
**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

УДК 681.51

**АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
АБРАЗИВНОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ
ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

© 2025 г. А. Н. Смоленцев

*Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия
e-mail: alexeism1@rambler.ru*

Поступила в редакцию 17.09.2024 г.

После доработки 09.02.2025 г.

Принята к публикации 20.02.2025 г.

За последние десятилетия было предложено достаточно много технических решений в области автоматизации финишной абразивной обработки лопаток газотурбинных двигателей с использованием программно-управляемых манипуляторов. В статье проведен анализ преимуществ и недостатков этих решений, а также возможностей повышения точности и производительности обработки с учетом современного технологического уровня.

Ключевые слова: промышленный робот, робототехнический комплекс, механизм относительного манипулирования, мехатронный модуль, уравнения динамики, калибровка, манипулятор параллельной структуры

DOI: 10.31857/S0235711925030145, EDN: GNTKDV

Финишная обработка сложных поверхностей вращающимся инструментом состоит в перемещении режущей поверхности инструмента, контактирующей с заданной обрабатываемой поверхностью детали. При этом требуется обеспечить не только касание поверхностей в точке, с которой связана система координат режущей кромки, но и обеспечить требуемые контактные условия (ширину обрабатываемой полосы в пределах допуска). Поэтому требуется не менее пяти степеней подвижности для перемещения режущей поверхности инструмента относительно обрабатываемой детали. Траектория, по которой режущая кромка перемещается по обрабатываемой поверхности, должна быть равномерно распределена на ней в соответствии с заданной схемой обработки (спираль, звезда, строчные траектории).

Такие траектории требуют частой смены направления движения инструмента относительно детали, угловых и линейных ускорений в связи с изменениями параметров кривизны обрабатываемой области. Одни участки обрабатываемой поверхности могут мешать доступу инструмента к другим участкам, что приводит к необходимости максимально увеличить углы сервиса в соответствии с особенностями формы типовых изделий — поверхности проточной части лопаток газотурбинных двигателей (ГТД), крыльчаток, фасок сложной конфигурации.

Режущая поверхность — это поверхность, которая ограничивает область, образуемую вращением режущего инструмента (поверхность вращения). Положение оси поверхности вращения (рис. 1) определяется тремя линейными координатами ${}^d\mathbf{r}_u = (r_x, r_y, r_z)^T$,

а ориентация оси — двумя углами, например ${}^d\alpha_u$, ${}^d\beta_u$, определяющих ее единичный вектор e_u , направленный вдоль оси [1].

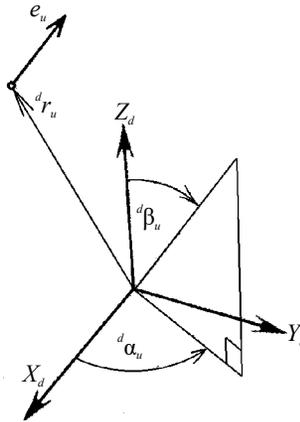


Рис. 1. Ось e_u инструмента в системе координат детали (X_d , Y_d , Z_d).

Поэтому наиболее универсальное устройство для финишной обработки сложных поверхностей таким инструментом должно иметь достаточные диапазоны координат и максимально возможное множество e_u . Наибольшее возможное множество e_u — это когда множество этих векторов образует сферу единичного радиуса. Это соответствует диапазонам углов $0 \leq {}^d\alpha_u < 360^\circ$ и $0 \leq {}^d\beta_u \leq 180^\circ$. Получить полный требуемый диапазон углов ${}^d\beta_u$ не представляется возможным из-за ограничений, связанных с взаимным пересечением корпуса электрошпинделя (ЭШ) инструмента и устройством зажима обрабатываемой детали. Поэтому практически возможно получить $30^\circ \leq {}^d\beta_u \leq 180^\circ$, что соответствует множеству e_u в виде сферы без конического сегмента.

