

Ю.Г. КАБАЛДИН, Д.А. ШАТАГИН, П.В. КОЛЧИН

**УПРАВЛЕНИЕ КИБЕРФИЗИЧЕСКИМИ
МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩИМИ СИСТЕМАМИ
В ЦИФРОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ
НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА
И ОБЛАЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**МОСКВА
Инновационное машиностроение
2019**

УДК 621.9+004.9
ББК 34.63:32.97
К12

Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Колчин П.В.

К12 Управление киберфизическими и механообрабатывающими системами в цифровом производстве на основе искусственного интеллекта и облачных технологий / под ред. Ю.Г. Кабалдина. – М.: Инновационное машиностроение. 2019. – 293 с.
ISBN 978-5-907104-17-4

Освещены основные положения нелинейной динамики, типы и способы обучения искусственных нейронных сетей (ИНС), а также технологии их глубокого обучения. Предложены методы оценки устойчивости упругой системы станка по ее чувствительности к изменению входных данных и фрактальной размерности аттракторов, методы оптимизации динамической устойчивости станков с ЧПУ как киберфизических систем (КФС) и управления процессами механообработки на основе ИНС, нелинейной динамики и облачных технологий (двойников оборудования) в условиях цифрового производства. Предложена единая платформа расширения функциональных возможностей систем ЧПУ станочного оборудования на базе интегрирования в них модулей высокопроизводительных параллельных вычислений и глубокого обучения ИНС с использованием технологий nVidia CUDA, что обеспечивает возможность масштабирования на базе графических процессоров (GPU). Представлены интеллектуальная система диагностики динамической устойчивости процесса резания и программный модуль для оптимизации управляющей программы станков с ЧПУ на основе подходов нелинейной динамики и ИНС. Рассмотрены особенности взаимодействия искусственного интеллекта и технологии "блокчейн" при управлении группой КФС. Представлена интеллектуальная гибридная технология 3D-печати деталей на станках с ЧПУ. Рассмотрено модульное проектирование интеллектуальных КФС. Освещены вопросы организации механообрабатывающего цифрового производства и управления им.

Для специалистов в области механообработки материалов.

**УДК 621.9+004.9
ББК 34.63:32.97**

ISBN 978-5-907104-17-4 © ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 2019

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, опубликованных в данной книге, допускаются только с разрешения издательства и со ссылкой на источник информации.

Оглавление

Предисловие	6
Глава 1. Процесс резания металлов как результат больших пластических деформаций и разрушения срезаемого слоя	16
1.1. Механизмы пластических деформаций и стружкообразование при резании	16
1.2. Влияние свойств обрабатываемого материала на стружкообразование	29
1.3. Динамические процессы при резании	42
1.3.1. Механизмы возникновения автоколебаний при резании	42
1.3.2. Влияние геометрии инструмента и режимов резания на автоколебания при резании	58
1.4. Хаотическая динамика в технологических системах обработки резанием	63
Глава 2. Искусственные нейронные сети	72
2.1. Устройство нейронных сетей	72
2.2. Типы архитектур нейронных сетей	74
2.3. Способы обучения нейронных сетей. Обучение "с учителем"	75
2.4. Самообучающиеся нейронные сети. Обучение "без учителя"	78
2.5. Сверточные нейронные сети и глубокое обучение ИНС	82
Глава 3. Основные положения нелинейной динамики, фрактальный анализ аттракторов технологических систем	85
3.1. Базовые понятия и определения нелинейной динамики	85
3.1.1. Качественная теория динамических систем	85
3.1.2. Классификация динамических систем	87
3.1.3. Аттракторы динамических систем	90
3.1.4. Количественные характеристики устойчивости динамических систем	91
3.2. Разработка методики моделирования процессов механообработки по временным рядам	94
3.2.1. Экспериментальная установка по снятию и оцифровке сигналов	96
3.2.2. Предварительная обработка сигналов	100
3.2.3. Реконструкция аттрактора динамической системы методом задержек	101

