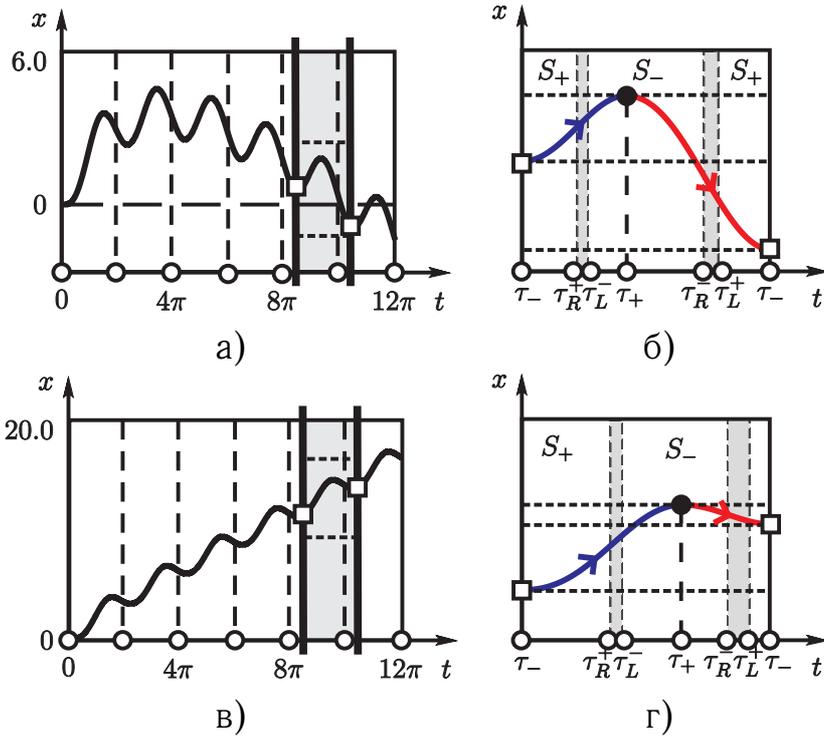


Рис. 5. Диаграммы движения резца $x(t)$ без остановок

В областях $\Pi_{2,0}^\pm$ и $\Pi_{3,1}^\pm$ направление движения резца зависит от всех параметров динамической системы (1) (рис. 5 и рис. 4, в, г, ж, з), тогда как в области $\Pi_{4,2}^\pm$ направление движения резца зависит только от величины фазового сдвига Ω_0 .

Результаты теоретического анализа позволили установить и сформулировать следующие закономерности движения резца:

- мобильный вибрационный привод может обеспечить пошаговое движение резца без откатов и с одной остановкой на периоде вынуждающей силы, с откатом и одной или двумя остановками на периоде вынуждающей силы, с откатом и без остановок;

- в областях параметров, где движение резца происходит с остановками, регулируя силу трения, можно управлять длительностью участков скользящего движения и, следовательно, подачей резца s ;

- исключение переходного процесса достигается путем выбора режима, при котором периодическая траектория стартует с участка скользящего движения Γ_0 .

- асимметричная характеристика сухого трения обеспечивает прямолинейное

Остается теперь рассмотреть C-бифуркацию, приводящую к рождению периодического движения без участков скользящих режимов. Такая бифуркация реализуется при переходе из области $\Pi_{3,1}^\pm$ в область $\Pi_{2,0}^\pm$ и связана с нарушением условия существования решения $\Gamma_-\Gamma_+\Gamma_0$ или $\Gamma_+\Gamma_-\Gamma_0$ из-за исчезновения участка Γ_0 фазовой траектории. В результате такого перехода возникает режим, сшитый из двух участков Γ_+ и Γ_- , соответствующий безостановочному движению резца с вибрациями (рис. 5, а, в и их увеличенные фрагменты б, г соответственно).