Робототехнические комплексы и механизмы относительного манипулирования. Наибольшие углы сервиса обеспечивает манипулятор промышленного робота (ПР) (рис. 2), входящий в состав робототехнического комплекса (РТК). Точность позиционирования робота недостаточна, поэтому приходится применять систему контроля геометрии пера лопатки, чтобы организовать управляемый сьем заданного слоя материала. Обработка прикомлевого участка на РТК проблематична. Рабочая зона ПР позволяет применять несколько видов инструмента (круги, фреза, ленточно-полировальная установка).

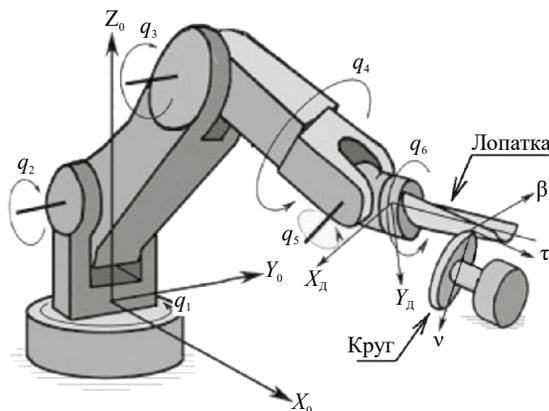


Рис. 2. Манипулятор ПР, кинематика и координаты в кинематических парах.

Для достижения точности каким-либо инструментом необходима настройка на его локальную зону обработки. Для захвата приспособления-спутника с заготовкой лопатки требуются дополнительное захватное устройство, а также система базирования.

Практический опыт [2] показал, что помимо предварительной разработки управляющих программ половина времени уходит в таких РТК на доводку программ на рабочем месте, для новой лопатки это занимает не менее недели. Тем не менее для абразивной обработки спинки и корыта пера лопатки РТК находят применение вместе с соответствующими системами контроля. Для организации программного взаимодействия с центральным ПК и системой контроля желательна применение роботов отечественного производства, это облегчает обмен информацией с изготовителем. Далее отмечены отечественные производители роботов, указывающие их точностные параметры или способы повышения точности позиционирования.

В НТЦ АРКОДИМ, г. Казань, разрабатывают и внедряют отечественное программное обеспечение для промышленных роботов собственного производства. Изготавливают внутреннюю логику работы промышленного робота и приложение для управления этим роботом с ПК. Логика работы робота пишется для специальных контроллеров НСФА (Китай) на языках ST и LD в среде разработки Codesys. Проводят также синхронизацию с автоматизированным оборудованием. Предлагается прототип ПР с силомоментной обратной связью, что актуально в РТК. Усилия оцениваются по информации датчиков положения на входе и выходе редукторов и по моделям их жесткости. Это перспективно для организации управляемого съема материала при шлифовании и повышения точности.

В ООО «Роботех», г. Пермь, проектируют, внедряют и обслуживают РТК на базе ПР собственного производства и роботов ведущих производителей. Работают по всей России на основе технического задания, которое дорабатывается совместно с заказчиком.

Пример ПР: робот 6-осевой $rx-5$, максимальная досягаемость до 913 мм, максимальная общая нагрузка до 10 кг, номинальная полезная нагрузка до 5 кг, повторяемость позиционирования ± 0.05 мм.

Для улучшения динамики начиная с 1990-х гг. применяют механизмы относительного манипулирования (МОМ) (рис. 3).

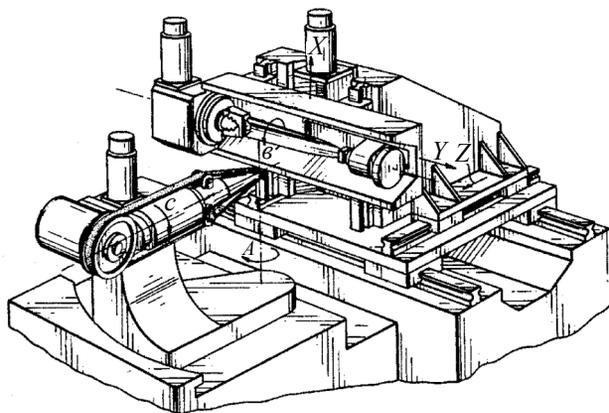


Рис. 3.