3.2.4. Моделирование динамической системы путем построения эволюционных уравнений движения	105
3.3. Программная реализация разработанной методики моделирования	107
3.3.1. Реализация разработанной методики в виде программного комплекса	107
3.3.2. Поиск коэффициентов уравнений методом наименьших квадратов	108
3.3.3. Особенности программной реализации методики моделирования динамической системы	110
3.4. Фрактальный анализ и локальное исследование хаотичности аттракторов динамических систем	111
3.4.1. Фрактальное кодирование аттрактора	111
3.4.2. Описание алгоритма фрактального кодирования	115
3.4.3. Программная реализация алгоритма фрактального кодирования	116
3.5. Исследование локальной хаотичности аттрактора	120
3.6. Программная реализация алгоритма определения погрешности самоподобия	121
Глава 4. Управление динамическими процессами в киберфизических системах при резании на основе нелинейной динамики, искусственного интеллекта и облачных технологий	124
4.1. Разработка методики исследования устойчивости моделируемого процесса	124
4.2. Исследование динамической системы станка при резании	126
4.3. Исследование динамики упругой системы станка в зависимости от износа инструмента	126
4.4. Определение сценария развития хаотичности	131
4.5. Разработка метода оценки устойчивости упругой системы станка по чувствительности к изменению входных данных	136
4.6. Оптимизация динамических свойств упругой системы станка на основе алгоритмов нелинейной динамики	139
4.7. Применение искусственных нейронных сетей в моделировании процессов механической обработки	147
4.7.1. Синтез диагностических моделей процесса резания на базе нейронных сетей встречного распространения	147
4.7.2. Нейросетевые модели при управлении динамическими процессами в технологических системах	156
4.8. Оценка состояния режущего инструмента на основе технологии высокопроизводительных вычислений nVidia CUDA в программной среде LABVIEW	164

4.9. Интеллектуальная система анализа и прогнозирования динамической устойчивости процесса резания с использованием технологии параллельных вычислений nVidia CUDA и облачных технологий	172
Глава 5. Управление киберфизическими системами при высокоскоростной механообработке на основе искусственного интеллекта и нелинейной динамики	176
5.1. Основные проблемы при реализации высокоскоростной обработки деталей	176
5.2. Оптимизация траектории движения инструмента на станках с ЧПУ на основе методов нелинейной динамики	180
5.3. Динамический паспорт станка для операций высокоскоростной обработки	196
5.3.1. Высокоскоростное фрезерование	196
5.3.2. Высокоскоростное точение	201
5.4. Расширение возможностей САМ-системы NX с помощью клеточных нейронных сетей и алгоритмов нелинейной динамики	205
Глава 6. Управление аддитивными технологиями с использованием искусственного интеллекта и облачных технологий на станках с ЧПУ	219
6.1. Аддитивные технологии в машиностроении	219
6.1.1. Аддитивное производство: технологии и материалы	220
6.1.2. Оборудование и материалы при 3D-печати	222
6.2. Интеллектуальная система 3D-печати деталей на станках с ЧПУ	225
6.3. Квантово-механическое моделирование влияния примесей на прочность границ зерен и пластичность алюминия	234
Глава 7. Проектирование механообрабатывающего оборудования как киберфизических систем и организация обработки деталей в условиях цифрового производства	241
7.1. Модульное проектирование станочного оборудования как киберфизических систем на основе искусственного интеллекта и облачных технологий	241
7.2. Организация производства и логистика при изготовлении деталей в механообрабатывающих цехах в условиях цифровых технологий	262
7.3. Управление цифровым механообрабатывающим производством	270
Заключение	277
Список литературы	288

Предисловие

Правительством Российской Федерации принята концепция "Индустрия 4.0" в целях построения цифровой экономики России. Это обуславливает необходимость изменения подхода к организации деятельности и управлению технологическим оборудованием отечественных промышленных предприятий. Однако оцифровывание производств в нашей стране пока еще не является общенациональным трендом и реализуется крайне медленно.

Одним из недостатков существующей организации предприятий, сдерживающих реализацию цифровых технологий, является отсутствие единой концепции использования систем управления технологического оборудования вследствие их узкой ориентации на конкретный вид оборудования. При этом не учитывается значительный прогресс в области разработки программного и аппаратного обеспечения систем ЧПУ, позволяющий пользователю расширять возможности систем.

