

На правах рукописи



Гвинджилия Валерия Енвериевна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ
НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТКИ ТЕОРИИ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО
АНАЛИЗА И УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность 2.5.5 – «Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Ростов-на-Дону – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донской государственный технический университет».

Научный консультант: **Заковоротный Вилор Лаврентьевич**
доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»

Официальные оппоненты: **Кабалдин Юрий Георгиевич**
доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Воронов Сергей Александрович
доктор технических наук, профессор, профессор ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»

Анцев Александр Витальевич
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН»

Защита диссертации состоится «18» декабря 2026 г. в 10-00 на заседании ученого совета 24.2.297.01 (Д 212.058.02) при ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» по адресу: 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, ДГТУ, ауд. 450.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ДГТУ и на сайте ФГБОУ ВО ДГТУ <https://donstu.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, к.т.н., доцент

В.П. Лапшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На современном этапе станкостроения применение цифровых технологий является ключевым инструментом в повышении эффективности обработки на станках с ЧПУ. Так, за последние 20 лет произошло значительное наращивание вычислительной мощности систем ЧПУ до уровня промышленной ЭВМ (ЭВМ ЧПУ). Их потенциал открывает новые возможности для цифровой обработки данных и синергетического управления изменяемых свойств подсистем станка и заготовки. Эти изменения могут быть априорно заданными или зависеть от внутренней эволюции системы, определяемой траекториями работы и мощности необратимых преобразований энергии взаимодействующих подсистем. Синергетическое взаимное согласование базируется на новых знаниях об управляемой динамической системе резания (ДСР). Она включает подсистему ЧПУ, управляемые траектории исполнительных элементов станка (ТИЭС), деформационные смещения, законы отображения и прогнозирования преобразования координат состояния системы в выходные свойства. Выходные свойства оцениваются показателями состояния процесса резания, например, инструмента и точностью макро- и микрорельефа детали. Для создания подобного комплексного решения необходимо на основе раскрытой структуры ДСР от подсистем управления до выходных свойств проектировать желаемые траектории вершины инструмента, согласованные с ТИЭС и программой ЧПУ, и обеспечивать устойчивость этих траекторий. Изложенные положения являются фундаментом разработанной теории и принципов синергетического анализа и синтеза управления ДСР.

Разработаны новые теоретические представления об устойчивости ТИЭС и траекторий формообразующих движений (ТФД) и формировании притягивающих множеств деформаций в окрестности равновесия. Представленный материал характеризует новую систему знаний в области механообработки, является актуальным для развития станкостроения и удовлетворяет требованиям ВАК РФ к темам докторских диссертаций.

Работа выполнена при поддержке: гранта РНФ 24-29-00287 «Разработка математических моделей цифровых двойников процессов резания металлов для металлорежущих станков с возможностью последующей параметрической идентификации на реальных объек-

тах», грантов РФФИ №19-08-00022 «Разработка теории анализа и синтеза управляемой самоорганизации в динамической системе резания в ходе обработки на примере изготовления деталей на токарных станках», № 20-38-90074 «Разработка методов анализа и синтеза динамической системы резания по критерию минимизации введенных затрат на изготовление».

Степень разработанности темы исследования. Существует три группы фундаментальных исследований, являющиеся базой новых научных знаний, представленных в диссертации. *К первой группе* отнесем исследования ДСР. Они рассматривают частные задачи анализа деформаций подсистем инструмента и заготовки, которые взаимодействуют между собой через нелинейную связь, формируемую резанием. Используются различные модели динамической связи, учитывающие запаздывание вариаций сил по отношению к деформациям, нелинейные зависимости связи сил, деформаций, скоростей. Значительный вклад в эти исследования внесли работы Кудинова В.А., Кучмы Л.К., Каширина А.И., Эльясберга М.Е., Мурашкина Л.С., Соколовского А.П., Городецкого Ю.И., Дроздова Н.А., Жаркова И.Г., Вейца В.Л., Бржозовского Б.М., Васильков Д.В., Воронова С.А., Васина С.А., Гуськова А.М., Astakhov V.P., Altintas Y., Balachandran B., Budak E., Stepan, G., Litak G., Tlustý J., Tobias S.A., Merrit H.E., Rusinek R., Wiercigroch M., Hahn R.S. и др. Однако в этих исследованиях рассматривают автономные ДСР. Они не учитывают взаимосвязь систем ЧПУ, ТИЭС и выходных свойств обработки. Учет этих свойств, не только расширяет знания о качестве и состоянии ДСР, но и открывает новое направление повышения эффективности.

Ко второй группе отнесем синергетический анализ и синтез. Это работы И. Пригожина, Г.Хакена, Веселова Г.Е., Заковоротного В.Л., Колесникова А.А., Кабалдина Красовского А.А., Рыжкина А.А., Флека М.Б. и др. Однако непосредственное ее приложение к станочным системам неприменимо, по крайней мере, в силу ограниченности полосы пропускания сервоприводов. Адаптация синергетической теории управления к станкам, выполненная в диссертации, характеризует новый этап знаний об управлении станков с ЭВМ ЧПУ.

К третьей группе отнесем проблему диагностирования и прогнозирования состояния процесса резания и качества изготовления

деталей. Это работы Бордачева Е.В., Бржозовского Б.М., Васина С.А., Верещаки А.С., Заковоротного В.Л., Козочкина М.П., Кабалдина Ю.Г., Подураева В.Н., Чигиринского Ю.Л., Altitias Y., Balakrishnan P., Brecher C., Dornfeld D., Estman L., Gan W.F., Fu J.Z., Rangwala S., Yeung C.-H., Yang J., Weck M., Крайнев Д.В. и др. В отличие от существующих подходов информационные модели в диссертации вытекают непосредственно из системных свойств ДСР и их отображении в выходных характеристиках обработки. Следовательно, положения диссертации характеризуют новые знания об управляемой ДСР.

Цель работы: установление закономерностей преобразования программы управления динамикой процесса резания в выходные характеристики обработки на основе разработки теории и принципов синергетического анализа свойств подсистем станка при условии минимизации приведенных затрат на изготовление партии деталей заданного геометрического качества. Для достижения цели в диссертации ставятся **следующие задачи.**

1. Разработать и обосновать математическую модель ДСР как взаимосвязанного единства преобразований программы ЧПУ в ТИЭС и деформации, а также в выходные свойства обработки с учетом возмущений и эволюции.
2. Изучить связь устойчивости траекторий и притягивающих множеств деформаций с управляющими параметрами ДСР. Разработать методику анализа и синтеза траекторий подсистем в целом с учетом их взаимного влияния и самоорганизации.
3. Исследовать свойства возмущенной ДСР. В качестве источников возмущений рассмотреть биения шпинделя, кинематические и силовые возмущения, а также вводимые в зону резания колебания, в том числе ультразвукового диапазона.
4. Разработать математическую модель эволюции ДСР на основе функционально связанной системы интегро-дифференциальных уравнений, учитывающих зависимость эволюции от траектории мощность – работа необратимых преобразований энергии. Предложить методику анализа и параметризации уравнений, в том числе на примере эволюции износа инструмента.
5. Предложить методы и информационные модели оценивания параметров геометрического качества деталей и состояния резания, в

частности износа инструмента и параметров макро и микрорельефов.

6. Разработать теорию и принципы синергетического управления процессом резания на основе определения желаемой терминальной совокупности траекторий и обеспечения ее свойством притяжения.

7. Выполнить опытно-промышленную апробацию основных прикладных результатов.

Научная новизна. 1. Предложена и обоснована математическая модель, методы анализа и программные комплексы для цифрового моделирования эволюционной ДСР, позволившие не только выявить не изученные ранее свойства, но и определить новые перспективные методы управления и динамического мониторинга системы резания.

2. Показана принципиальная роль циркуляционных и гироскопических сил, формируемых в результате влияния процесса резания, изменяющих устойчивость траекторий, а также свойства ДСР. Уточнено математическое описание ДСР за счет дополнительной связи, формируемой в контакте задней грани инструмента и заготовки.

3. Предложена методика анализа взаимосвязи ТИЭС и деформаций инструмента относительно заготовки. Раскрыты механизмы взаимного влияния ТИЭС и деформаций на основе декомпозиции ДСР на две подсистемы «быстрых» и «медленных» движений.

4. Предложена методика анализа на цифровых моделях влияния вибрационных возмущений на деформации в трех частотных диапазонах: ниже собственных частот подсистем инструмента и заготовки, в среднечастотной области и за пределами их полосы пропускания. Все эти явления непосредственно влияют на формируемую резанием геометрическую топологию поверхности и интенсивность изнашивания.

5. Разработана математическая модель эволюции ДСР за счет мощности необратимых преобразований энергии по совершенной работе в виде системы функционально связанных нелинейных интегродифференциальных уравнений. Предложена методика их анализа и параметризации. Показано, что вдоль эволюционной траектории наблюдаются бифуркации притягивающих множеств деформаций и сил, что вызывает изменение качества формируемой резанием поверхности и интенсивности изнашивания инструмента.

6. Предложена методика построение информационных моделей процесса резания на основе доступных измерению координат для диагностирования износа инструмента и характеристик качества обработки. Предложены алгоритмы формирования информационных признаков, кластеризации и оценок макро и микрорельефов, принятых в инженерной практике, по различным статистическим функционалам.

7. Предложены методика и математический инструментарий для построения программы ЧПУ на основе системно синергетической парадигмы. В основу синергетического метода положено задание множества желаемых терминальных ТФД, соответствующих им ТИЭС и программ ЧПУ. Из этого множества выбираются асимптотически устойчивые траектории, удовлетворяющие критерию минимизации приведенных затрат на изготовление партии деталей.

Научная значимость. 1. Разработанный математический инструментарий и полученная цифровая модель позволяют проводить исследование свойств процесса резания с учетом взаимовлияния подсистем. Это позволяет оценивать эффекты самоорганизации ТИЭС, деформационных смещений, геометрической топологии поверхности и интенсивности изнашивания инструмента. Созданный математический инструментарий позволяет определять технологические параметры, согласованными с изменяющимися свойствами ДСР.

2. Использование созданного математического инструментария для изучения ДСР, возмущенной вибрациями позволило выявить не рассматриваемые ранее свойства резания. Показано, что в низкочастотном диапазоне вдоль периодической траектории возможно не только формирование высокочастотных колебаний, но и их периодические бифуркации. Они вызывают периодические изменения свойств резания и геометрических топологий формируемой поверхности. В среднечастотном диапазоне наблюдаются параметрические явления, в том числе параметрическое самовозбуждение, наблюдается неизохронность колебаний, синхронизация предельных циклов и другие явления, влияющие на выходные свойства процесса резания. В высокочастотной области наблюдаются эффекты вибрационного управления свойствами системы в низкочастотной области и др.

3. Математическое моделирование эволюции показывает, что вдоль траектории работы наблюдаются не только бифуркации притягива-

ющих множеств, но и сама эволюционная траектория может обладать большой чувствительностью к малым вариациям начальных параметров и возмущений. Поэтому при анализе изнашивания необходимо рассматривать не оптимальную скорость резания, а оптимальную траекторию скорости по произведенной работе. При анализе интенсивности изнашивания необходимо рассматривать ее чувствительность к малым вариациям начальных параметров и возмущений, что позволяет объяснить многие противоречивые результаты экспериментального изучения изнашиваемости.

4. Разработанный математический инструментарий для вычисления скелетной геометрической топологии поверхности детали позволяет диагностировать и прогнозировать изменения макро и микрогеометрии поверхности и оценивать их с помощью принятых в инженерной практике метрик, а также определить рациональную совокупность информационных признаков при динамическом мониторинге интенсивности изнашивания инструмента.

5. Предложенные новые принципы синергетического управления, ориентированные на использование цифровых двойников ДСР, открывают новое направление, как синтеза программ ЧПУ, учитывающих априорно заданные изменения свойств вдоль траектории, так и создание нового класса адаптивных систем программного управления.

Практическая значимость. 1. Методика построения информационных моделей ДСР позволяет создавать системы динамического мониторинга свойств процесса резания, как сопроцессоров систем ЧПУ, так и для локальных систем управления.

2. Предложенный математический инструментарий позволяет выбирать технологические режимы и программы ЧПУ, согласованными со свойствами системы резания. Эти свойства изменяются в ходе эволюции и (или) при изготовлении деталей сложной геометрии.

3. Сформулированы и аналитически доказаны условия оптимальности переналадок инструментальной системы, при которых стоимостная эффективность обработки является минимальной.

4. Предложено несколько вариантов синтеза управления станком с ЧПУ в зависимости от объема априорно заданной информации о ДСР и доступной для измерения информации о динамике процесса резания. Все методики, программы и алгоритмы апробированы в

условиях филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, ПАО «Роствертол», г. Ростова-на-Дону.

Методы исследования. Основные исследования выполнены на основе математического моделирования ДСР на базе теории процесса резания, принципах системно-синергетического анализа, асимптотических методов нелинейной динамики, методов идентификации и функционального анализа. Экспериментальные исследования выполнены на модернизированном станке 16K20 с регулируемым приводом вращения шпинделя и подачи суппорта и интеграцией измерительного стенда вибрационного контроля с акселерометрами A603C01, аналогово-цифровым преобразователем LCard E20-10 с частотой дискретизации входящего сигнала до 10 МГц, ICP преобразователем ВТК-2-010 для усиления и пропорционального преобразования сигналов виброускорений в напряжение. Использовался блок измерения динамических нагрузок инструмента от фирмы National Instruments: NI-9234, NI-9237, NI-9219, с частотой дискретизации до 25 кГц. Запись сигналов производилась с помощью программного обеспечения L-Graph II, анализ и обработка экспериментальных данных осуществлялась с применением программного обеспечения Matlab, методов корреляционно-спектрального анализа, МНК, кластеризации и пр. Для измерения рельефа и морфологии поверхности использовались контурограф-профилограф T4HD фирмы IMTS/Trieblworx, для оценки морфологии поверхности применялся трехмерный микроскоп ContourGT-K фирмы BRUKER.

Степень достоверности. Адекватность результатов подтверждается сравнением вычисленных данных с результатами натурных экспериментов. Эксперименты выполнены с применением аттестованных методик сбора данных и современного поверенного оборудования. Совпадение теоретических исследований и цифрового моделирования с практическими испытаниями в среднем составляет 83%.