перемещение резца только в одну сторону, в то время как регулирование силы сухого трения величиной фазового сдвига Ω_0 позволяет управлять направлением перемещения резца.

Выполненный бифуркационный анализ позволил разработать метод и алгоритм управления процессом резания на основе мобильного вибрационного привода. Существо метода заключается в следующем:

1. Определение границ области скользящих режимов аналитически в виде явной зависимости от параметров математической модели путем решения уравнения для искомых границ (см. (4)-(5)).

2. Расчет периодического решения и определение его типа.

3. Определение направления перемещения мобильного вибрационного привода вычислением знака средней скорости за период вынуждающей силы.

4. Варьирование параметров системы (1) с целью обеспечения заданного режима резания.

На основе этого метода разработан алгоритм управления, который состоит из следующих шагов:

1. Задание требуемого режима (подачи s_* , глубины t_* и скорости v резания), составляющих $P_{\hat{x}}$ и $P_{\hat{z}}$ силы резания и мощности резания N_p .

2. Расчет диаграммы подачи резца s .

3. Определение параметров мобильного вибрационного привода

$\alpha = \{(f_{тр}, \chi, \Omega_0, M, F_{\hat{x}}, F_{\hat{z}}) : s = s_*\}$, соответствующих требуемой подаче s_* .

4. Определение средних скорости $v_{ср}(\alpha)$ и мощности $N_{р.ср}(\alpha)$ резания.

5. Выбор параметров мобильного вибрационного привода α_* , при $v_{ср}(\alpha_*) \rightarrow \max$ и $N_{р.ср}(\alpha_*) \rightarrow \min$.

В четвертой главе разработана структура мобильного вибрационного устройства с сухим трением и выполнены экспериментальные исследования по определению его характеристик.

На рис. 6 приведена структурная схема мобильного вибрационного устройства, состоящего из корпуса и расположенного внутри него дебалансного вибровозбудителя ДВ, вращение которого осуществляется малоинерционным электродвигателем ЭД постоянного тока.

Управление мобильным вибрационным приводом осуществляет управляющая ЭВМ, получающая сигналы с датчиков положения корпуса ДП и силы резания ДСР, и формирующая сигнал задания регулятору скорости вра-

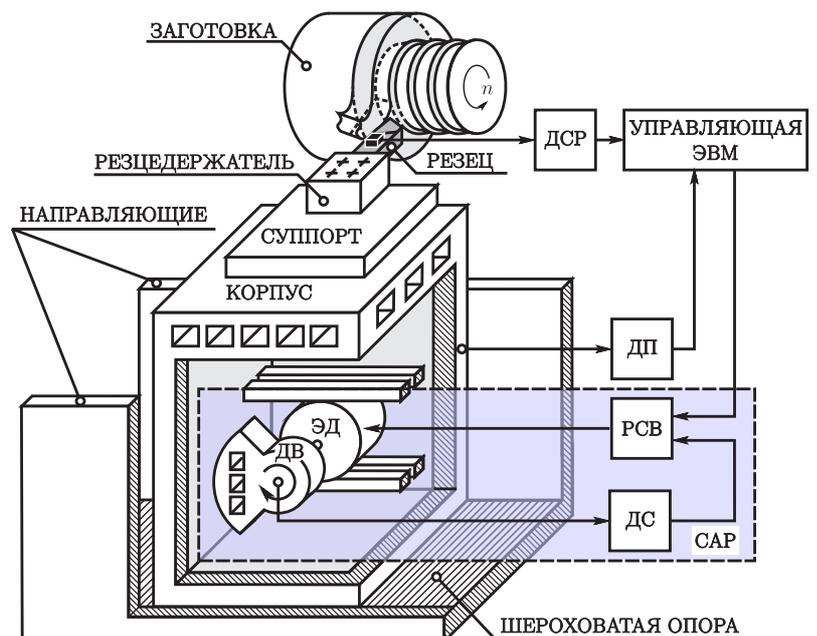


Рис. 6. Структурная схема мобильного вибрационного устройства

щения якоря двигателя вибрационного привода РСВ.