В настоящее время совершенствование систем ЧПУ в области механообработки, как и любых других продуктов в IT-сфере, идет стремительными темпами. Основными тенденциями развития систем ЧПУ являются:

- полная совместимость с предыдущими "эволюциями" (для запуска ранее наработанных программ);

- упор на разработку и совершенствование программного обеспечения (и расширение функционала существующих систем ЧПУ);

- открытость систем — для производителей станочного оборудования, что означает широкие возможности для самостоятельной доработки;

- многоканальность — для реализации одновременного запуска нескольких управляющих программ на одной системе ЧПУ;

- поддержка алгоритмов высокоскоростной обработки.

Практически все современные системы ЧПУ поддерживают интерполяцию с малой дискретностью вычислений ("наноинтерполяцию") и алгоритмы "предпросмотра", т. е. возможность просчитывать траекторию инструмента и заранее снижать скорость обработки перед ее резкими изменениями (что особенно актуально для обработки на больших скоростях).

Перспективные системы ЧПУ строятся также в расчете на удаленное (сетевое) управление, в том числе при объединении отдельных станков в группы — в рамках технологической цепочки производства изделий. Большое внимание уделяется функциям моделирования процесса обработки, когда система не просто визуализирует на экране маршрут движения инструмента, а представляет модель фактического результата обработки.

К системам ЧПУ также предъявляются требования расширенной диагностики оборудования и возможности "понимания" языков программирования высокого уровня. Кроме того, современные системы все более унифицируются в рамках принятых стандартов. В то же время производители стремятся выпускать на рынок системные продукты (а не отдельные разрозненные компоненты), позволяющие решать "под ключ" комплексные технологические задачи.

Однако производители нового оборудования различного назначения вынуждены применять известные системы ЧПУ, которые не в полной мере способны решать задачи управления в конкретных условиях. Они не отвечают требованиям цифровых производств и организации "умных" цехов и предприятий в целом. Кроме того, для цифровых производств механообрабатывающее оборудование необходимо проектировать как киберфизические системы. К сожалению, в настоящее время опыт в этом направлении отсутствует.

Проблема существенно усложняется еще и тем, что необходимо найти такое решение вопроса, которое подходило бы как для вновь проектируемых, так и для уже успешно работающих систем управления технологического оборудования (металлорежущих станков, оборудования аддитивных технологий, промышленных роботов и т. д.)

Таким образом, в настоящее время отсутствует единая базовая управляющая платформа, на основе которой разрабатывалось бы новое поколение систем управления технологическим оборудованием для цифровых производств. Такие платформы должны обладать большими вычислительными ресурсами и высоким быстродействием обработки большой базы данных. Это позволит существенно сократить расходы на разработку и эксплуатацию технологического оборудования и обеспечить его вхождение в единое информационное пространство предприятия. Отсутствие базовой

платформы управления технологическим оборудованием сдерживает также и разработку новых высокопроизводительных методов изготовления деталей (высокоскоростная обработка, аддитивные технологии, гибридные технологии обработки и т. д.) и в целом рост эффективности цифровых производств. Создание единой платформы управления оборудованием позволит решить и другую важную задачу – обеспечить технологическую безопасность нашей страны в целом, так как в настоящее время большинство предприятий, в том числе и оборонного комплекса, оснащены импортными оборудованием и системами управления.

Следовательно, формирование нового подхода к управлению оборудованием цифровых производств и разработка базовой унифицированной платформы, создание на ее основе новых и усовершенствование существующих систем управления технологическим оборудованием – актуальная задача цифровых производств. Такой единой платформой могут выступать открытые системы ЧПУ станков с встроенными модулями нейропроцессоров (нейрочипов) и модулями связи с промышленным интернетом, т. е. с возможностью использования облачных технологий обработки больших данных на серверах как предприятий (локальные сети), так и провайдеров. Все это создает основу для интеллектуального управления широкой номенклатурой технологического оборудования, оснащенного системами ЧПУ с расширенными возможностями, применения высокоскоростной обработки, аддитивных технологий и т. д., а также интеграции в оборудование подсистем диагностики, например, износа инструмента. При этом особое внимание следует уделять разработке систем диагностики динамического состояния механообрабатывающего оборудования.