Реализация и апробация работы. Положения диссертации нашли применение при выполнении НИР в отраслях авиационной промышленности ПАО «Роствертол», г. Ростова-на-Дону, в филиале АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», г. Волгодонск, с годовым экономическим эффектом в сумме 1,2 млн. рублей.

Положения диссертации получили одобрение на следующих конференциях: «Системный синтез и прикладная синергетика», 2019 г., Архыз; XVI Международная конференция «Динамика технических систем», 2020

г., Ростов-на-Дону; XV Международная конференция «Научно-технические технологии в машиностроении», 2023 г., Москва; Международная конференция «Перспективные машиностроительные технологии (Advanced Engineering Technologies) АЕТ», 2024 г., Санкт-Петербург, Всероссийская научно-техническая конференция «Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов», 2024 г., Ростов-на-Дону; Всероссийская конференция «Актуальные проблемы науки и техники», 2024 г., Ростов-на-Дону.

Публикации. Материалы диссертации изложены в монографии «Основы системно-синергетического анализа и синтеза управления процессом обработки на металлорежущих станках» и 46 статьях, в том числе 18 статей проиндексированы в базе Web of Science, 23 - в базе Scopus, и 44 – опубликованы в журналах из перечня ВАК РФ и «Белого списка».

Структура диссертационной работы. Диссертация состоит из 6 глав, введения, заключения, списка литературы из 306 наименований и 5 приложений. Общий объем работы составляет 434 страницы, 190 иллюстраций и 21 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена изложению концепции диссертации в существующей в настоящее время системе знаний о ДСР, методах управления и мониторинга процессов обработки на станках. Обосновывается необходимость анализа и синтеза управляемого процесса резания на основе системно-синергетического подхода к анализу и синтезу ДСР, как виртуальной цифровой модели (ВЦМ). ДСР представляется эмерджентной и требует целостного рассмотрения всех взаимодействий подсистем, раскрывающих связь программы ЧПУ, ТИЭС, деформационные смещения инструмента и заготовки по отношению к несущей системе. Для этого описывается модель, включающая преобразование траекторий управления перемещением $\mathbf{U}^{(L)} = \{U_1^{(L)}, U_2^{(L)}, U_3^{(L)}\}^T \in \mathcal{R}_U^{(3)}$ и скоростями $\mathbf{U} = d\mathbf{U}^{(L)}/dt = \{U_1, U_2, U_3\}^T \in \mathcal{R}_U^{(3)}$ в ТИЭС $\mathbf{L} = \{L_1, L_2, L_3\}^T \in \mathcal{R}_L^{(3)}$ и $\mathbf{V} = \{V_1, V_2, V_3\}^T \in \mathcal{R}_L^{(3)}$. А также преобразование траекторий пространств $\mathcal{R}_L^{(3)}$ в траектории деформаций инструмента $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, X_3\}^T \in \mathcal{R}_X^{(3)}$ и заготовки $\mathbf{Y} = \{Y_1, Y_2, Y_3\}^T \in \mathcal{R}_X^{(3)}$. Если заданы траектории $\mathbf{L}$, $\mathbf{X}$, $\mathbf{Y}$, то определены ТФД относительно заготовки

$$\begin{aligned}\mathbf{L}^{(\Phi)} &= [\mathbf{L} - \mathbf{X} - \mathbf{Y}] \in \mathfrak{R}_L^{(3)}; \\ \mathbf{V}^{(\Phi)} &= [\mathbf{V} - \mathbf{V}^{(X)} - \mathbf{V}^{(Y)}] \in \mathfrak{R}_L^{(3)},\end{aligned}\quad (1)$$

где $\mathbf{V}^{(X)} = d\mathbf{X}/dt = \{v_{X,1}, v_{X,2}, v_{X,3}\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$; $\mathbf{V}^{(Y)} = d\mathbf{Y}/dt = \{v_{Y,1}, v_{Y,2}, v_{Y,3}\}^T \in \mathfrak{R}_Y^{(3)}$. В этом же пространстве рассматриваются силы $\mathbf{F}_\Sigma = \mathbf{F} + \Phi^{(1)} + \Phi^{(2)}$, образующиеся в контакте передней поверхности инструмента с зоной резания $\mathbf{F} = \{F_1, F_2, F_3\}^T$, в области контакта задней грани инструмента и заготовки $\Phi^{(1)} = \{\Phi_1^{(1)}, \Phi_2^{(1)}, \Phi_3^{(1)}\}^T$ и дополнительной вспомогательной грани $\Phi^{(2)} = \{\Phi_1^{(2)}, \Phi_2^{(2)}, \Phi_3^{(2)}\}^T$. Принимается гипотеза о зависимости $Mod\{\mathbf{F}_\Sigma\} = F^{(0)}(t)$ от давления стружки на переднюю грань инструмента ρ и площади срезаемого слоя S : $F^{(0)} = \rho S$, а она определяется произведением глубины резания $t_p(t)$ и подачи $S_p(t)$

$$\left\{ \begin{aligned} S_p(t) &= \int_{t-T(t)}^t [V_2(\xi) - v_{X,2}(\xi) - v_{Y,2}(\xi)] d\xi; \\ V_p(t) &= \pi D \Omega_3(t) - v_{X,3}(t) - v_{Y,3}(t); \\ t_p(t) &= D(L_2) / 2 - \int_0^t [V_1(\xi) - v_{X,1}(\xi) - v_{Y,1}(\xi)] d\xi, \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где $T(t)$ время оборота заготовки, $D(L_2)$ – диаметр заготовки, $V_3 = \pi D \Omega_3(t)$ – скорость резания, заданная ЭВМ ЧПУ. Мы ограничились случаем преобразование программы ЧПУ в скорости исполнительных элементов с помощью двигателей постоянного тока

$$\mathbf{T}_{\Sigma M} \mathbf{T}_3 \frac{d^2 \mathbf{\Omega}}{dt^2} + \mathbf{T}_{\Sigma M} \frac{d \mathbf{\Omega}}{dt} + \mathbf{\Omega} + \mathbf{k}^{(M)} [\mathbf{F}_\Sigma + \mathbf{T}_3 \frac{d \mathbf{F}_{\Sigma 0}}{dt}] = \mathbf{\Omega}_0 \quad (3)$$

где $\mathbf{\Omega} = \{\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3\}^T$ – вектор частот вращения роторов серводвигателей; $\mathbf{\Omega}_0 = \{\Omega_{10}, \Omega_{20}, \Omega_{30}\}^T$, $\Omega_{i0} = U_i / C e_i$, $i = 1, 2, 3$ – приведенные к частоте напряжения якорей двигателей; $\mathbf{T}_{\Sigma M} \mathbf{T}_3 = [\mathbf{T}_{\Sigma M}^{(i)} \mathbf{T}_3^{(i)}]$, $\mathbf{T}_{\Sigma M} = [\mathbf{T}_{\Sigma M}^{(i)}]$ – диагональные матрицы комбинаций постоянных времени серводвигателей; $[\mathbf{F}_\Sigma + \mathbf{T}_3 \frac{d \mathbf{F}_{\Sigma 0}}{dt}] = \{[\mathbf{F}_\Sigma + \mathbf{T}_3^{(1)} d(F_\Sigma^{(1)})/dt], [\mathbf{F}_\Sigma + \mathbf{T}_3^{(2)} d(F_\Sigma^{(2)})/dt], [\mathbf{F}_\Sigma + \mathbf{T}_3^{(3)} d(F_\Sigma^{(3)})/dt]\}$ – вектор

приведенных к роторам двигателей сил резания; $\mathbf{k}^{(M)}$ – диагональная матрица коэффициентов преобразования $\mathbf{F}_\Sigma \rightarrow \mathbf{\Omega}$;

$F_\Sigma = \sqrt{(F_\Sigma^{(1)})^2 + (F_\Sigma^{(2)})^2 + (F_\Sigma^{(3)})^2}$; $T_{\Sigma M}^{(i)} = J_i R_i / c_e^{(i)} c_M^{(i)}$; $T_3^{(i)} = L_i / R_i$; $c_M^{(i)}, R_i, L_i$ – параметры двигателей; J_i – моменты инерции приводов, приведённые к роторам двигателей, $i = 1, 2, 3$.

Проекции $\mathbf{F}_\Sigma$ определяются угловыми коэффициентами $\chi = \{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}^T$. Учитывается запаздывание $F^{(0)}$ по отношению к изменению S . Тогда связь сил резания с деформациями инструмента и заготовки в точке контакта с ней вершины инструмента, а также преобразование $\mathfrak{R}_U^{(3)} \Rightarrow \mathfrak{R}_L^{(3)}$, определяют обобщенную модель ДСР

$$\begin{cases} T_{\Sigma M} T_{\Sigma} \frac{d^2 \Omega}{dt^2} + T_{\Sigma M} \frac{d\Omega}{dt} + \Omega + \mathbf{k}^{(M)} [\mathbf{F}_\Sigma + T_{\Sigma} \frac{d\mathbf{F}_{\Sigma,0}}{dt}] = \Omega_0 \\ \mathbf{m}^{(X)} \frac{d^2 \mathbf{X}}{dt^2} + \mathbf{h}^{(X)}(\mathbf{L}) \frac{d\mathbf{X}}{dt} + \mathbf{c}^{(X)}(\mathbf{L}) \mathbf{X} = \mathbf{F}_\Sigma(\mathbf{L}, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) + \mathbf{f}(\mathbf{t}); \\ \mathbf{m}^{(Y)} \frac{d^2 \mathbf{Y}}{dt^2} + \mathbf{h}^{(Y)}(\mathbf{L}) \frac{d\mathbf{Y}}{dt} + \mathbf{c}^{(Y)}(\mathbf{L}) \mathbf{Y} = \mathbf{F}_\Sigma(\mathbf{L}, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) + \mathbf{f}(\mathbf{t}), \\ T^{(0)} dF^{(0)} / dt + F^{(0)} = \rho [t_p(t) - X_1 - Y_1] S_p(t), \end{cases} \quad (4)$$

где $\mathbf{m}^{(X)}$, $\mathbf{m}^{(Y)}$ - диагональные матрицы инерционных коэффициентов соответственно подсистем инструмента и заготовки; $\mathbf{h}^{(X)}(\mathbf{L})$, $\mathbf{h}^{(Y)}(\mathbf{L})$, $\mathbf{c}^{(X)}(\mathbf{L})$, $\mathbf{c}^{(Y)}(\mathbf{L})$ - положительно определенные симметричные (потенциальные) матрицы скоростных и упругих коэффициентов; $\mathbf{F}_\Sigma(\mathbf{L}, \mathbf{X}, \mathbf{Y})$ - силы, действующие на инструмент; $\mathbf{f}(\mathbf{t})$ - вектор неуправляемых возмущений, действующих со стороны станка, приведенных к силам. Коэффициент

$\rho = \rho_0 \{1 + \mu \exp[-\nu(\pi \Omega D - v_{X,3} - v_{Y,3} - \pi \Lambda \Omega D)]\} [1 - k^{(\gamma)} \gamma_\Sigma]$, зависит от переднего угла инструмента и учитывает известную падающую характеристику сил при увеличении скорости резания V_3 , $V_3 \in (0, 3) \text{ м/с}$; $\gamma \in (-2, +10)^\circ$.

Вторая глава посвящена исследованию преобразования пространств $\mathfrak{R}_U^{(3)} \Rightarrow \mathfrak{R}_L^{(3)}$, а также $\mathfrak{R}_L^{(3)} \Rightarrow \mathfrak{R}_X^{(3)}$. Анализируется устойчивость ТИЭС и деформаций, притягивающие множества в окрестности равновесия и их бифуркации. Вводится ряд ограничений: отсутствуют вариации припуска; параметры динамических связей неизменны; жесткость подсистемы заготовки является большой и ее деформациями можно пренебречь. Таким образом, уравнения уравнение (4) представляется в виде

$$\begin{cases} T_{\Sigma M} T_{\Sigma} \frac{d^2 \Omega}{dt^2} + T_{\Sigma M} \frac{d\Omega}{dt} + \Omega + \mathbf{k}^{(M)} [\mathbf{F} + T_{\Sigma} \frac{d\mathbf{F}}{dt}] = \Omega_0; & "a" \\ \mathbf{m} \frac{d^2 \mathbf{X}}{dt^2} + \mathbf{h} \frac{d\mathbf{X}}{dt} + \mathbf{c} \mathbf{X} = \mathbf{F}(\mathbf{t}); & "b" \\ T^{(0)} \frac{dF^{(0)}}{dt} + F^{(0)}(t) = \rho \{1 + \mu \exp[\zeta(V_3 - \frac{dX_3}{dt})]\} [t_p^{(0)} - X_1(t)] \int_{t-T}^t \{V_2(\xi) - v_2(\xi)\} d\xi, & "c" \end{cases} \quad (5)$$

Для анализа ДСР (5) и интерпретации результатов в работе используются асимптотические свойства решений нелинейных дифференциальных уравнений с малыми параметрами при производных. Тогда в соответствие системе (5) ставятся две подсистемы «медленных» и «быстрых» движений

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{T}_{ЭМ} \tilde{T}_{Э} \frac{d^2 \tilde{\Omega}}{d\tau^2} + \tilde{T}_{ЭМ} \frac{d\tilde{\Omega}}{d\tau} + \tilde{\Omega} + k^{(M)} [F(\tilde{X}, \tilde{\Omega}) + \tilde{T}_{Э} \frac{dF(\tilde{X}, \tilde{\Omega})}{d\tau}] = \Omega_0; \\ c^{(\tau)} \tilde{X} = F(\tilde{X}, \tilde{\Omega}); \\ F^{(0)}(\tau) = \rho [t_p^{(0)} - X_1(\tau)] \int_{\tau-T}^{\tau} \{V_2(\xi) - v_2(\xi)\} d\xi, \end{array} \right. \quad (6)$$

где параметры $\tilde{T}_{ЭМ} \tilde{T}_{Э}$, $\tilde{T}_{ЭМ}$, $\tilde{T}_{Э}$, $\tilde{X}$, $\tilde{\Omega}$ – «медленные» функции безразмерного времени. Свойства подсистемы «быстрых» движений определяются системами

$$\left\{ \begin{array}{l} m \frac{d^2 X}{dt^2} + h \frac{dX}{dt} + cX = F(t); \\ F(t) = F^{(0)} \{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}^T; \\ T^{(0)} \frac{dF^{(0)}}{dt} + F^{(0)}(t) = \\ = \rho \{1 + \mu \exp[-\zeta(V_3 - \frac{dX_3}{dt})]\} [t_p^{(0)} - X_1(t)] \int_{t-T}^t \{V_2(\xi) - v_2(\xi)\} d\xi; \end{array} \right. \quad \text{“a”} \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} cX^* = F; \\ F(t) = F^{(0)} \{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}^T; \\ F^{(0)} = \rho \{1 + \mu \exp[\zeta(V_3)]\} [t_p^{(0)} - X_1^*] S_p^{(0)}, \end{array} \right. \quad \text{“b”}$$

где уравнения «быстрых» движений (7, “a”) учитывает влияние деформаций в вариациях относительно равновесия (7, “b”). Если траектории (6) и (7) устойчивы, то $\tilde{X}, \tilde{\Omega}$ становятся притягивающим множеством (аттрактором) траекторий системы в целом.