Регулятор скорости включает полупроводниковый преобразователь в цепи питания якоря, датчик скорости ДС в цепи обратной связи и релейный регулятор с двойной внешней принудительной синхронизацией. Использование релейного регулятора с двойной принудительной синхронизацией позволило исключить недетерминированные режимы.

Поведение такого привода описывается уравнением (1) при $\gamma_m = \beta_m$, $\rho_x = \rho_z$ и $F_{ц} = F_{\hat{x}} = F_{\hat{z}} = mr\omega^2$, где m , r и ω — центр масс, радиус и частота вращения дебалансного вибровозбудителя соответственно, а управление направлением перемещения осуществляется величиной фазового сдвига $\Omega_0 = \pm \frac{\pi}{2}$.

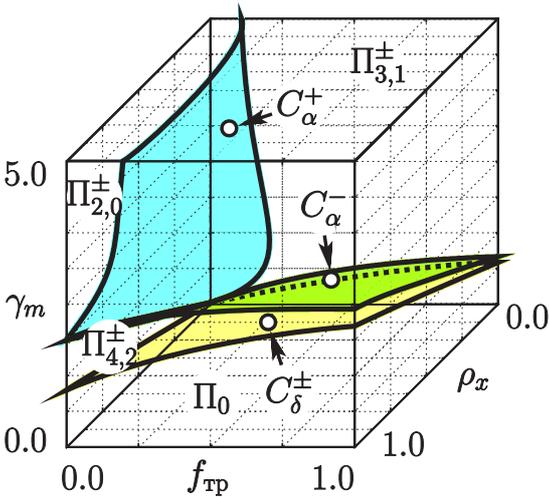


Рис. 7. Бифуркационная диаграмма мобильного вибрационного привода с дебалансным вибровозбудителем

В ходе экспериментальных исследований проводился расчет характеристик процесса токарной обработки заготовок из твердосплавной жаропрочной стали 12Х18Н9Т НВ141 с получением трех размеров деталей типа ось номинальными диаметрами d : 15 мм, 18 мм, 21 мм. В табл. 3 для каждого размера деталей приведены: номинальный диаметр d , режим резания (подача s_* , глубина t_* и скорость резания v), а также скорость вращения заготовки n , сила $P_{рез}$ и мощность N_p резания [Косилова А.Г., 1985].

На рис. 7 приведена бифуркационная диаграмма мобильного вибрационного устройства. Движение резца при параметрах из областей $\Pi_{2,0}^{\pm}$, $\Pi_{3,1}^{\pm}$ и $\Pi_{4,2}^{\pm}$ аналогично рассмотренным в третьей главе, за исключением того, что в области $\Pi_{4,2}^{\pm}$ резец совершает возвратно-поступательное движение.

Таблица 3. Размеры деталей и расчетные параметры резания

d , мм	s_* , мм/об	t_* , мм	v , м/мин	n , об/мин	$P_{рез}$, Н	N_p , кВт
∅15	0.3	1.0	182.7	3877.97	819.14	2.445
∅18	0.4	1.0	160.6	2839.23	1016.39	2.667
∅21	0.4	1.5	151.1	2290.03	1524.59	3.764

На рис. 8 приведены диаграммы для размера детали $\varnothing 18$ мм, поясняющие выбор параметров $(f_{тр}, F_{ц})$ мобильного вибрационного привода. Вначале определяются параметры $\alpha = \{(f_{тр}, F_{ц}) : s = s_*\}$, при которых обеспечивается требуемая подача s_* (рис. 8, а), после чего строятся диаграммы скорости $v_{ср}$ и мощности $N_{р.ср}$ резания (рис. 8, б). На рис. 8, б видно, что уменьшение скорости $v_{ср}$ и увеличение мощности $N_{р.ср}$ резания происходит при увеличении коэффициента трения $f_{тр}$, при этом уменьшается вынуждающая сила $F_{ц}$ (рис. 8, а) и, следовательно, мощность электродвигателя, вращающего дебалансный вибровозбудитель. Поэтому параметры мобильного вибрационного привода выбраны из области $\Pi_{3,1}^{\pm}$,