В НГТУ им. Р.Е. Алексеева разработана единая базовая платформа расширения функциональных возможностей различных систем ЧПУ технологического оборудования на базе встраивания в них модулей высокопроизводительных параллельных вычислений и глубокого обучения искусственных нейронных сетей (ИНС) с использованием технологий nVidia CUDA, что обеспечивает возможность масштабирования на базе графических процессоров (GPU).

Искусственный интеллект (ИИ) трактуется сегодня как системы, которые могут понимать, прогнозировать и потенциально способны функционировать без участия человека, т. е. позволяют

создавать уже не "безлюдные", а "умные" производства. Системы (алгоритмы) ИИ могут реагировать на голосовые команды, а также самообучаться и выдавать готовые решения, обеспечивая информационную безопасность. Киберфизическая система (cyber-physical system) – это информационно-технологическая концепция, подразумевающая интеграцию вычислительных ресурсов в физические процессы. Широкое использование в современном станочном оборудовании средств вычислительной техники как киберфизических систем (КФС) позволяет управлять ими на основе фундаментальных подходов к устойчивости сложных систем.

К числу фундаментальных подходов к исследованию сложных систем следует отнести теорию синергетики и разрабатываемые на основе этого междисциплинарного подхода новые направления – нелинейную динамику, теорию бифуркаций и фрактальный анализ. Эти направления составляют основу концепции искусственного интеллекта. Синергетика придала новый смысл понятию динамические системы и ввела новые понятия: динамический хаос, аттракторы и диссипативные структуры.

Большое достоинство нелинейной динамики заключается в том, что она позволяет проводить оценку как регулярного, так и хаотического движения сложной системы. Нелинейная динамика предложила также алгоритмы упрощения. Один из главных таких алгоритмов связан с предположением о масштабной инвариантности на различных уровнях. Простейший пример дают фрактальные множества.

Другой важный алгоритм нелинейной динамики основан на том, что многие сложные системы могут быть описаны с помощью нескольких переменных параметров порядка. Оказалось, что во многих сложных системах, потенциально обладающих бесконечным числом степеней свободы, с течением времени происходит самоорганизация – выделение нескольких параметров порядка, которые являются главными, т. е. определяющими характер движения системы, остальные переменные целиком подчинены параметрам порядка и подстраиваются под них.

Дальнейшее развитие теории синергетики сконцентрировано на разработке алгоритмов нейронных сетей. В основе парадигмы нейронауки как одного из перспективных направлений теории синергетики лежит предположение о согласованном (коллективном)

поведении отдельных нейронов. Первые публикации по управлению технологическими системами с использованием ИНС в нашей стране выполнены одним из авторов данной монографии в начале 2000-х гг.

С тех пор появились новые инструменты IT-технологий, способствующие повышению эффективности технологического оборудования в цифровых производствах: облачные технологии, дополненная реальность, интернет вещей и т. д. Настоящая монография посвящена развитию подходов искусственного интеллекта к управлению механообрабатывающим оборудованием с использованием других IT-технологий, в частности облачных.

Считается, что слияние ИИ и облачных вычислений может стать источником инноваций и драйвером обеих технологий. В частности, "облако" может обеспечить ИИ информацией, а ИИ, в свою очередь, будет заполнять "облако" новыми данными. База данных (БД) в "облаке" может размещаться как на серверах предприятия и использоваться в режиме реального времени, так и на серверах провайдеров в режиме online. В этой связи станки с ЧПУ как КФС получили дальнейшее развитие.

Все возрастающая сложность оборудования и необходимость сокращения времени подготовки управляющих программ (УП) вынуждает разработчиков САМ (computer-aided manufacturing) систем модернизировать устоявшийся процесс. Новый подход заключается в интерактивном использовании станочных данных уже на начальном этапе проектирования операций обработки.

Если сейчас программист взаимодействует с трехмерной моделью станка исключительно во время симуляции обработки, то в будущем он сможет проводить уже виртуальную наладку, например размещать приспособление на столе станка или позиционировать заготовку с использованием дополненной реальности.