Вначале рассматривается устойчивость. Для этого используется линеаризованное уравнение в вариациях относительно X^* и F^*

$$m_{\Sigma} \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + h_{\Sigma} \frac{dx(t)}{dt} + c_{\Sigma} x(t) = 0 \quad (8)$$

где $m_{\Sigma} = m$;

$$\mathbf{h}_\Sigma = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{2,1} & h_{3,1} - \rho\mu\zeta t_p^{(0,*)} S_p^{(0)} \exp[-\zeta(V_3)]\chi_1 \\ h_{1,2} & h_{2,2} & h_{3,2} - \rho\mu\zeta t_p^{(0,*)} S_p^{(0)} \exp[-\zeta(V_3)]\chi_1 \\ h_{1,3} & h_{2,3} & h_{3,3} - \rho\mu\zeta t_p^{(0,*)} S_p^{(0)} \exp[-\zeta(V_3)]\chi_1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{c}_\Sigma = \begin{bmatrix} c_{1,1} + \rho\{1 + \mu \exp(-\zeta V_3)\} S_p^{(0)} \chi_1 & c_{2,1} + \rho\{1 + \mu \exp(-\zeta V_3)\} t_p^{(0,*)} \chi_1 & c_{3,1} \\ c_{1,2} + \rho\{1 + \mu \exp(-\zeta V_3)\} S_p^{(0)} \chi_2 & c_{2,2} + \rho\{1 + \mu \exp(-\zeta V_3)\} t_p^{(0,*)} \chi_2 & c_{3,2} \\ c_{1,3} + \rho\{1 + \mu \exp(-\zeta V_3)\} S_p^{(0)} \chi_3 & c_{2,3} + \rho\{1 + \mu \exp(-\zeta V_3)\} t_p^{(0,*)} \chi_3 & c_{3,3} \end{bmatrix},$$

$\mathbf{x}(\mathbf{t}) = \mathbf{X}(\mathbf{t}) - \mathbf{X}^*$. Далее в главе рассматриваются две проблемы: устойчивость равновесия и формирование притягивающих множеств деформаций и сил.

Матрицы $\mathbf{c}_\Sigma \neq \mathbf{c}$ и $\mathbf{h}_\Sigma \neq \mathbf{h}$ не симметричные, их можно представить в виде суммы симметричных ($\mathbf{h}_\Sigma^{(c)}, \mathbf{c}_\Sigma^{(c)}$) и кососимметричных составляющих ($\mathbf{h}_\Sigma^{(k)}, \mathbf{c}_\Sigma^{(k)}$): $\mathbf{h}_\Sigma = \mathbf{h}_\Sigma^{(k)} + \mathbf{h}_\Sigma^{(c)}$; $\mathbf{c}_\Sigma = \mathbf{c}_\Sigma^{(k)} + \mathbf{c}_\Sigma^{(c)}$, где $\mathbf{h}_\Sigma^{(k)}$, характеризует гироскопические силы, а $\mathbf{c}_\Sigma^{(k)}$ – циркуляционные. Необходимым условием потери устойчивости является отрицательная определенность матриц $\mathbf{h}_\Sigma^{(c)}$ и (или) $\mathbf{c}_\Sigma^{(c)}$. Циркуляционные силы образуют траектории в форме прецессионных колебаний. Показано, что основным механизмом потери устойчивости является увеличение коэффициента $K_\Sigma = \rho t_p^{(0,*)} S_p^{(0)}$. При увеличении $T^{(0)}$ существует минимум предельного значения K_Σ . Эти параметры зависят от технологических режимов. В частности при возрастании скорости резания существует диапазон, в котором равновесие склонно к потере устойчивости. При увеличении элементов матриц $\mathbf{c}_\Sigma$, $\mathbf{h}_\Sigma$ в (8) наблюдается общая тенденция к увеличению запаса устойчивости. Таким образом, устойчивость зависит, как от технологических режимов, так и от конструктивных параметров инструмента (его геометрии) и параметров взаимодействующих подсистем. Поэтому имеет место проблема согласования технологических режимов со свойствами ДСР, которые могут меняться.

Геометрия инструмента влияет на угловые коэффициенты ориентации сил, которые входят во все уравнения динамики, в том числе определяют деформационные смещения инструмента. Влияние главного угла в плане и угла наклона главной режущей кромки на уровень самовозбуждения в системе также рассмотрено в диссертации (рис. 1).

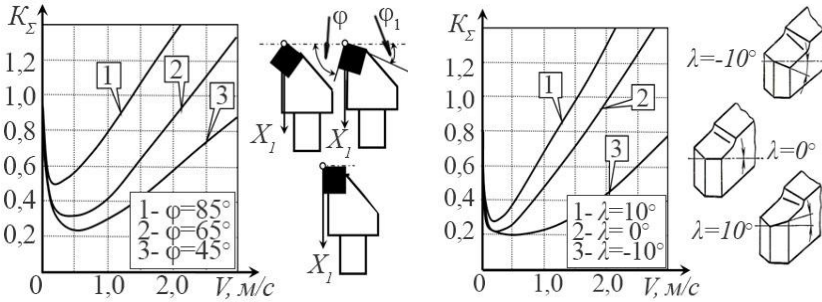


Рис. 1. Влияние главного угла в плане и угла наклона главной режущей кромки на уровень самовозбуждения в системе

Еще один механизм потери устойчивости обусловлен регенеративным эффектом. Для его описания используется интегральный оператор формирования подачи (2). В отличие от существующих исследований время T в (2) зависит не только от частоты вращения заготовки, но и от упругих деформаций и возмущений

$$T(t) = \int_{L_3 - \pi D}^{L_3} \frac{dL_3}{V_3(L_3)} \quad (9)$$

где L_3 - траектория перемещения заготовки в направлении скорости резания. Если в (2) $V_2 = \text{const}$, $V_3 = \text{const}$ и $dX_i/dt = 0, i=1,2,3$, то $S_p(t) = V_2 T$ - обычно используемое выражение для вычисления подачи, однако в динамике оно не справедливо. Сам оператор подачи характеризует сложное нелинейное звено преобразования скоростей деформаций и ТИЭС в величину подачи. Текущая же подача и величина припуска, формирующая силы, как элементы динамической системы, принципиально влияют не только на устойчивость, но и на формируемые притягивающие множества деформаций. Например, соотношения S_p (2) и (9) приводят к регенеративному эффекту. Тогда АФЧХ системы в разомкнутом состоянии будет

$$W_\Sigma(j\omega) = \frac{\rho}{1 + T^{(0)}j\omega} \{ [1 + \mu \exp(-\zeta V_3)] S_p^{(0)} W_{F_0, X_1}(j\omega) + [1 + \mu \exp(-\zeta V_3)] \times \\ \times t_p^{(0,*)} W_{F_0, X_2}(j\omega) [1 - \exp(-T\omega j)] - \rho \mu \zeta t_p^{(0,*)} S_p^{(0)} \exp[-\zeta(V_3)] W_{F_0, X_3}(j\omega) j\omega \}, \quad (10)$$

где $[1 - \exp(-T\omega j)]$ - определяет регенеративное самовозбуждение,

$$W_{F_0, X_i}(p) = g_i \cdot \frac{(1 + 2\xi_1^{(i)} T_1^{(i)} p + (T_1^{(i)})^2 p^2)(1 + 2\xi_2^{(i)} T_2^{(i)} p + (T_2^{(i)})^2 p^2)}{(1 + 2\xi_1 T_1 p + (T_1)^2 p^2)(1 + 2\xi_2 T_2 p + (T_2)^2 p^2)(1 + 2\xi_3 T_3 p + (T_3)^2 p^2)}, \quad p = j\omega,$$

$i=1,2,3$ - линеаризованная модель деформаций. g_i - коэффициенты,

имеющие смысл податливости. Структура АФЧХ $W_{F_0, X_i}(p)$ такова, что в ней периодически повторяются резонансы на частотах $\Omega_i = (T_i)^{-1}$, $i=1,2,3$ и антирезонансы на частотах $\Omega^{(s)}_i = (T^{(s)}_i)^{-1}$, $i,s=1,2$. В (10) главное значение имеет составляющая по X_2 . Тогда достаточно проанализировать АФЧХ, приведенные на рис.2, состоящие из

$$W_{0,1}(j\omega) = \frac{\rho}{(1 + T^{(0)}\omega j)} \{g_2 t_P^{(0,*)} W_{F^{(0)}, X_2}(j\omega)\} \text{ и } W_{0,2}(j\omega) \approx W_{0,1}(j\omega)[1 - \exp(-T\omega j)].$$

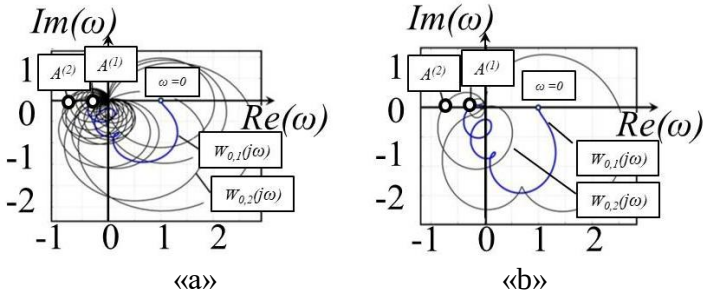


Рис.2. АФЧХ $W_{0,1}(j\omega)$ и $W_{0,2}(j\omega)$ при параметрах $T_1=1$, $T_2=3$, $T_3=5$, $T^{(2)}_1=2$, $T^{(2)}_2=4$, $\zeta_i = \zeta^{(2)}_i = 0.08$, $i=1,2,3$: а) $T=100$; б) $T=1$

Иллюстрации «а», «б» относятся к случаю $\Omega \ll \Omega_i$. Можно выделить частоты $\omega_i = 2\pi(T)^{-1}i$, на которых влияние регенеративного эффекта нивелируется $\{1 - \exp(-j\omega T)\} = 0$. Изменения допустимого K_Σ по мере увеличения частоты вращения шпинделя наблюдаются лишь в случае, когда частоты вращения шпинделя становятся близкими к одной из собственных частот взаимодействующих подсистем. В практике этот случай характеризует скорее исключение, чем правило. Если равновесие системы неустойчиво и в его окрестности формируются притягивающие множества деформаций, то для их анализа, во-первых, необходимо использовать не линеаризованные уравнения динамики. Во-вторых, при потере устойчивости проявляются дополнительные силы, формируемые в области контакта задних граней инструмента и заготовки, ограничивающие развитие периодических деформаций $\Phi^{(1)} + \Phi^{(2)} = \{\Phi_{X1}, \Phi_{X2}, \Phi_{X3}\}^T \in \mathcal{R}^{(3)}$. Они ограничивают периодические движения, влияя на притягивающие множества. Однако не только нелинейная связь, формируемая интегральным оператором подачи, оказывает большое воздействие на свойства системы. Например, при увеличении ρ или t_P вначале си-

стема теряет устойчивость, затем образуются притягивающие множества сложной структуры, периодически повторяющиеся на супернизкой частоте (рис.3).

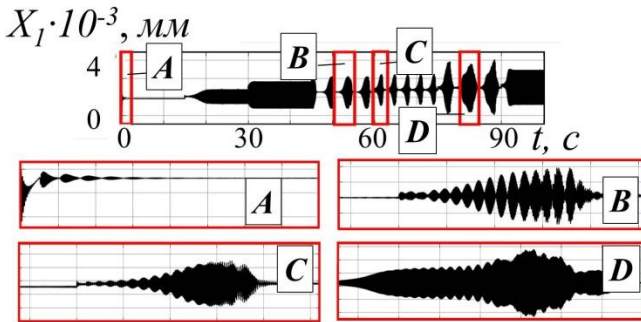


Рис.3. Пример перестройки деформаций при изменении глубины резания каждые 15 с $t_p \in (2;3,2)$ мм: а) временные траектории для $X_1(t)$ и ее фрагменты; б) фрагменты фазовых траекторий для $X_2(t)$

Приведенные данные показывают, что от глубины резания зависит не только устойчивость, но и тип притягивающих множеств. Отмечается влияние на притягивающие множества мультипликативных взаимодействий, формирующих площадь срезаемого слоя. Именно эти эффекты, приводят к образованию регулярных супернизкочастотных деформаций, а также хаотических аттракторов, влияющих на геометрическую топологию поверхности и пр. Наглядную картину притягивающих множеств деформаций дают диаграммы их бифуркаций в плоскости « Ω – ρ » (рис.4). На диаграммах выделено пять областей: 1-область асимптотически устойчивого равновесия; 2-орбитально асимптотически устойчивая траектория типа предельного цикла или двумерного тора; 3-супернизкочастотное притягивающее множество деформаций; 4-хаотическая динамика; 5-неустойчивая траектория. В главе рассмотрен вопрос взаимного влияния «медленных» движений, представленных ТИЭС и квазистатических деформаций элементов приводов, и «быстрых» движений в виде переменных составляющих деформаций инструмента относительно заготовки. Отмечается, что независимо от типа серводвигателей вращения их роторов, следовательно, ТИЭС, определяются не только программой ЧПУ, но и моментом сопротивления, в формировании которого принимает участие процесс резания.