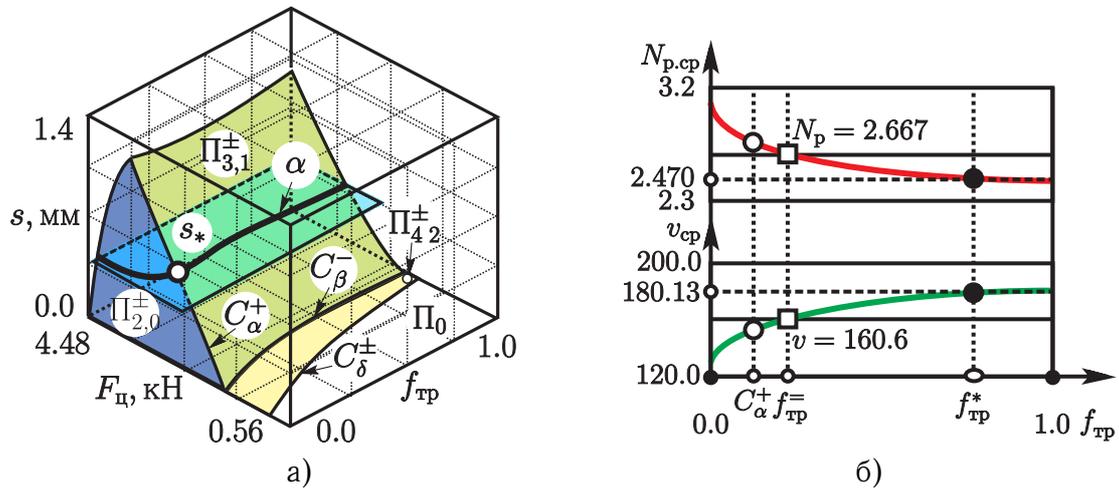


Рис. 8. Схема выбора параметров ($f_{тр}$, $F_{ц}$) мобильного вибрационного привода: а — диаграмма подачи s , б — диаграмма средних скорости $v_{ср}$ и мощности $N_{р.ср}$ резания

где движение резца за один оборот заготовки происходит с одной остановкой на периоде вынуждающей силы.

В табл. 4 приведены параметры ($f_{тр}$, $F_{ц}$) мобильного вибрационного привода для обработки заготовок трех размеров, средние значения подачи $s_{ср}$, скорости $v_{ср}$, силы $P_{рез.ср}$ и мощности $N_{р.ср}$ резания.

Таблица 4. Параметры мобильного вибрационного привода и средние значения параметров вибрационного резания

d , мм	$f_{тр}$	$F_{ц}$, Н	$s_{ср}$, мм/об	$\frac{s_*}{s_{ср}}$	$v_{ср}$, м/мин	$\frac{v_{ср}}{v}$	$P_{рез.ср}$, Н	$\frac{P_{рез}}{P_{рез.ср}}$	$N_{р.ср}$, кВт	$\frac{N_p}{N_{р.ср}}$
Ø15	0.81	3467.25	0.218	1.38	211.15	1.16	643.84	1.16	2.221	1.10
Ø18	0.81	3577.18	0.310	1.29	180.13	1.12	839.04	1.21	2.470	1.08
Ø21	0.86	4242.73	0.345	1.16	161.45	1.07	1364.85	1.12	3.601	1.05
<i>Средние арифметические значения</i>				1.28		1.12		1.16		1.08

В результате токарной обработки заготовок на основе мобильного вибрационного привода подача резца s_* , сила $P_{рез}$ и мощность N_p резания приблизительно уменьшились на 27 – 28%, 15 – 16% и 7 – 8% соответственно, скорость резания $v_{ср}$ увеличилась приблизительно на 11 – 12% (табл. 4).