На рис. 3 показан шестикоординатный станок [3] для полирования лопаток абразивной лентой, перемещающейся вокруг переднего ролика, на который действует сила резания. Поскольку лопатка ГТД может быть нежесткой деталью, заготовка

зажата со стороны хвостовика, а с другой стороны поддерживается. Манипулятор перемещения обрабатываемой заготовки содержит три линейных степени подвижности (X , Y , Z) и одну угловую (B), манипулятор перемещения привода инструмента содержит две угловых степени подвижности (A , C), вместе образуют МОМ. Система управления учитывает и компенсирует износ ленты (изменение толщины).

Идея получила развитие, например в станках [4] (рис. 4), где применяется захват заготовки с обеих сторон.

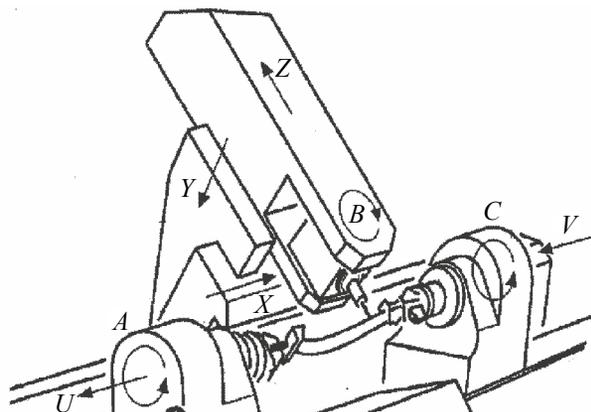


Рис. 4.

С каждой стороны осуществляется управляемое перемещение, поэтому число степеней подвижности может достигать до восьми. Такие станки применяют для чистового фрезерования нежестких крупногабаритных лопаток. Были предложения применять похожую кинематику и для абразивной обработки (шестикоординатный станок [5] для шлифования лопаток паровых турбин абразивной лентой). Другие разновидности лопаток можно обработать с креплением только за замок. Например, шестикоординатный станок [6] для полирования лопаток абразивной лентой, перемещающейся вокруг переднего ролика. Манипулятор перемещения обрабатываемой заготовки содержит две линейных степени подвижности и три угловых, манипулятор перемещения инструмента содержит три независимых линейных вертикальных (для двух видов ленты и датчика). Диапазон лопаток, которые обрабатываются при закреплении только с одной стороны, можно увеличить благодаря использованию демпферов [7].

В то же время для дальнейшего улучшения динамических свойств было предложено перенести привод на основание, например применить в МОМ плоский пятизвенный механизм [8]. Идея была реализована в дальнейшем [9], в одном из манипуляторов МОМ (рис. 5) был применен плоский пятизвенный механизм, конструкция имела следующие преимущества: 1) отсутствие люфтов и возможность точного перемещения при малых скоростях за счет применения прямого (безредукторного) привода; 2) была предусмотрена возможность автоматической правки режущего инструмента.

Однако следующие недостатки конструкции препятствовали ее внедрению: 1) большое число геометрических параметров при отсутствии точных базовых поверхностей затрудняло точное определение этих параметров (калибровку); 2) необходимость применения системы разгрузки плоского пятизвенника, в основном от веса двух последующих приводов и корпусных деталей, которые он перемещал; 3) диапазон горизонтальных управляемых перемещений выходного звена пятизвенника уменьшился в три раза относительно заданного конструктивно по двум причинам: спроектированная система разгрузки [10, 11] полностью не разгружала механизм, и контроллеры приводов

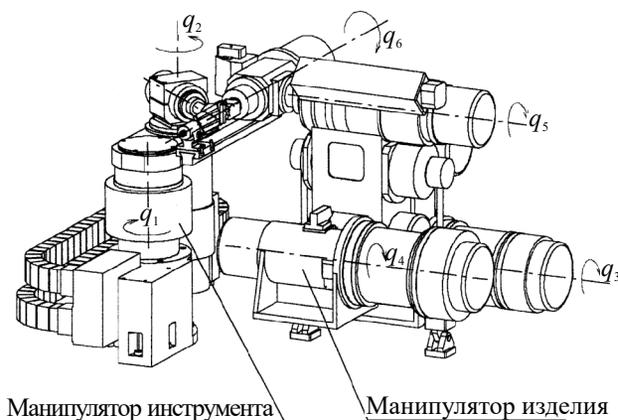


Рис. 5.