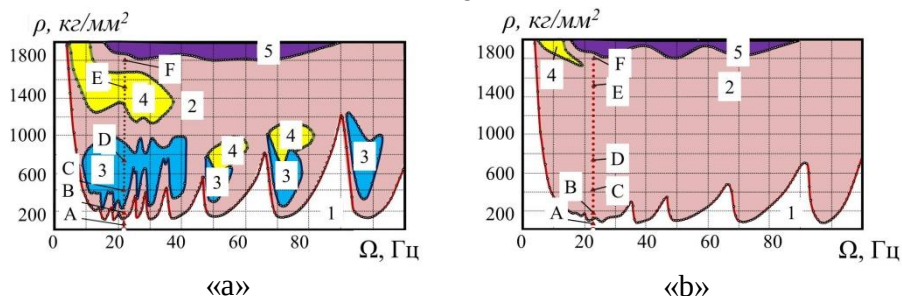


Рис.4. Диаграммы бифуркаций притягивающих множеств деформационных смещений: а) элементы матрицы жесткости $c_{1,1}=2000$ кг/мм, $c_{2,2}=1500$ кг/мм, $c_{3,3}=500$ кг/мм, б) элементы матрицы жесткости $c_{1,1}=2000$ кг/мм, $c_{2,2}=500$ кг/мм, $c_{3,3}=1500$ кг/мм

Во-первых, анализируются свойства систем приводов при их рассмотрении как векторных взаимосвязанных подсистем. Во-вторых, отмечается, что момент, формируемый резанием, для серводвигателя шпинделя формирует нелинейную положительную обратную связь, а для подсистемы приводов подачи резание образует отрицательную обратную связь. В-третьих, на обратные связи оказывают влияние параметры всей механической части приводов, в том числе, матрицы жесткости и параметры формируемой резанием динамической связи. Показано, что в векторном представлении устойчивость траекторий зависит не только от параметров взаимодействующих подсистем, но и от соотношения мощностей серводвигателей и процесса резания. Как правило, в области малых скоростей система теряет устойчивость и в системе образуются автоколебания.

Наконец, показано, что образование в подсистеме «быстрых» движений регулярных притягивающих множеств высокой частоты приводит к изменению ТИЭС, так как все нелинейные функции в уравнениях не обладают свойством центральной симметрии. Таким образом, преобразование управления (программы ЧПУ) в траектории формообразующих движений представляется сложным нелинейным оператором, и ТФД зависят не только от программы ЧПУ, но и от свойств этого оператора.

Третья глава посвящена свойствам ДСР, на которую действуют периодические возмущения. В работе анализируются возмущения, генерируемые станком и процессом резания. Главное внимание уделено возмущениям, вызывающим изменения площади срезаемого

го слоя и сил резания. Основные возмущения моделируются гармоническими функциями, которые определяют кинематические возмущения скорости подачи $\Delta V^{(K)}(t)$, осевые $\Delta V_P^{(B)}(t)$ и радиальные биения

$$\begin{cases} t_p(t) = t_p^{(0)}[1 + \Delta t_p^{(B)}] = t_p^{(0)}[1 + \varepsilon_{t_p}^{(0)} \sin(\Omega_{\Delta t_p}^{(0)} t)]; \\ V_2(t) = V_2^{(0)}[1 + \Delta V_2^{(K)}] = V_2^{(0)}[1 + \varepsilon_{V_2}^{(0)} \Omega_{\Delta V_2}^{(0)} \cos(\Omega_{\Delta V_2}^{(0)} t)]; \\ V_3(t) = V_3^{(0)}[1 + \Delta V_3^{(B)}] = V_3^{(0)}[1 + \varepsilon_{V_3}^{(0)} \Omega_{\Delta V_3}^{(0)} \cos(\Omega_{\Delta V_3}^{(0)} t)], \end{cases} \quad (12)$$

где $\varepsilon_{t_p}^{(0)}$, $\varepsilon_{V_2}^{(0)}$, $\varepsilon_{V_3}^{(0)}$ - амплитуды, отнесенные к априорно заданным и постоянным значениям $t_p^{(0)}$, $V_2^{(0)}$, $V_3^{(0)}$; $\Omega_{\Delta t_p}^{(0)}$, $\Omega_{\Delta V_2}^{(0)}$, $\Omega_{\Delta V_3}^{(0)}$ - их частоты. Анализируются также силовые возмущения, генерируемые процессом резания. Они могут быть связаны с периодическим формированием поверхностей скольжения стружки и пр. Они вызывают изменение сил и давления ρ в (7), отвечающего за сопротивление движению инструмента, которое можно представить в следующем виде

$$F(t) = [\rho^{(0)} - \Delta \rho(t - T^{(I)})] S\{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}^T, \quad (13)$$

где $\Delta \rho(t - T^{(I)}) S\{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}^T = F^{(\Theta)}(t)$ - переменная эмиссионная составляющая сил резания, формирующая циклически напряженное состояния материала, а $\Delta \rho(t - T^{(I)}) = \rho^{(II)}(t)$ переменное давление на поверхности инструмента с периодом фрагментации $T^{(I)}$. При цифровом моделировании $\rho^{(II)}(t)$ рассматривалась как последовательность случайных треугольных импульсов, характеризующаяся периодом $T_i^{(0)}$, высотой $H_i^{(0)}$, длительность импульса $\tau_i = \tau_i^{(1)} + \tau_i^{(2)}$, где длительность нарастания импульса $\tau_i^{(1)}$, а время спада $\tau_i^{(2)}$. Также силовое возмущение может быть связано со специально вводимыми колебаниями, например, УЗК. Они вызывают периодические вариации сил и соответственно вариации давления стружки, тогда параметр $\rho(t) = \rho^{(0)} + \rho^{(II)} \sin(\Omega_{\Delta \rho}^{(0)} t) = \rho^{(0)} (1 + \varepsilon_\rho \sin(\Omega_{\Delta \rho}^{(0)} t))$, где $\rho^{(II)}$ - заданный уровень УЗК.

Каждая группа возмущений обладает своим частотным составом. Рассмотрим влияние возмущений низкой частоты при вариации амплитуды $\Omega^{(HЧ)} \in (0, \Omega^{(0)})$. Возмущения задаются колебательными смещениями в направлениях X_1 и X_3 (рис.5).

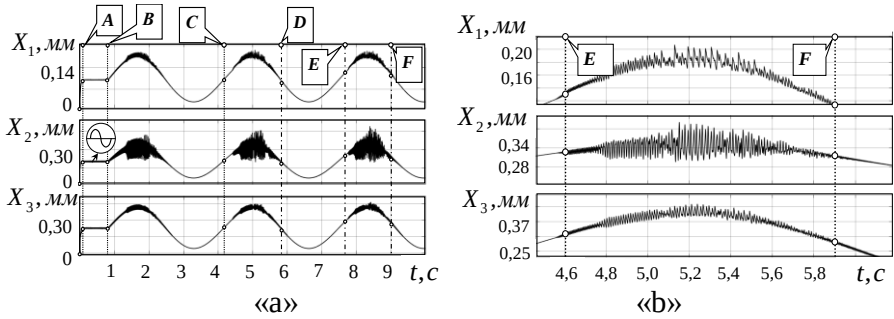


Рис. 5. Динамическая перестройка системы вдоль возмущенной траектории: а) установившиеся колебания; б) участок перестройки

Амплитуда и частота возбуждения для $t_p^{(0)} = 3$ мм соответственно $\varepsilon_{t_p}^{(0)} = 0,2$ и $\Omega_{\Delta t_p}^{(0)} = 0,3$ Гц, $\rho = 500$ кг/мм². Здесь система без возмущения «А-В» близка к потере устойчивости. Участок «В-С» соответствует периоду возмущений. Вдоль траекторий происходит периодическое изменение свойств от участка устойчивого равновесия «D-E» к неустойчивому «E-F». В окрестности траектории формируются различные притягивающие множества. Подобное поведение обусловлено периодическим изменением коэффициента внутреннего возбуждения $K_\Sigma = \rho t_p^{(*)} S_p^{(0)}$ ДСР, рассмотренного в первой главе.

В среднечастотном диапазоне возмущений $\Omega^{(CЧ)} \in (\Omega^{(0)}, \Omega_5)$, лежащих до верхней частоты среза Ω_5 колебательных, вариации амплитуды приводят к параметрическому самовозбуждению. Границы устойчивости заметно изменяются при вариациях частоты возмущений для различных ρ . На рис.6 система обладает устойчивыми траекториями при значениях ρ снизу от фигуративной линии.

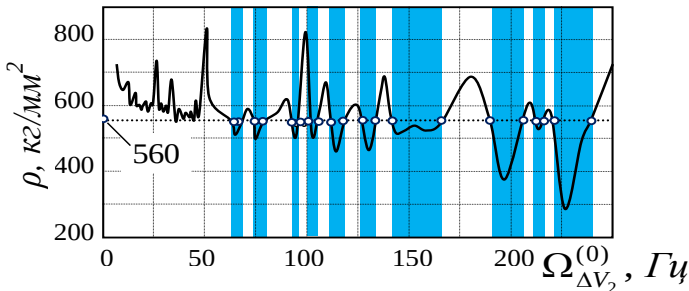


Рис.6. Изменение областей устойчивости при частотной модуляции возмущающих воздействий с амплитудой 0,01 мм

Переходы к затемненным областям показывают смену областей притяжения на неустойчивое движение в целом. Для анализа областей притяжения удобно проанализировать диаграммы бифуркаций возмущенной системы, они также приведены в диссертационной работе. Следует отметить, что по мере увеличения амплитуды возмущений образуется большое разнообразие притягивающих множеств, влияющих на выходные свойства процесса резания. В отдельных частотных диапазонах двумерный тор и хаотический аттрактор образуются практически сразу при введении в систему малых возмущений.

В среднечастотном диапазоне наиболее полно проявляются все известные эффекты нелинейной динамики: параметрическое самовозбуждение, динамическое смещение точки равновесия, формирование супергармонических колебаний и пр. Отмечаются также неизохронные частотные свойства системы.

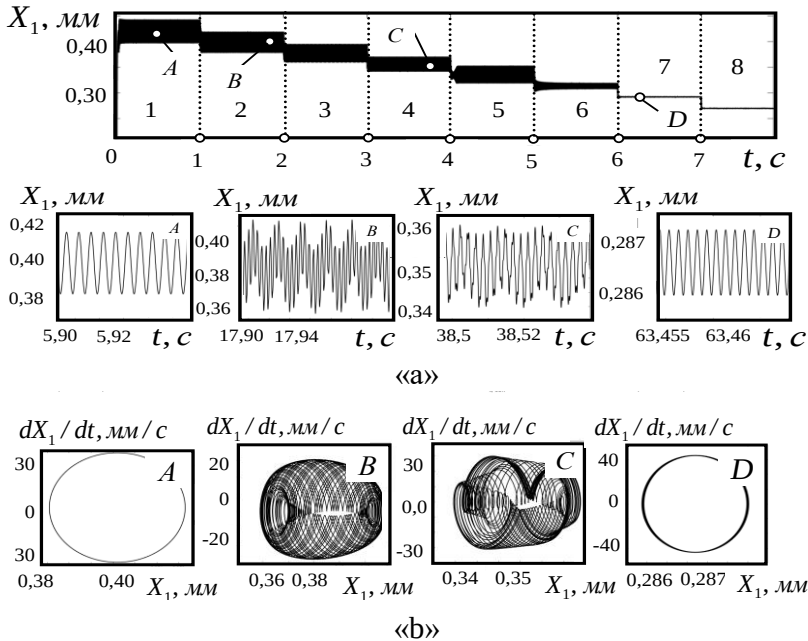


Рис. 7. Изменение деформационных смещений «а» и «б» примеры фазовых траекторий при изменении силовой эмиссии с частотой 1кГц, амплитуда: 1) $\epsilon_p=0$; 2) $\epsilon_p=0,05$; 3) $\epsilon_p=0,1$; 4) $\epsilon_p=0,2$; 5) $\epsilon_p=0,3$; 6) $\epsilon_p=0,4$; 7) $\epsilon_p=0,45$; 8) $\epsilon_p=0,5$

Возмущение высокочастотного диапазона (ВЧ) ($\Omega^{(BЧ)} > \Omega_S$), к которым относятся силовые возмущения, влияют на интенсивность колебаний в низкочастотном и среднечастотном диапазонах, изменяют притягивающие множества деформаций, а также приводят к смещению точки равновесия (рис.7). Если высокочастотные возмущения являются управляемыми, как в случае введения УЗК, то можно говорить о вибрационном управлении свойствами ДСР.

В четвертой главе обосновывается гипотеза о взаимосвязи параметров динамической связи $\mathbf{p}(\mathbf{w}) = \{p_1(\mathbf{w}), p_2(\mathbf{w}), \dots, p_n(\mathbf{w})\}$ с износом w , а также зависимости скорости изнашивания $v(t) = dw/dt$ от фазовой траектории мощности необратимых преобразований энергии в зоне резания по произведенной работе. Тогда для моделирования эволюционных преобразований ДСР предлагается следующая система интегро-дифференциальных уравнений

$$\left\{ \begin{array}{ll} \mathbf{m} \frac{d^2 \mathbf{X}}{dt^2} + \mathbf{h} \frac{d\mathbf{X}}{dt} + \mathbf{c}\mathbf{X} = \mathbf{F}_\Sigma(\mathbf{L}, \mathbf{V}, \mathbf{X}, \mathbf{p}) + \mathbf{f}(t); & "a" \\ \mathbf{p}(\mathbf{w}) = \{p_1(w), p_2(w), \dots, p_n(w)\}; & "b" \\ N(t) = F_{\Sigma,3}(t)V_{\Sigma,3}(t); A(t) = \int_0^t [F_{\Sigma,3}(\xi)V_{\Sigma,3}(\xi)d\xi; & "c" \\ v(t) = \alpha_1 N(t) + \alpha_2 \int_0^{A(t)} W(A - \xi)N(\xi)d\xi; & "d" \end{array} \right. \quad (14)$$

где (14,"a") – модель преобразования сил в деформации, в которой динамическая связь $\mathbf{F}_\Sigma(\mathbf{L}, \mathbf{V}, \mathbf{X}, \mathbf{p})$ зависит от эволюционно изменяющихся параметров $\mathbf{p}(\mathbf{w})$; (14,"b") – модель зависимости эволюционных параметров от износа; (14,"c") – модели мощности $N(t)$, $[кг \cdot мм/с]$ и работы $A(t)$, $[кг \cdot мм]$ для случая $F_{\Sigma,i}(t)V_{\Sigma,i}(t) > 0$; (14,"d") – модель скорости изнашивания. В (14,"d") α_1 , $[кг^{-1}]$ α_2 , $[кг^{-2} \cdot мм^{-1}]$ – коэффициенты приведения параметров интегрального оператора к размерности $[мм/с]$, $W(A - \xi)$ – безразмерное ядро интегрального оператора, учитывающее влияние двух конкурирующих процессов в ходе развития износа – адаптации и деградации свойств. Процесс адаптации отражает приработку инструмента, а деградация связана с процессом накопления внутренней энергии, способствующей интенсификации износа. В диссертации представлены методы параметризации уравнений и ядер интегрального оператора в (14,"d"), в том числе, его представление для численного моделирования.