В заключении сформулированы основные выводы и результаты работы.

В приложении приведены акты о внедрении.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе в рамках решения поставленной научно-технической задачи разработки метода управления движением резца, особенностью которого является применение мобильного вибрационного привода с сухим трением, обеспечивающего задание требуемого режима резания и исключение бифуркационных переходов, получены следующие основные результаты:

1. Разработана математическая модель мобильного вибрационного привода в

виде системы дифференциальных уравнений с разрывной правой частью, основанная на описании характеристики сухого трения в базисе разрывных функций, обеспечивающая общий подход к расчету динамических режимов и бифуркационных переходов для разных способов регулирования силы сухого трения.

2. Получены аналитические соотношения и разработаны алгоритмы определения бифуркационных границ, базирующиеся на гибридном алгоритме поиска периодических режимов, основанном на сканировании фазовой плоскости, особенностью которых является учет нарушения условий существования типа периодических движений, позволяющие определять области параметров мобильного вибрационного привода, обеспечивающих заданный режим резания.

3. Выполнен теоретический анализ, позволивший установить и сформулировать следующие закономерности движения резца:

- мобильный вибрационный привод может обеспечить пошаговое движение резца без откатов и с одной остановкой на периоде вынуждающей силы, с откатом и одной или двумя остановками на периоде вынуждающей силы, с откатом и без остановок;

- в областях параметров, где движение резца происходит с остановками, регулируя силу трения, можно управлять длительностью участков скользящего движения и, следовательно, подачей резца s ;

- исключение переходного процесса достигается путем выбора режима, при котором периодическая траектория стартует с участка скользящего движения Γ_0 .

- асимметричная характеристика сухого трения обеспечивает прямолинейное перемещение резца только в одну сторону, в то время как регулирование силы сухого трения величиной фазового сдвига Ω_0 позволяет управлять направлением перемещения резца.

4. Разработан метод управления процессом токарной обработки материалов, состоящий в получении условий реализации скользящих режимов, определении областей требуемых режимов движения резца, обеспечивающий повышение скорости токарной обработки.

5. Разработан алгоритм управления процессом токарной обработки материалов, позволяющий определять параметры мобильного вибрационного привода, обеспечивающие заданный режим резания.

6. Разработана структура мобильного вибрационного устройства с сухим трением на базе дебалансного вибровозбудителя, управляемого электроприводом постоянного тока с комбинированной релейной системой автоматического регулирования скоростью вращения двигателя. Оригинальность технического решения построения релейной системы автоматического регулирования защищена патентом РФ на изобретение [12].

7. Разработан программный комплекс с открытой архитектурой, состоящей из библиотек математических моделей и программ бифуркационного анализа, позволяющий выполнять моделирование, бифуркационный анализ и расчет динамических режимов систем с сухим трением [13, 14].

8. Проведено экспериментальное исследование характеристик предложенного

мобильного вибрационного устройства, результаты которого показали, что приблизительно скорость резания увеличилась на 11 – 12% и мощность резания уменьшилась на 7 – 8%.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях по перечню ВАК Минобрнауки РФ

1. Жусубалиев, Ж. Т. Бифуркационный анализ мобильной вибрационной системы / Ж. Т. Жусубалиев, **С. Ю. Чевычелов**, С. Ф. Яцун // *Системы управления и информационные технологии*. — 2009. — № 3 (37). — С. 16–20.
2. Динамические режимы движения клапана прецизионного дозатора жидких сред / С. Ф. Яцун, Ж. Т. Жусубалиев, В. С. Титов, **С. Ю. Чевычелов**, О. В. Емельянова // *Известия ВУЗов. Машиностроение*. — 2008. — № 8. — С. 37–48.
3. Жусубалиев, Ж. Т. Бифуркации рождения тора в кусочно-гладких динамических системах / Ж. Т. Жусубалиев, Е. П. Пахомова, **С. Ю. Чевычелов** // *Системы управления и информационные технологии*. — 2005. — № 3 (20). — С. 26–29.
4. Математическая модель электрического обогревателя помещения с релейным регулированием / Ж. Т. Жусубалиев, В. С. Титов, А. А. Медведев, **С. Ю. Чевычелов** // *Известия ТулГУ. Серия Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления*. — 2006. — № 1. — С. 51–58.