фирмы Indramat не обеспечивали номинальный крутящий момент в наиболее мощных двигателях фирмы Etel; 4) небольшая рабочая зона была и по причине конструктивных ограничений, связанных с подводом энергоносителей; 5) необходимость ручной замены заготовки, доступ и обзор зоны обработки был затруднен.

Принимая во внимание недостатки системы разгрузки, было предложено заменить пятизвенник на горизонтальный линейный привод, его кинематическая схема показана на рис. 6.

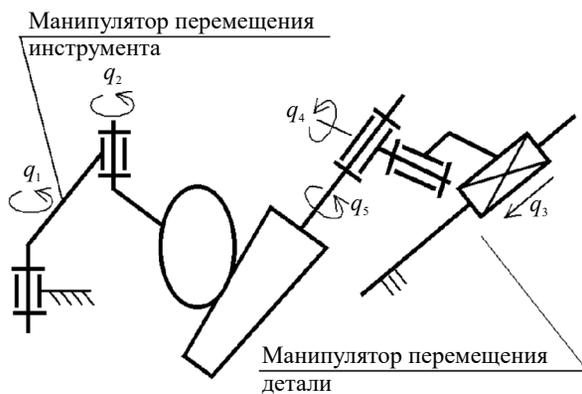


Рис. 6.

Число степеней подвижности в этом случае уменьшается до пяти, но этого достаточно.

Устройство [12] (рис. 6), согласно описанию, входит в комплекс, включающий, как и РТК, оптическую систему контроля и магазин заготовок. Последовательность его работы: 1) захват заготовки из магазина; 2) перемещение заготовки в оптическую систему контроля; 3) измерение геометрических характеристик заготовки лопатки; 4) сравнение измеренной формы с теоретической; 5) вписание допустимой математической моделью поверхности лопатки в измеренную форму заготовки; 6) определение областей заготовки лопатки для полирования; 7) формирование траектории движения инструмента, режимов резания, и управляющей программмы; 8) перемещение заготовки в зону резания; 9) полирование режущим инструментом; 10) возвращение готовой детали в магазин заготовок.

Пункты 6, 7 требуют интеллектуального управления, п. 7 требует предварительного снятия зависимостей удельного съема материала от силы прижатия, подачи и частоты вращения ЭШ, п. 1 требует применения дополнительного манипулятора.

Для использования в аналогичном технологическом комплексе предлагался и вариант конструкции [13], в котором манипулятор инструмента делает поворот ЭШ вокруг вертикальной оси, а манипулятор обрабатываемой заготовки выполняет линейные перемещения и ее поворот вокруг горизонтальной оси. Линейные перемещения обеспечиваются манипулятором параллельной структуры из патента [14] (манипулятор Конга–Гослена).

Кроме того, предусмотрена возможность механических измерений заготовки за счет датчика касания, размещенного с противоположной стороны ЭШ на манипуляторе поворота инструмента. Возможности автоматической замены заготовки и правки инструмента отсутствуют. Преимуществом является малая инерционность манипулятора перемещения детали, однако в нем требуются направляющие; кинематические цепи при реализации могут препятствовать доступу инструмента к прикомлевому участку обрабатываемой лопатки. В механизме реализована кинематическая развязка, но динамические взаимовлияния все равно будут. Возможны также проблемы с калибровкой из-за большого количества неизвестных с достаточной точностью геометрических параметров.