Параметризация и численное интегрирование позволили выполнить систематические цифровые исследования эволюционных преобразований ТФД и основных свойств системы, включающих устойчивость траекторий, изменение притягивающих множеств деформаций, сил, мощности и работы вдоль траекторий перемещения инструмента или соответствующих им траекторий работы необратимых преобразований энергии. В результате проанализированы свойства эволюции при вариациях начальных значений параметров формируемой резанием динамической связи, при изменениях неэволюционных параметров и возмущений. Проанализировано более 1000 вариантов изменения начальных параметров и возмущений. Здесь приведем пример исследования влияния параметров эволюционной ДСР на выходные свойства на примере износа (рис.8).

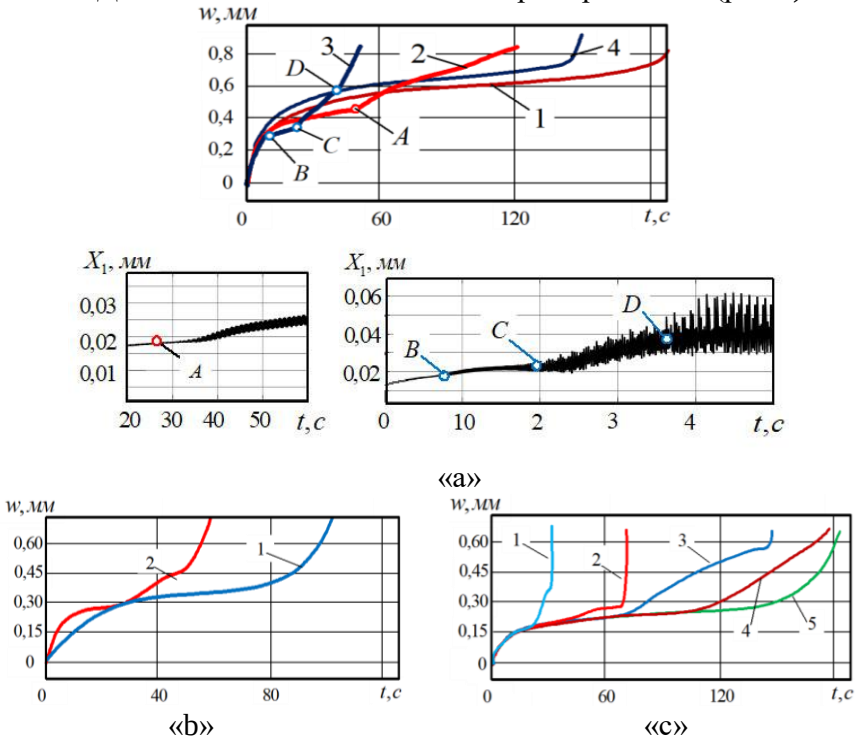


Рис.8. Эволюция износа: а) 1– $\rho=50 \text{ кг/мм}^2$, $T^{(0)}=10^{-4} \text{ с}$; 2– $\rho=100 \text{ кг/мм}^2$, $T^{(0)}=10^{-4} \text{ с}$; 3– $\rho=100 \text{ кг/мм}^2$, $T^{(0)}=0,7 \cdot 10^{-4} \text{ с}$; 4– $\rho=100 \text{ кг/мм}^2$, $T^{(0)}=0,2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$; б) 1– $c_{3,3}=1600 \text{ кг/мм}$; 2– $c_{3,3}=800 \text{ кг/мм}$; в) 1– $k^{(h)}=0,05$; 2– $k^{(h)}=0,1$; 3– $k^{(h)}=0,5$; 4– $k^{(h)}=1$; 5– $k^{(h)}=5$;

В точках «А», «В», «С», «D» наблюдаются бифуркации притягивающих множеств, которые наглядно иллюстрируют во фрагментах деформаций X_1 переход свойств ДСР к хаотической динамике на терминальном этапе развития износа инструмента. Кривые «2», «3», «4» (рис.8, «а») демонстрируют существование оптимальных параметров ρ и $T^{(0)}$ по критерию минимизации интенсивности изнашивания инструмента и шероховатости поверхности, и соответственно оптимальную скорость резания $V_3^{(0)}$, от которой зависит $T^{(0)}$. Соответственно, можно говорить о поиске оптимальной траектории скорости резания, минимизирующей функционал интенсивности изнашивания на каждом этапе обработки детали. Вариации неэволюционных параметров, например, матриц жесткости c , также влияют на изнашиваемость (рис.8, «б»), и образуют большое разнообразие притягивающих множеств и их бифуркации вдоль ТФД. Уменьшение добротности ДСР $h = k^{(h)} h^{(0)}$ способствует повышению стойкости инструмента (рис.8, «с»). Рассмотрено влияние вибрационных возмущений, также показывающие возможность существования оптимальных высокочастотных колебаний, при которых не только стабилизируются свойства системы в низкочастотной области, но и возрастает износостойкость инструмента.

Отметим следующие новые для предметной области результаты, которые имеют принципиальное значение для управления ДСР.

1. Каждая эволюционная траектория является уникальной и может обладать высокой чувствительностью к малым вариациям начальных параметров, возмущений и технологических режимов. Поэтому для систем резания принципиально обеспечить условие «грубости» в смысле А.А. Андропова, то есть робастности.

2. Вдоль траектории работы имеют место необратимые преобразования параметров динамической связи, их изменения приводят к бифуркациям притягивающих множеств деформаций, сил и мощности необратимых преобразований. Показаны случаи, когда наблюдаются бифуркации типа вилки, тогда предсказание развития эволюции между такими бифуркациями невозможно.

3. В систему (14) скрыто входят технологические параметры (они раскрыты в уравнениях (5) и (11)). Их изменения также вызывают динамическую перестройку свойств. Поэтому в шестой главе предлагается решение проблемы согласования траекторий технологических параметров с эволюционными свойствами ДСР и поиска тра-

ектория технологических режимов, вдоль которой выполняются условия минимизации интенсивности изнашивания инструмента при обеспечении требуемого качества деталей.

В пятой главе рассматривается задача представления выходных свойств резания в координатах пространства состояния ДСР. Приводится разработанный математический инструментарий для оценки износа инструмента, макро и микрогеометрии заготовки по доступным оцениванию координатам пространств $\mathfrak{R}_L^{(3)}$ и $\mathfrak{R}_X^{(3)}$. Вводятся в рассмотрение множества качества обрабатываемой заготовки $G \subset G_0 = \{G_{1,0}, G_{2,0}, \dots, G_{s,0}\}^T \in \mathfrak{R}_G^{(S)}$ и состояния процесса резания $Q \subset Q_0 = \{Q_{1,0}, Q_{2,0}, \dots, Q_{m,0}\}^T \in \mathfrak{R}_Q^{(m)}$. Надо найти операторы $\aleph_G, \aleph_Q$, раскрывающие связь G, Q и координат пространств $\mathfrak{R}_U^{(n)}, \mathfrak{R}_L^{(3)}, \mathfrak{R}_X^{(3)}$

$$\begin{cases} G = \aleph_G \{U, L, X, Y, F, \Phi\} + E_G; \\ Q = \aleph_Q \{U, L, X, Y, F, \Phi\} + E_Q, \end{cases} \quad (15)$$

где E_G, E_Q - остатки, обусловленные влиянием неучтенных физических взаимодействий. Вначале рассматривается преобразование ТФД в геометрическую топологию поверхности детали. Вводится понятие «скелетной» геометрической топологии $\mathfrak{Z}_c(L, X, Y)$, как вариаций рельефа относительно заданного по программе ЧПУ. Для поиска $\aleph_G$ разработан алгоритм реконструкции $\mathfrak{Z}_c(L, X, Y)$ по векторам $L^{(\phi)}(t), L(t)$ и $A(t)$ в виде

$$\begin{aligned} L_i(t) &= \{L_i(\Delta t), L_i(2\Delta t), \dots, L_i(k\Delta t)\}, \quad i = 1, 2, 3, k = 2s \cdot l; \\ L_i^{(\phi)}(t) &= \{L_i^{(\phi)}(\Delta t), L_i^{(\phi)}(2\Delta t), \dots, L_i^{(\phi)}(k\Delta t)\}, \quad i = 1, 2, 3, k = 2s \cdot l; \\ A_i(t) &= \{\Delta_i(\Delta t), \Delta_i(2\Delta t), \dots, \Delta_i(k\Delta t)\}, \quad i = 1, 2, 3, k = 2s \cdot l, \end{aligned} \quad (16)$$

где Δt – дискрета времени в последовательности наблюдаемых координат, l – количество приращений на длине окружности заготовки, s – количество измерений за $l/2$; $i = 1, 2, 3 \dots$; $\Delta_i(t) = L_i^{(\phi)}(t) - L_i(t)$, при этом последовательности $A_i(t)$ дают высотные отклонения, а $A_2(t)$ и $A_3(t)$ – шаговые в плоскости $L_2 - L_3$. Для анализа $\mathfrak{Z}_c(L, X, Y)$ главное значение имеют $A_1(t)$. Тогда топологию $\mathfrak{Z}_c(L, X, Y)$ можно задать в виде матрицы, в которой строки это высотные отклонения по пути

резания на каждом обороте, а столбцы отклонения радиуса заготовки вдоль L_2 представляют стробоскопические отображения Пуанкаре со сдвигом $T=2s\Delta t$.

$$\mathfrak{Z}_c(\mathbf{L}, \mathbf{X}) = \begin{bmatrix} \Delta_i(\Delta t) & \Delta_i(2\Delta t) & \dots & \Delta_i(s\Delta t) & \dots & \Delta_i(2s\Delta t) \\ \Delta_i(T + \Delta t) & \Delta_i(T + 2\Delta t) & \dots & \Delta_i(T + s\Delta t) & \dots & \Delta_i(T + 2s\Delta t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta_i(kT + \Delta t) & \Delta_i(kT + 2\Delta t) & \dots & \Delta_i(kT + s\Delta t) & \dots & \Delta_i(kT + 2s\Delta t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta_i(lT + \Delta t) & \Delta_i(lT + 2\Delta t) & \dots & \Delta_i(lT + s\Delta t) & \dots & \Delta_i(lT + 2s\Delta t) \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Графическое отображение матрицы позволяет наглядно оценить геометрические показатели точности обрабатываемого вала во всех сечениях (рис.9). Если $\Delta_i(t) = 0$, то поверхность соответствует поверхности, запрограммированной на ЭВМ ЧПУ.

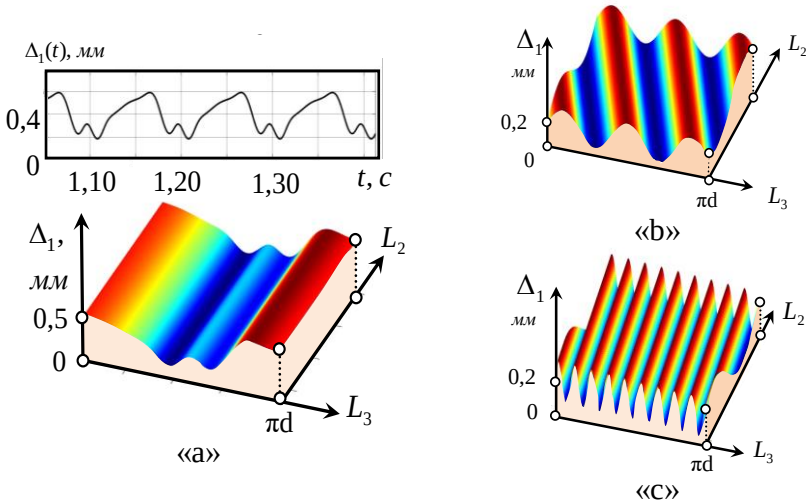


Рис. 9. Примеры $\mathfrak{Z}_c(\mathbf{L}, \mathbf{X}, \mathbf{Y})$ для случая возмущенной ДСР по синусоидальному закону с частотой Ω_0 , $t_p^{(0)} = 1$ мм, $S_p^{(0)} = 0,55$ мм, частота вращения заготовки $\Omega = 1$ Гц: а) отображение высотных неровностей для $\Omega_0 = \Omega$; б) $\Omega_0 \approx 3\Omega$; в) $\Omega_0 = 9,5$ Гц, $\Omega = 10$ Гц

Топологию определяют не только режимы резания, но соотношение частот вращения заготовки и ТФД. Проанализированы отображения притягивающих множеств деформаций в скелетной геометрической топологии. Показано, что хаотическому аттрактору соответствует хаотический характер неровностей на всей поверхности заготовки. Если частота супернизкочастотных притягивающих

множеств синхронизирована с частотой вращения заготовки, то на ее поверхности формируются компактные области, имеющие принципиально различные неровности. При рассмотрении отображений предельных циклов их совпадение или кратность частот Ω_0 и Ω дают поперечные неровности, малые отклонения Ω_0 от Ω формируют неровности одновременно в продольном и поперечном сечениях (рис.9, b, c).