Статья

5. Zhusubaliyev, Z. T. Chaotic and quasiperiodic oscillations in piecewise-smooth dynamical systems / Z. T. Zhusubaliyev, **S. Y. Chevychelov**, H. T. Seyed // *The Journal of Damghan University of Basic Sciences*. — 2008. — Vol. 1, no. 2. — Pp. 63–68.

Тезисы доклада и материалы конференций

6. **Чевычелов, С. Ю.** Система управления технологическим процессом токарной обработки материалов на основе мобильного вибрационного привода // Всероссийская научно-техническая конференция «Интеллектуальные и информационные системы» (Интеллект 2009). — Тула: 2009. — С. 202–205.
7. Жусубалиев, Ж. Т. О бифуркациях инвариантных торов в кусочно-гладких динамических системах // Ж. Т. Жусубалиев, **С. Ю. Чевычелов** / Международный конгресс «Нелинейный динамический анализ», посвященный 150-летию со дня рождения академика А.М. Ляпунова. — 2007. — Санкт-Петербург: 2007. — С. 367.
8. Zhusubaliyev, Z. T. Transition from a stable node equilibrium to quasiperiodicity in piecewise-smooth systems / Z. T. Zhusubaliyev, **S. Y. Chevychelov**, E. Mosekilde // *3rd IFAC Workshop «Periodic Control Systems» (PSYCO'07)*. — 2007. — 6 pages (CD-ROM).

9. **Chevychelov, S.** Boundary equilibrium bifurcation in the nonsmooth system with sliding modes // S. Chevychelov, O. Yanochkina / 12th International Student Olympiad on Automatic Control (Baltic Olympiad). — Saint-Petersburg: 2008. — Pp. 42–46.
10. **Чевычелов, С. Ю.** Алгоритм построения двухпараметрических карт устойчивых периодических движений динамических систем // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации. 7-ая Международная конференция «Распознавание-2005». — Курск: 2005. — С. 247–249.
11. **Чевычелов, С. Ю.** Каркас для разработки приложений бифуркационного анализа динамических систем // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации. 8-ая Международная конференция «Распознавание-2008». — Ч. 2. — Курск: 2008. — С. 153.

Патент

12. **Жусубалиев, Ж. Т.** Устройство релейного регулирования тока. Патент РФ на изобретение №2364527 / Ж. Т. Жусубалиев, **С. Ю. Чевычелов**. — М.: РосПатент, заявл. 14 июля 2008 г., опубл. 20 августа 2009 г, бюл. №23.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

13. **Жусубалиев, Ж. Т.** Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2007611309. Программа расчета периодических движений нелинейных динамических систем / Ж. Т. Жусубалиев, **С. Ю. Чевычелов**, Е. А. Сухотерин. — М.: РосПатент, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 27 марта 2007 г.
14. **Жусубалиев, Ж. Т.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2008610950. Программный комплекс с открытой архитектурой для бифуркационного анализа динамических систем / Ж. Т. Жусубалиев, Е. А. Сухотерин, **С. Ю. Чевычелов**. — М.: РосПатент, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22 февраля 2008 г.

Подписано в печать 17.11.09. Формат 60 × 84 ¹/₁₆.

Печатных листов 1,1. Тираж 100 экз. Заказ 71.

Курский государственный технический университет.

Издательско-полиграфический центр Курского государственного
технического университета. 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.