Предлагалась также компоновка со встроенной измерительной системой [15], в которой манипулятор инструмента содержит три линейных привода, манипулятор детали — предпочтительно два угловых привода. Это приблизительно соответствует, например, пятиосевому фрезерному обрабатывающему центру с ЧПУ T745 от фирмы “Базовые машины”, только для операции абразивной обработки. Там тоже есть датчик обмера детали, дополнительно есть Rotation Tool Center Point — контроль кончика инструмента в реальном времени. Устройство достаточно дорогостоящее, с большой инерционностью подвижных звеньев, для достижимости всех поверхностей лопатки кругом в нем нужно повернуть ЭШ на 45°.

Предложения по применению вращательно-линейных модулей. Манипуляторы параллельной структуры, такие как плоский пятизвенный механизм с двумя вращательными приводами или манипулятор Конга–Гослена, позволяют переместить привод на основание и тем самым уменьшить инерцию подвижных звеньев, что создает потенциальную возможность повышения производительности. Однако реализация этой возможности в обрабатывающих центрах связана с существенным усложнением решения задачи обеспечения точности прохода по заданной сложной пространственной траектории. Усложняется объект управления в связи с наличием динамических взаимовлияний, увеличивается число неизвестных геометрических параметров, для уточнения значений которых необходимо решать задачу калибровки. Например, уравнения динамики плоского пятизвенника [16] достаточно сложны, поскольку содержат в себе производные по обобщенным координатам от инерционных коэффициентов.

Напротив, каждое уравнение динамики MOM на основе винтового четырехзвенного механизма выражается в одну строку через обобщенные координаты, их производные и через константы [1].

Вдобавок применение вращательно-линейных мехатронных модулей в MOM сокращает число геометрических параметров, влияющих на точность траектории. Такие модули являются простейшими манипуляторами параллельной структуры и позволяют увеличить максимальные возможные ускорения при воспроизведении траектории. Кроме того, двухстепенные вращательно-линейные движения создают возможность захвата объекта манипулирования с хвостовиком в виде вала, как отмечено в патенте [17]. Это может быть как приспособление — спутник с заготовкой, так и средство

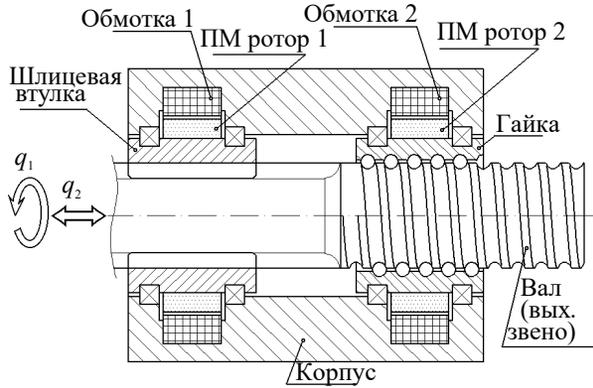


Рис. 7. Винтовой четырехзвенный механизм.

правки инструмента. Конструкция МОМ, которая там приводится, имеет недостаток: ЭШ совершает при повороте вертикальные перемещения, что приводит к неравномерности статической нагрузки. Предпочтительна компоновка (рис. 8) [1], в которой ЭШ при повороте (изменении координаты q_5) перемещается только горизонтально.

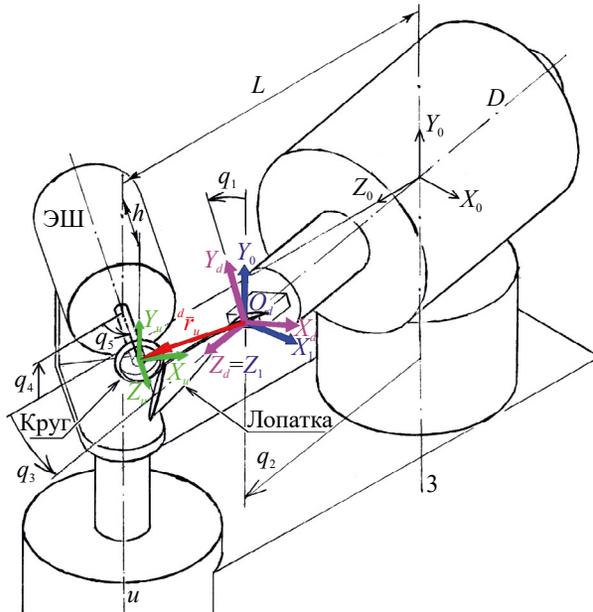


Рис. 8. МОМ на основе вращательно-линейных модулей, вспомогательные системы координат и координаты в кинематических парах, изометрия.