Однако адекватность математических вычислений $\mathfrak{Z}_c(L, X, Y)$ по деформациям $X(t)$ для диагностики и оценки геометрии поверхности детали ограничена, так как при формировании поверхности также оказывают влияние неучтенные в модели молекулярно-механические, пластические и термодинамические процессы. Экспериментально-аналитически доказано, что математическое описание $\mathfrak{Z}_c(L, X, Y)$, и в целом оценки G , Q , адекватны в ограниченном частотном диапазоне (рис. 10).

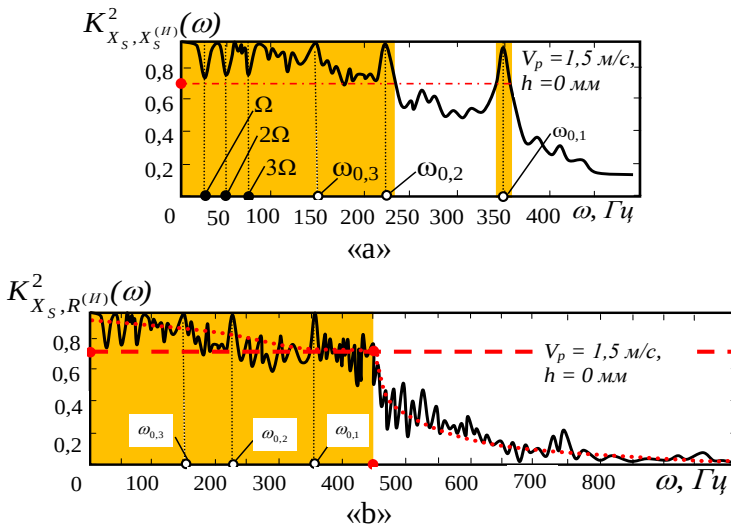


Рис. 10. Функции когерентности: а) для измеренных колебательных смещений $X_S^{(II)}$ и моделируемых X_S ; б) для X_S и измеренной функции профиля $R^{(II)}$

В низкочастотном диапазоне и в области резонансных частот $\omega_{0,i}$ $K^2_{X_S, X_S^{(II)}}(\omega) \rightarrow 1$. В высокочастотном диапазоне, выше полосы пропускания колебательных контуров ДСР $K^2_{X_S, R^{(II)}}(\omega) \rightarrow 0$. На функцию

когерентности также влияют режимы резания, например, повышение скорости резания приводит к уширению частотного диапазона, в котором математический инструментарий позволяет адекватно оценивать деформации. Напротив, границы частот адекватности модели уменьшаются с развитием износа, так как увеличивается влияние неучтенных взаимодействий. Измерения колебательных смещений $X_S^{(II)}$ и функции профиля $R^{(II)}$ проводились с помощью стенда вибрационного контроля с акселерометрами A603C01 и контурографом-профилографом T4HD фирмы IMTS/Triebworx. Для оценки морфологии применялся трехмерный микроскоп Contour ELITE фирмы BRUKER (рис. 11, б). На рис. 11, «а» видно, что при комплексном анализе топологии поверхности необходимо учитывать диапазон частот свыше 1 кГц. Высокочастотные составляющие формируют микрорельеф поверхности, в том числе, и шероховатость. Отмечается, что с помощью скелетной геометрической топологии можно надежно оценивать лишь макрогеометрию, в том числе волнистость.

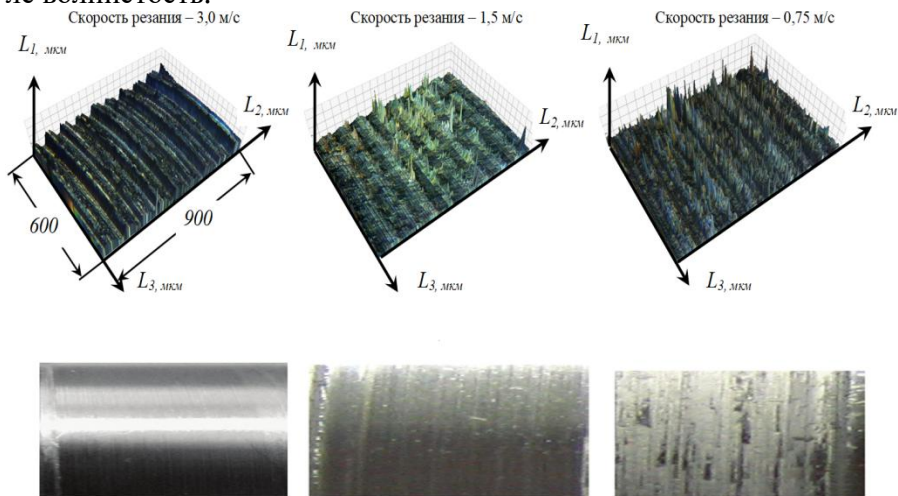


Рис. 11. Пример морфологии поверхности при $V_p=3$ м/с, $V_p=1,5$ м/с, $V_p=0,75$ м/с

Для оценки микрорельефа и износа предлагаются методы, основанные на распознавании образов. Эти методы иллюстрируются на примере износа и шероховатости на базе частотного анализа. Для построения информационного пространства $\Pi=\{\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_k\} \in \mathfrak{R}_\Pi^{(k)}$ систем диагностики износа необходимо анализируется чувстви-

тельность спектра колебаний к вариациям параметров, изменяющихся по мере развития износа инструмента. Одной из общих оценок $\Pi_1(w)$ является смещение средней частоты спектра ω_c деформаций X_1

$$\Pi_2(w) = \left| \int_0^{\omega_c} S_{X_1, X_1}(\omega) d\omega - \alpha_H \int_{\omega_c}^{\infty} S_{X_1, X_1}(\omega) d\omega \right| \left\{ \int_0^{\infty} S_{X_1, X_1}(\omega) d\omega \right\}^{-1} \quad (18)$$

где S_{X_1, X_1} – нормированный к дисперсии спектр, α_H – коэффициент, обеспечивающий равенство $\int_0^{\omega_c} S_{X_1, X_1}(\omega) d\omega = \alpha_H \int_{\omega_c}^{\infty} S_{X_1, X_1}(\omega) d\omega$ на началь-

ном этапе износа, при этом монотонное смещение частоты свидетельствует о развитии износа. Оценка $\Pi_2(w)$ характеризует изменение общего уровня вибраций в высокочастотной области (ω_s, ∞)

$$\Pi_2(w) = \left| \int_{\omega_s}^{\infty} S_{X_1, X_1}^{(i)}(\omega) d\omega - \int_{\omega_s}^{\infty} S_{X_1, X_1}^{(0)}(\omega) d\omega \right| \quad (19)$$

где ω_s – частота среза ДСР; $S_{X_1, X_1}^{(0)}(\omega)$ – нормированный к дисперсии спектр неизношенного инструмента; $S_{X_1, X_1}^{(i)}(\omega)$ – нормированный к дисперсии спектр сигнала ВАЭ инструмента, износ которого достигает значения $w=w_i$. Также в качестве оценки рассматривается не стационарность сигнала ВАЭ $\Pi_3(w)$, так как при приближении износа к своему критическому значению уровень хаотичности в притягивающих множествах деформаций возрастает

$$\Pi_3(w) = M[a^{(0)}(t)] / M[a^{(i)}(t)] \quad (20)$$

где $a^{(i)}(t)$ – сигнал виброускорений во временной области с отфильтрованной низкочастотной составляющей; $M[a^{(i)}(t)]$ – математическое ожидание сигнала; $a^{(0)}(t)$ – вариации относительно $M[a^{(i)}(t)]$ равная

$$a^{(0)}(t) = \{ [M(a^{(i)}) - a^{(i)}(\Delta t)], [M(a^{(i)}) - a^{(i)}(2\Delta t)], \dots, [M(a^{(i)}) - a^{(i)}(k\Delta t)] \}$$

. В диссертации подробно рассмотрен пример построения информационной модели диагностики износа при обработке стали 20Х твердосплавными пластинами из Т15К6 относительно четырех стадий износа задней грани: $\Delta w_1 \in (0, 0,15)$ мм, $\Delta w_2 \in (0,15, 0,3)$ мм, $\Delta w_3 \in (0,3, 0,45)$ мм, $\Delta w_4 \in (0,45, 0,6)$ мм. Для этого определялись центры груп-

пирования износа каждой группы и дисперсия рассеяния относительно этих центров в плоскости оценок « $\Pi_2(w)$ - $\Pi_1(w)$ » и « $\Pi_3(w)$ - $\Pi_1(w)$ » (рис. 12).

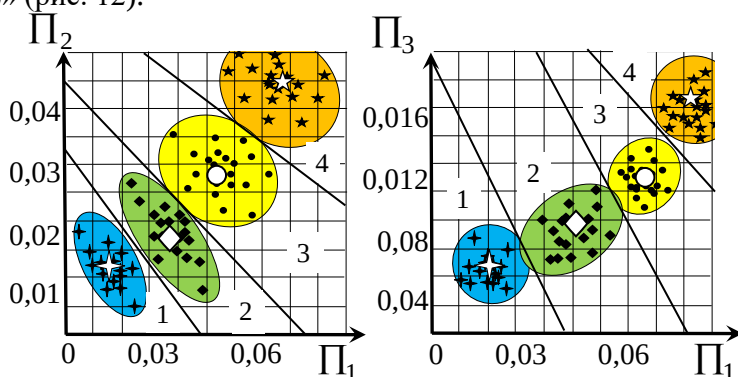


Рис. 12. Распределение информативных признаков для различных стадий развития износа и центры группирования (белые фигуры)

Для каждого кластера определялись эллипсоиды рассеяния с 95%-ой вероятностью, позволяющие определять разделяющие гиперповерхности, удовлетворяющие Байесовскому правилу. Приведенные примеры далеко не исчерпывают возможности оценивания состояния процесса резания по динамическим характеристикам.

В шестой главе рассматриваются разработанные положения синергетического синтеза управления (ССУ) выходными свойствами обработки, в основе которых лежат все ранее изложенные методы анализа ДСР. В отличие от принятых в мировой практике принципов подчиненного регулирования, предлагается использовать синергетический принцип взаимного согласования всех иерархически связанных подсистем вплоть до выходных свойств обработки. Таким образом, во-первых, проектируются желаемые ТФД, а затем на основе решения обратных задач динамики определяются траектории технологических режимов и соответствующая им программа ЧПУ. Во-вторых, обеспечивается устойчивость взаимосвязанных траекторий на всех этапах эволюционных изменений свойств. Тем самым обеспечиваются условия притяжения всех взаимосвязанных траекторий ДСР к желаемым траекториям.

Показано, что за счет эволюции ДСР, для обеспечения требуемых выходных свойств обработки всегда приходится уменьшать скорости ТИЭС. Это относится, как к скорости резания, вариации которой должны обеспечивать минимизацию интенсивности изна-

шивания инструмента, так и к скорости подачи, которая должна стабилизировать диаметр вала. Траектории этих скоростей взаимосвязаны. Поэтому вдоль траектории, во-первых, всегда существует критический путь, после которого обеспечение требуемых выходных свойств уже невыполнимо. Во-вторых, при обработке партии деталей существует такая координата переключения циклов обработки, при которой стоимостная эффективность изготовления партии деталей минимальна. В диссертации аналитически доказаны условия оптимальности, а также приводятся алгоритмы и примеры эффективности оптимизации управления.

Предлагается три подхода к синтезу. **Первый** рассматривает си-нергетический синтез программы ЧПУ, построенной по традиционной схеме систем подчиненного управления, при априорно заданной информации о зависимости свойств ДСР вдоль траектории инструмента. Он иллюстрируется на примере изготовления вала длиной 120 мм из стали 45 диаметром 8,0 мм. В рассматриваемом примере он определяется зависимостью

$$c_0(L_2) = c^{(0)} + \alpha_c(50 - L_2)^2 \quad (21)$$

где $c^{(0)}$ – жесткость в точке $L_2 = 50 \text{ мм}$, α_c – параметр, размерности $[\text{кг} / \text{мм}^3]$. Основным выходным параметром качества является условие $D_0(L_2) = 2[L_1(0) + X_1(L_2) + Y_1(L_2)] = \text{const}$. Тогда погрешность $\Delta_{X,Y}$ вала представляется в виде

$$\Delta_{X,Y} = t_P^{(0)} \frac{\rho_0 S_P^{(0)} [g_{X_1} + g_{Y_1}(L_2)]}{1 + \rho_0 S_P^{(0)} [g_{X_1} + g_{Y_1}(L_2)]} = \frac{t_P^{(0)}}{1 + \delta} \quad (22)$$

где g_{X_1} , g_{Y_1} – податливости подсистем заготовки и инструмента, связывающие модуль $\mathbf{F}(t) = F^{(0)} \{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}^T$ с установившимися деформациями X_1^* и Y_1^* ; $t_P^{(0)}(L_2) = D(L_2)/2 - L_1(L_2)$; $S_P^{(0)}(L_2) = V_2(L_2)/\Omega$; $V_3 = \pi d \Omega$. Для обеспечения $\Delta_{X,Y}(L_2) = \text{const}$ можно изменять подачу. Из (22) при условии (21) можно вычислить закон управления в виде зависимости подачи от перемещения, которая после интерполирования определяет программу ЧПУ

$$S_P^{(0)}(L_2) = \frac{\Delta_{X,Y}(L_2)}{\rho_0 [g_{X_1} + g_{Y_1}(L_2)] [D/2 - L_1(0) - \Delta_{X,Y}(L_2)]}, \quad (23)$$

где задается предельно допустимое отклонение диаметра $\Delta_{X,Y}$.

Если дополнительно задана априорная информация об изменениях других свойств вдоль траектории L_2 , например, законе изме-

нения припуска, то закон (23) будет существенно изменен. Для иллюстрации этого положения сравним погрешность $\Delta_{x,y}$ при различных алгоритмах управления. Рассмотрим три закона (рис. 13): случай 1, обработка по закону (23); случай 2, обработка с постоянными режимами; случай 3, обработка со стабилизацией силы.