Здесь речь идет не о режиме симуляции обработки, а о процессе, влияющем на создаваемые в САМ-системе траектории. При выборе стратегии обработки система будет способна предложить максимально допустимые режимы резания или оценить выбранные, оптимизировать расчеты траектории с учетом кинематики станка (что особенно актуально для пятиосевого фрезерования) и, разумеется, помочь избежать коллизий. Более того, операции трансформации (копирование, поворот, смещение) над

виртуальной деталью приведут к немедленному пересмотру операций обработки.

В этой связи следует особо указать, что происходит движение от исторически сложившейся концепции, при которой программирование в САМ-системах основано лишь на геометрии детали, к концепции, активно использующей кинематическую модель станка при расчете операций обработки. Данные о кинематике и динамике станка будут на начальном этапе вноситься в САМ-систему вручную. Можно предположить, что в дальнейшем, с развитием технологий интернета вещей, необходимая информация будет поступать в САМ-систему напрямую из оборудования по локальной сети или черпаться из облачной БД.

Одним из наиболее перспективных аспектов применения базы ("облака") данных является платформа Machining Cloud, которая обеспечивает автоматизацию подбора инструмента и режимов резания непосредственно из САМ-системы и передает параметры распознанных конструктивных элементов 3D-модели обрабатываемой детали в "облако", а обратно получает список инструментов и рекомендованные значения параметров режимов обработки. Причем нужно отметить, что импортированные инструменты не только служат для последующего расчета траекторий и верификации, но и снабжены каталожными номерами, что значительно облегчает работу технолога, отвечающего за выбор и приобретение инструмента, необходимого для выполнения текущего производственного задания.

Платформа Machining Cloud обеспечивает также доступ к обширным производственным данным в "облаке", в первую очередь к данным о режущем инструменте и оснастке. При этом ключевая ценность для пользователей состоит в том, что ответственность за наполнение актуальными данными ложится на самого производителя, а не на разработчика САМ-системы или сторонние компании, занимающиеся наполнением и "переводом" баз данных. Для реализации такой концепции необходимо решить две непростые задачи: во-первых, договориться с производителями о регулярной работе по наполнению "облака" данными о своей продукции, а во-вторых, создать набор приложений для доступа к "облаку" из различных операционных систем.

Интеллектуальность САМ-системы выражается не столько в способности автоматически генерировать траектории, сколько

в интерактивной помощи при традиционном способе создания операций обработки. Одной из самых необходимых "умных" функций САМ-системы можно считать дообработку, когда система распознает необработанные участки (в углах контура), оставшиеся от проходов фрезы большего диаметра, и генерирует траекторию для инструмента меньшего диаметра, удаляющего оставшийся материал, но без повторных или холостых проходов. Функция дообработки постепенно прошла путь от отдельной команды до неотъемлемой части платформы САМ-системы, позволяющей "видеть" состояние заготовки после каждой (любой) операции обработки.

Появившиеся смартфоны, планшеты и компьютеры с сенсорными дисплеями приобрели большую популярность и востребованность на современном производстве, что стимулировало распространение идеи интернета вещей. В этой связи предпринимаются попытки адаптировать процесс работы в САД- и САМ-системах к мобильным электронным устройствам. Все это наглядно демонстрирует прогресс в развитии тач-интерфейсов. Оказывается, что достаточно удобно создавать 3D-модели или разрабатывать управляющую программу (УП) не только на компьютере.

Следует отметить, что развитие систем ЧПУ неотделимо от повышения квалификации персонала – программистов, операторов станков, наладчиков. Однако до сих пор совершенствование систем ЧПУ значительно опережало возможность их использовать – особенно в новейших технологических областях (например, при применении высокоскоростной обработки, аддитивных технологий, гибридных методов обработки и т. д.). Поэтому вопросы раскрытия возможностей перспективных систем ЧПУ, расширения их функциональных возможностей, управления на основе подходов искусственного интеллекта, обучения новым методам их использования непременно должны выдвигаться на первый план.

Использование ИИ и облачных технологий при модульном проектировании станочного оборудования позволяет компоновать его как КФС, предназначенные для цифровых производств.