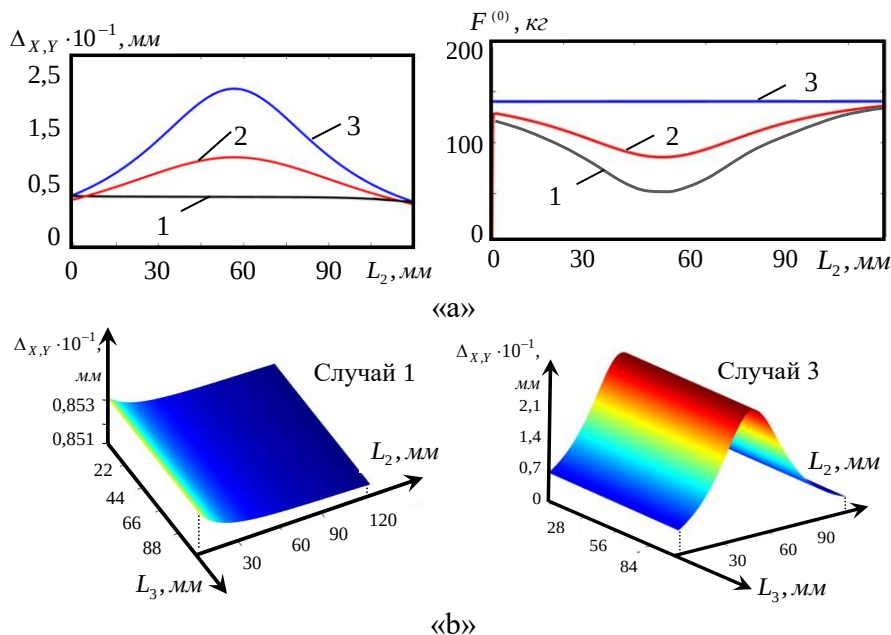


Рис. 13. Результаты различных подходов управления в характеристиках: а) – погрешности обработки вдоль L_2 ; б) – геометрической топологии поверхности заготовки

Приведенные зависимости (рис. 13 «а») и геометрические топологии (рис. 13 «б») раскрывают особенность изменения точности, обусловленные взаимосвязанностью сил и деформаций. Деформации через вариации площади среза вызывают изменение сил, которые сами определяют деформации. Поэтому при обработке на постоянных режимах наблюдается уменьшение погрешности по сравнению с обработкой со стабилизацией сил. Однако этот эффект имеет противоположное влияние на точность, если учитывать вариации припуска. Здесь стабилизация сил при неизменной жесткости обеспечивает стабилизацию деформаций. Использование этого подхода позволяет повысить стоимостную эффективность обработки в

зависимости от номенклатуры деталей и состояния станка в 1,5-2,5 раз по сравнению с традиционной обработкой.

Второй подход основан на учете эволюционных изменений свойств ДСР. При вычислении закона управления полагается, что изменение сил резания $F^{(0)}$ и параметров динамической связи можно усреднить в пределах i -го прохода. Скорость V_3 выбирается из принципа минимизации скорости изнашивания, которая определяется

$$v_n^{(t)}(A_n) = \alpha_1 \hat{F}_n^{(0)} V_3 - \frac{\alpha_2 V_3}{\lambda_1} \Phi^{(a)}(A, F^{(0)}) + \frac{\alpha_2 \mu_v V_3}{\lambda_2} \Phi^{(p)}(A, F^{(0)}), \quad (24)$$

где
$$\Phi^{(a)}(A, F^{(0)}) = F_n^{(0)} - F_1^{(0)} \exp(-\lambda_1 A_n) - \sum_{i=2}^{i=n-1} \{(F_{i-1}^{(0)} - F_i^{(0)}) \exp[\lambda_1 (A_{i-1} - A_n)]\};$$

$$\Phi^{(p)}(A, F^{(0)}) = F_n^{(0)} + F_1^{(0)} \exp(\lambda_2 A_n) + \sum_{i=2}^{i=n-1} \{(F_{i-1}^{(0)} - F_i^{(0)}) \exp[-\lambda_2 (A_{i-1} - A_n)]\};$$

$\alpha_1 \hat{F}_n^{(0)} V_3$ – мощность необратимых преобразований. Пример траекторий по мере развития износа приведен на рис.15. Вычисленные траектории $V_2(L_2)$ и $V_3(L_2)$ при различных стадиях износа позволяют с погрешностью не более 1,5% от заданной уставки $\Delta_{X,Y}=0,0592$ мм стабилизировать суммарные погрешности диаметра (рис. 14, а).

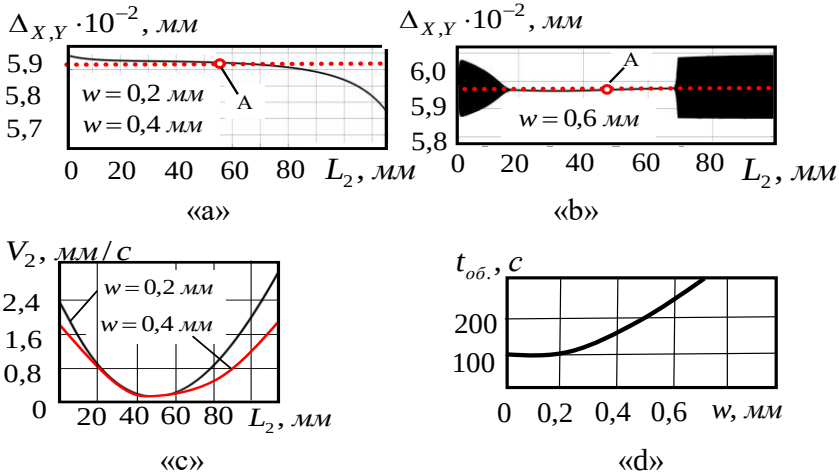


Рис. 14. Выходные характеристики процесса резания в ходе эволюции износа: а) траекторий суммарных погрешностей $\Delta_{X,Y}$ б) заданный закон изменения $V_2(L_2)$; с) время обработки одной поверхности

При износе $w \geq 0,6$ мм (рис. 14, b) происходит потеря устойчивости и формируются притягивающие множества деформаций, искажающих геометрическую топологию. Таким образом, в процессе эволюции меняется не только износ, но и свойства ДСР в целом. Отметим, что траектории с развитием износа будут увеличивать длительность обработки детали, так как для стабилизации $\Delta_{x,y}$ необходимо уменьшать скорость подачи (рис. 14, c, d).

Определение управления по этим двум подходам требуют большего объема вычислений. В связи с этим в диссертации предложен и реализован прием, основанный на использовании математического инструментария в качестве виртуальной цифровой модели (ВЦМ), представленной в программном комплексе Matlab, Simulink. Тогда при определении управления, например, по закону постоянства $\Delta_{x,y}$ строится внутри модели система стабилизации $\Delta_{x,y}$ путем варьирования скорости подачи. Тогда полученная траектория скорости подачи фактически является программой ЧПУ. При этом автоматически определяются и другие составляющие погрешности на основе вычисления скелетной геометрической топологии. Представленный подход может быть обобщен и на использование ВЦМ для диагностики процесса резания, позволяющей адаптивно корректировать программу ЧПУ.

В связи с использованием ВЦМ рассмотрен **третий** подход адаптивного системно-синергетического управления станком, снабженным дополнительными источниками информации о состоянии ДСР, например, динамометром для определения текущих значений сил. Однако он требует модернизация не только станка, но и систем ЧПУ. В случае измерения сил резания F_Σ , ВЦМ позволяет получить наблюдаемые оценки деформаций по осям X и Y, а также траектории $L^{(\phi)}$, так как траектории суппорта и шпиндельной группы определяются программно в системе ЧПУ. Таким образом, организация информационного обмена между ЧПУ, ВЦМ и силовыми датчиками создаёт основу для случая, когда априорно не задана информация об изменениях свойств системы. Не останавливаясь на деталях, приведем результаты цифрового моделирования погрешности диаметра ΔD при обработке с различными подходами управления (рис.15). Алгоритм №1 (традиционный) – управление с постоянными технологическими режимами. Алгоритм №2 (синергетический) использует априорную информацию о зависимости жёсткости заготовки

вдоль продольной оси для синтеза управления ТИЭС. Алгоритм №3 (адаптивный) основывается на программном задании и стабилизации силы резания вдоль траектории инструмента за счет регулирования скорости подачи. Предложенная методика ССУ обеспечивает динамическое согласование управляющей программы ЧПУ с желаемыми траекториями формообразующих движений, учитывает естественные динамические свойства подсистем, их взаимовлияние и влияние внутрисистемных связей на траектории по направлению цели обработки. Причем, желаемые траектории проектируются согласно требованиям изготовления партии деталей заданного качества при минимизации приведенных затрат.

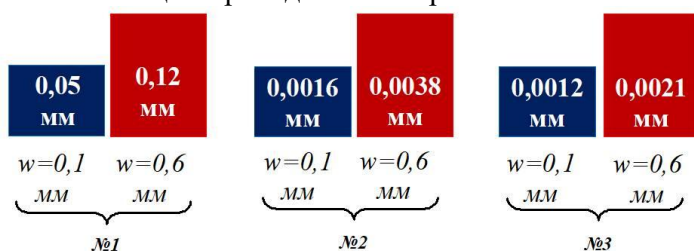


Рис. 15. Изменение ΔD при различных алгоритмах управления

В заключении необходимо отметить, что системно-синергетический анализ и синтез открывает не рассматриваемые ранее направления повышения эффективности обработки. Среди этих направлений необходимо выделить, как синергетический принцип построения программ ЧПУ, так и новые методы повышения эффективности, основанные на обмене информацией между координатами состояния динамической системы резания и ЭВМ, представляющей ВЦМ. Отдельные элементы разработанных принципов динамического мониторинга и управления нашли применение в условиях филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, ПАО «Роствертол», г. Ростова-на-Дону. По данным АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» внедрение разработанных принципов управления и диагностирования позволили получить на ограниченной номенклатуре деталей экономический эффект 1,2 млн. рублей в год. Ассоциация производителей станкоинструментальной продукции «Станкоинструмент» рекомендует результаты диссертации к использованию на предприятиях–членах Ассоциации и подтверждает практическую значимость диссертационной работы для станкоинструментальной промышленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОБЩИЕ ВЫВОодЫ ПО РАБОТЕ

На основе выполненных исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в отрасли станкостроения, заключающееся в формировании нового системно-синергетического направления повышения эффективности изготовления деталей заданного качества при минимизации приведенных затрат, с учетом согласования технологических режимов с изменяющимися свойствами ДСР. Результаты работы являются теоретической базой для создания интеллектуальных систем ЭВМ ЧПУ, отдельные ее элементы эффективны и при создании локальных систем управления и динамического мониторинга состояния процесса резания. По результатам работы можно сделать следующие **основные выводы**.

1. Предложено математическое моделирование ДСР, состоящей из подсистем управления ЭВМ ЧПУ, приводов исполнительных элементов станка, деформаций подсистем инструмента и заготовки, взаимодействующих через динамическую связь процесса резания, а также преобразования всех координат состояния в оценки геометрического качества изготовления деталей и состояния процесса резания, оцениваемое интенсивностью изнашивания инструмента. Модель раскрывает процессы внутрисистемной самоорганизации, и в отличие от известных частных моделей, раскрывает эмерджентность ДСР в целом.

2. Для анализа и синтеза ДСР предложен и проиллюстрирован подход, основанный на разделении движений на «быстрые», «медленные» и «супер медленные», то есть на три взаимосвязанных подсистемы. Он обосновывается известными асимптотическими свойствами нелинейных дифференциальных уравнений имеющих малые параметры при производных. Применительно к ДСР «медленные» движения характеризуют ТИЭС вместе с «медленными» смещениями точки равновесия упругих деформаций. «Быстрые» движения определяются деформациями, рассматриваемыми в подвижной системе координат, движение которой задаются «медленными» движениями. «Супер медленные» движения характеризуют эволюционные изменения ДСР, обусловленные необратимыми преобразованиями энергии в зоне резания, изменяющими свойства ДСР. Например, эволюция определяется изнашиванием инструмента. Раскрытые механизмы взаимного влияния подсистем, которое формирует множество внутренних обратных связей, вызывающих явления самоорганизации, влияющие на выходные свойства обработки. Благодаря подходу **были раскрыты и объяснены 3 известных меха-**

низма самовозбуждения динамики процесса резания, связанные с развитием прецессионных колебаний, регенеративным эффектом и влиянием сил по задним граням инструмента.

3. Выполненное экспериментально-аналитическое изучение ДСР касалось, прежде всего, подсистемы деформаций инструмента относительно заготовки. Здесь в дополнение к известным моделям сил в координаты состояния включены модели дополнительных сил, формируемых в области контакта задней грани инструмента и заготовки, позволившие выявить изменения сил в зависимости от развития периодических деформаций в вариациях относительно равновесия. Подробно раскрыты проблемы устойчивости и формирования притягивающих множеств деформаций. Отмечается принципиальное влияние на устойчивость и динамику циркуляционных и гироскопических сил, формируемых за счет реакции со стороны процесса резания. Отмечается также образование супер низкочастотных притягивающих множеств деформаций, а также механизмы преобразования предельных циклов через каскад бифуркаций удвоения периода колебаний в хаотические колебания.

4. ДСР является возмущенной, поэтому в работе приведен анализ влияния на динамику кинематических возмущений, биений шпинделя, специально вводимых в зону резания управляемых колебаний, в том числе ультразвукового диапазона. Показано, что в низкочастотном диапазоне вдоль периодической траектории возможно формирование высокочастотных колебаний, что вызывает, например, зависимость шероховатости поверхности от биений шпиндельной группы. Раскрыты условия параметрического самовозбуждения, явления неизохронности колебаний, синхронизации предельных циклов и др. Самостоятельное значение имеют высокочастотные колебания, лежащие за пределами полосы пропускания колебательных контуров подсистем. Они перестраивают динамику системы в низкочастотном и среднечастотном диапазонах за счет изменения эффективных значений сил и их запаздывания, вызывая эффект вибрационной стабилизации. Предлагаются методики управления вводимыми в зону резания высокочастотными колебаниями для устранения супернизкочастотных притягивающих множеств и хаотических аттракторов, а также раскрываются эффекты управления формируемым резанием диаметра вала с помощью высокочастотных колебаний.