Необходимо отдельно отметить систему управления таким сложным и постоянно перестраивающимся производством, как цифровое. В цифровом пространстве должен быть сформирован точный виртуальный образ производства (двойник). Система должна знать все о ресурсах, оборудовании и его расположении в данное конкретное время, планировании, номенклатуре изделий

и технологиях их изготовления, потребностях рынка и внутренних потребностях, чтобы, основываясь на данной информации, выполнять текущие задания и планировать будущее.

Что касается материальной части рассматриваемых систем – это огромные вычислительные мощности самих производств с отдельными серверами. Для работы с большими данными необходимо использовать облачные технологии, где вычислительные мощности выведены за пределы предприятия и управление осуществляется удаленно. Не исключено сочетание вычислительных мощностей предприятия и "облака". Все это необходимо для управления большими данными, на которые возлагаются отдельные ожидания в "Индустрии 4.0". Уже сейчас разработаны программные продукты, которые упрощают функционирование предприятий в цифровом производстве:

управление основными данными, управление мастер-данными (Master Data Management, MDM) – совокупность процессов и инструментов для постоянного определения основных данных компании (в том числе справочных) и управления ими;

CALS-технологии (Continuous Acquisition and Lifecycle Support, непрерывная информационная поддержка поставок и жизненного цикла изделий), или ИПИ (информационная поддержка процессов жизненного цикла изделий) – подход к проектированию и производству высокотехнологичной и наукоемкой продукции, заключающийся в использовании компьютерной техники и информационных технологий на всех стадиях жизненного цикла изделия;

PDM-система (Product Data Management – управление данными об изделии) – организационно-техническая система, обеспечивающая управление всей информацией об изделии. При этом в качестве изделий могут рассматриваться различные сложные технические объекты (корабли и автомобили, самолеты и ракеты, компьютерные сети и др.);

ERP (Enterprise Resource Planning – планирование ресурсов предприятия) – организационная стратегия интеграции производства и операций, управления трудовыми ресурсами, финансового менеджмента и управления активами, ориентированная на непрерывную балансировку и оптимизацию ресурсов предприятия с помощью специализированного интегрированного пакета прикладного программного обеспечения, формирующего общую модель данных и процессов для всех сфер деятельности.

Все перечисленные и многие другие пакеты, отвечающие за стабильную работу производства, должны быть объединены на одной платформе для упрощенного и безошибочного обмена данными. Помимо их объединения должен быть минимизирован, а по возможности полностью запрещен вариант ручного ввода данных в систему для исключения человеческого фактора, производство должно быть саморегулируемым. Для этого во главе всей цифровой системы должен встать искусственный интеллект с заложенной программой самообучения для непрерывного совершенствования производственного процесса и оптимизации обработки данных.

Дальнейшее развитие цифрового механообрабатывающего производства связано с разработкой и составлением технологии обработки, которые в настоящее время осуществляет человек. Это продлится до тех пор, пока ИИ не научатся работать в САМ-системах, напрямую взаимодействующих с PDM-системой и производством.

В гл. 1 монографии представлены основные положения теории резания материалов. Процесс резания рассматривается как результат больших пластических деформаций в срезаемом слое и сопровождается вибрациями и потерей устойчивости упругой системы станка. Рассмотрены динамика процесса резания и влияние режимов резания и геометрии инструмента на автоколебания.

В гл. 2 приведены классификация нейронных сетей, их архитектура. Рассмотрена концепция глубокого обучения ИНС с использованием высокопроизводительных вычислений на платформе nVidia CUDA.

В гл. 3 рассмотрены основные понятия и определения нелинейной динамики, моделирование динамической системы путем построения эволюционных уравнений движения и фрактальный анализ аттракторов динамических систем.

В гл. 4 рассмотрены методы оценки устойчивости технологических систем и управление динамическими процессами при резании на основе нелинейной динамики, фрактального анализа, искусственного интеллекта и облачных технологий.

В гл. 5 приведены результаты исследований высокоскоростной обработки (фрезерования и точения) и оптимизации динамических процессов с использованием нейронных сетей и алгоритмов нелинейной динамики.