5. Для моделирования эволюционных преобразований предлагается модель ДСР, которая относится к классу нелинейных функционально

связанных систем интегро-дифференциальных уравнений динамики. Она учитывает зависимость параметров динамических связей от траектории мощности необратимых преобразований энергии по работе. Модель раскрывает механизмы эволюционных изменений ДСР, например, развитие износа инструмента, и позволяет моделировать влияние эволюции на геометрическую топологию поверхности.

6. Отмечается высокая чувствительность эволюционных траекторий к начальным параметрам системы, технологическим режимам и возмущениям. Доказано, что с помощью разработанной цифровой модели и методики анализа можно вычислить траекторию режимов, которая минимизирует интенсивность изнашивания инструмента, обеспечивая согласование эволюционно изменяющихся свойств с программой ЧПУ.

7. Приведенные методики вычисления скелетной геометрической топологии поверхности позволяют определять макро и микро отклонения геометрической топологии, формируемой программой ЧПУ, от реальной. Разработанная методика оценки позволяет вычислять значения геометрических параметров детали и прогнозировать их изменение. На основе анализа функций когерентности доказано, что точность и адекватность отображения траекторий формообразующих движений в вычисляемой геометрической топологии ограничивается частотным диапазоном.

8. Разработанный математический инструментарий позволил аналитически определить и экспериментально подтвердить методику построения информационных пространств признаков для диагностирования выходных параметров системы. При этом решается задача не только определения значимых информационных признаков, но и проблема оптимального разделения пространства признаков на кластеры по признаку принадлежности к диагностическому параметру. Методика проиллюстрирована на примерах диагностирования износа и шероховатости формируемой резанием поверхности. **Адекватность и применимость разработанных оценок подтверждена экспериментальными исследованиями для частотного диапазона до 7 кГц.**

9. Сформулированные теория и методика системно-синергетического управления показали свою эффективность для случаев обработки, отличающихся полнотой априорной информации об изменении свойств системы вдоль траектории инструмента и возможностями наблюдения за доступными измерению координатами, например, силами резания. Использование методики для определения управляющих параметров про-

граммы ЧПУ, согласованных с априорно заданными изменяющимися свойствами системы на примере изготовления валов малой жесткости **позволило снизить максимальную погрешность обработки диаметра при единичном проходе на 0,7 мм, и повысить эффективность обработки по машинному времени на 28%**. Рассмотрены также алгоритмы компенсации влияния на точность эволюционных изменений ДСР, а также нового адаптивного класса систем ЧПУ, создание которых, вписывается в парадигму современной тенденции цифровизации станков и увеличения производственной мощности предприятий машиностроения. Отдельные элементы разработанных принципов динамического мониторинга и управления нашли применение в условиях филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, ПАО «Роствертол», г. Ростова-на-Дону. По данным АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» **внедрение разработанных принципов управления и диагностирования позволили получить на ограниченной номенклатуре деталей экономический эффект 1,2 млн. рублей в год.**

10. Разработанный математический инструментарий представляет собой виртуальную цифровую модель системы резания, позволяющую получать новые знания о факторах и внутрисистемных механизмах, влияющих на ее динамику и выходные свойства обработки при заданном информационном пространстве характеристик станка, его механических подсистем, программы управления, вибрационных возмущений, в том числе, и неуправляемых. С помощью виртуальной модели ДСР можно выполнить анализ свойств обработки на стадии проектирования, этот инструментарий открывает направление динамического мониторинга процесса резания.

ДАЛЬНЕЙШЕЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ

В основу системно-синергетического анализа и синтеза положен принцип расширения-сжатия пространства состояний. В приведенных исследованиях расширение размерности связано с раскрытием механических взаимодействий при преобразовании управления в выходные свойства процесса. Однако наряду с механикой необходимо учитывать взаимодействия иной физической природы. Поэтому на следующем этапе при расширении размерности пространства состояний следует использовать идеи системной физики, раскрывающие внутрисистемные физические взаимодействия, что и определяет дальнейшие пути развития системно-синергетического анализа и синтеза.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В 46 РАБОТАХ

Ниже приводится информация об опубликованной монографии и публикациях в журналах из перечня ВАК РФ и изданиях, включенных в базы SCOPUS и W&S

1. Заковоротный В. Л., Гвинджилия В.Е. Основы системно-синергетического анализа и синтеза управления процессом обработки на металлорежущих станках. – Санкт-Петербург: Лань, 2025. – 436 с.
2. Гвинджилия В.Е. Особенности потери устойчивости при точении валов малой жесткости // Известия ВолгГТУ. – 2026. – №1. – С.14-18.
3. Гвинджилия В.Е. Влияние динамических свойств процесса резания на геометрические характеристики изготовления // Известия ВолгГТУ. – 2026. – №1. – С.18-23.
4. Гвинджилия В.Е. Вибрационное управление изнашиваемостью задней грани инструмента при точении // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2026. – 23(1). – С.7–16.
5. Заковоротный, В. Л. Гвинджилия В.Е., Кислов К.В. Информационные свойства виброакустической эмиссии в системах диагностики износа режущего инструмента // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 3. – С. 50-70. – DOI 10.17212/1994-6309-2025-27.3-50-70.
6. Zakovorotnyi V. L., Gvindjiliya V. E. Influence of speeds of forming movements on the properties of geometric topology of the part in longitudinal turning // Journal of Manufacturing Processes. – 2024. – Vol. 112. – P. 202-213. – DOI 10.1016/j.jmapro.2024.01.037.
7. Заковоротный В. Л., Гвинджилия В.Е. Влияние вибраций на геометрические характеристики детали при продольном точении // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2024. – № 9(774). – С. 52-71.
8. Гвинджилия В.Е., Фоминов Е. В., Лебедев В. А. Диагностические признаки развития износа инструмента при моделировании динамики процесса резания // Металлообработка. – 2024. – № 5(143). – С. 58-64.
9. Гвинджилия В.Е. Влияние скорости резания на импульсные изменения температуры передней поверхности резца при точении жаропрочной стали 15Х2НМФА / Е. В. Фоминов, А. А. Марченко [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 3. – С. 23-36.

10. Заковоротный, В. Л., **Гвинджилия, В. Е.** Изучение отображения вибрационных возмущений в геометрии формируемой резанием поверхности при точении // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 107-126.
11. **Гвинджилия В.Е.** Влияние динамических характеристик процесса резания на шероховатость поверхности детали при токарной обработке / Е. В. Фоминов, Д. В. Моисеев, Е. И. Гамалеева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 143-157.
12. Заковоротный В. Л., **Гвинджилия В.Е.**, Кислов К.В. Информационные свойства частотных характеристик динамической системы резания при диагностике износа инструментов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 3. – С. 114-134.
13. Заковоротный, В. Л., **Гвинджилия, В. Е.** Системно-синергетический анализ и синтез управляемого процесса резания // Научные исследования в машиностроении. – 2024. – № 9(159). – С. 3-13.
14. Заковоротный В. Л., **Гвинджилия В. Е.**, Кислов К. В., Веремеев Д. Н. Влияние деформаций инструмента и заготовки в направлении скорости резания на динамику обработки // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2023. – № 8(761). – С. 51-67.
15. Заковоротный, В. Л., **Гвинджилия, В. Е.** Связь притягивающих множеств деформаций инструмента с пространственной ориентацией упругости и регенерацией сил резания при точении // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2022. – Т. 30, № 1. – С. 37-56.
16. Заковоротный, В. Л., **Гвинджилия, В. Е.** Свойства притягивающих множеств деформационных смещений инструмента в траекториях формирующих движений при точении изделий // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 3(744). – С. 15-30.
17. Заковоротный, В. Л., **Гвинджилия, В. Е.** Влияние процесса резания на динамические свойства приводов исполнительных элементов станка / В. Л. Заковоротный, М. А. Фесенко, **В. Е. Гвинджилия** // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 9(750). – С. 16-29.
18. Заковоротный, В. Л., **Гвинджилия, В. Е.** Использование синергетической концепции при определении программы ЧПУ при токарной обработке / В. Л. Заковоротный, В. Е. Гвинджилия, Э. О. Фесенко // Обра-

- ботка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 98-112.
19. Zakovorotny, V. L., **Gvindjiliya V. E.** Process control synergetics for metal-cutting machines / V. L. Zakovorotny, V. E. Gvindjiliya // Journal of Vibroengineering. – 2022. – Vol. 24, No. 1. – P. 177-189.
 20. Заковоротный, В. Л., **Гвинджилия, В. Е.** Синергетическая концепция при программном управлении процессами обработки на металлорежущих станках / В. Л. Заковоротный, В. Е. Гвинджилия // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2021. – № 5(734). – С. 24-36.
 21. Заковоротный, В. Л., **Гвинджилия, В. Е.** Определение оптимальных координат переключения циклов обработки на металлорежущих станках // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 56-67.
 22. Заковоротный, В. Л., **Гвинджилия, В. Е.** Синергетический подход к повышению эффективности управления процессами обработки на металлорежущих станках // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 84-99.
 23. Zakovorotnyi, V. L., **Gvindjiliya V. E.** Dynamics of Tool Deformation in the Cutting System // Russian Engineering Research. – 2021. – Vol. 41, No. 3. – P. 246-251.
 24. Zakovorotny V. L., **Gvindjiliya V. E.** Self-organization and evolution in dynamic friction systems // Journal of Vibroengineering. – 2021. – Vol. 23, No. 6. – P. 1418-1432.
 25. Заковоротный В. Л., **Гвинджилия В. Е.**, Закалюжный А. А. Влияние жесткости механической части привода и параметров резания на управление упругими деформациями формообразования // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 154-162.
 26. Заковоротный, В. Л., **Гвинджилия В. Е.** Связь самоорганизации динамической системы резания с изнашиванием инструмента // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2020. – Т. 28, № 1. – С. 46-61.
 27. Заковоротный, В. Л., **Гвинджилия В. Е.** Влияние динамики резания на выбор технологических режимов, обеспечивающих минимальное изнашивание режущих инструментов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 54-70.

28. Заковоротный, В. Л., **Гвинджилия В. Е.**, Лапшин В.П. Деформационная динамика инструмента в процессе эволюции системы резания // СТИН. – 2020. – № 12. – С. 7-12.
29. Заковоротный, В. Л., **Гвинджилия В. Е.**, Сидоренко М. А. Динамика приводов подачи, вращения инструмента и заготовки, взаимодействующих с процессом резания, при сверлении // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2019. – № 1(201). – С. 57-65.
30. Заковоротный, В. Л. , **Гвинджилия В. Е.**, Колодкин П. С. Влияние динамических свойств взаимодействующих подсистем на эволюцию формирования избирательного переноса в узлах трения // Вестник Донского государственного технического университета. – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 104-112.
31. Заковоротный, В. Л., **Гвинджилия В. Е.** Влияние вибраций на траектории формообразующих движений инструмента при точении // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 42-58.
32. Заковоротный, В. Л., **Гвинджилия В. Е.** Зависимость изнашивания инструмента и параметров качества формируемой резанием поверхности от динамических характеристик // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 4. – С. 31-46.
33. Zakovorotny, V. L., **Gvindjiliya V. E.** Evolution of the Dynamic Cutting System with Irreversible Energy Transformation in the Machining Zone // Russian Engineering Research. – 2019. – Vol. 39, No. 5. – P. 423-430.
34. Заковоротный, В. Л., **Гвинджилия В. Е.** Синергетический подход к управлению процессом обработки на станках токарной группы // Научные технологии в машиностроении. – 2019. – № 11(101). – С. 29-38.
35. **Гвинджилия, В. Е.** Перестройка динамической системы резания в процессе эволюции. Проблемы математического моделирования // Молодой исследователь Дона. – 2018. – № 5(14). – С. 9-18.
36. Заковоротный, В. Л., **Гвинджилия В. Е.** Улучшение динамического качества процесса точения на основе согласования его динамических параметров с геометрией инструмента // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2018. – № 4(200). – С. 61-71.
37. Заковоротный, В. Л., **Гвинджилия В. Е.** Бифуркации притягивающих множеств деформационных смещений режущего инструмента в ходе

- эволюции свойств процесса обработки // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2018. – Т. 26, № 5. – С. 20-38.
38. Заковоротный, В. Л., **Гвинджилия В. Е.**, Минаков В. С. Влияние геометрии режущего инструмента на динамику процесса точения // Вестник Донского государственного технического университета. – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 201-213.
 39. Zakovorotny, V. L., **Gvindzhiliya V. E.** Influence of Spindle Wobble in Turning on the Workpiece's Surface Topology // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38, No. 10. – P. 818-823.
 40. Zakovorotny, V. L., **Gvindzhiliya V. E.** Influence of Spindle Wobble in a Lathe on the Tool's Deformational-Displacement Trajectory // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38, No. 8. – P. 623-631.
 41. Zakovorotnyi, V. L., **Gvindzhiliya V. E.** Dynamic Influence of Spindle Wobble in a Lathe on the Workpiece Geometry // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38, No. 9. – P. 723-725.
 42. Заковоротный, В. Л., **Гвинджилия В. Е.** Влияние флуктуаций на устойчивость формообразующих траекторий при точении // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2017. – № 2(194). – С. 52-61.
 43. Заковоротный, В. Л., **Гвинджилия В. Е.** Бифуркации притягивающих множеств деформационных смещений режущего инструмента в зависимости от биений шпиндельной группы // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2017. – Т. 25, № 6. – С. 38-56.
 44. Заковоротный, В. Л., **Гвинджилия В. Е.** Влияние погрешности движения исполнительных элементов токарного станка на траектории формообразующих движений // Вестник Донского государственного технического университета. – 2017. – Т. 17, № 1(88). – С. 35-46.
 45. Заковоротный, В. Л., **Гвинджилия В. Е.** Влияние биений шпиндельной группы на притягивающие множества деформационных смещений инструмента при точении // Вестник Донского государственного технического университета. – 2017. – Т. 17, № 4(91). – С. 22-33.
 46. Заковоротный, В. Л., **Гвинджилия В. Е.** Влияние кинематических возмущений в направлении продольной подачи на траектории формообразующих движений // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2016. – № 4(192). – С. 67-76.