На рисунке, как и в работе [1], $d\alpha_u = -q_1$, а $d\beta_u = q_5 - q_3$, обеспечен их максимальный необходимый диапазон. Диапазон по длине лопатки обеспечивается координатой q_2 .

Структурная формула винтового механизма мехатронного модуля в соответствии с [18]

$$W = 2n - p_5.$$

Чтобы число степеней свободы W было равно 2, практически значимы два решения: 1) число подвижных звеньев $n = 3$ и число кинематических пар $p_5 = 4$ (винтовой

четырёхзвенный механизм) – простейшее решение; 2) $n = 4$ и $p_5 = 6$ (винтовой пятизвенный механизм) – решение с динамической развязкой.

Вид в разрезе МОМ на основе винтового пятизвенного механизма с дополнительной опорой для конца пера лопатки упрощенно показан на рис. 9.

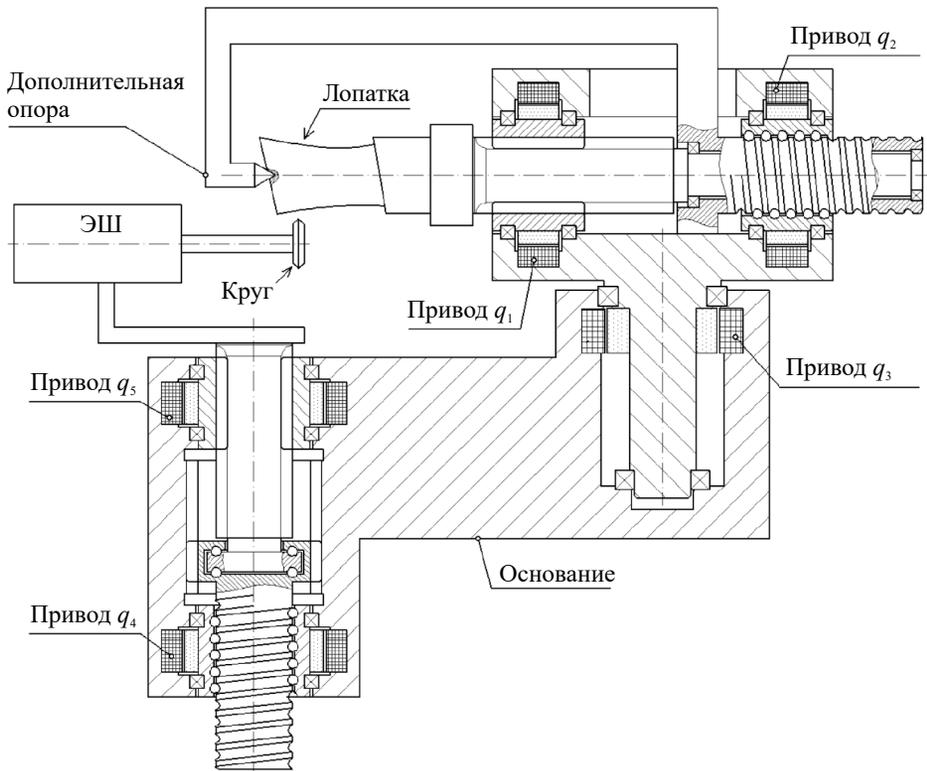


Рис. 9. МОМ на основе винтового пятизвенного механизма.

Проблемы управления и наличия комплектующих. Пятизвенный модуль имеет взаимно независимые крутящие моменты в приводах, но при этом уменьшается жесткость и усложняется настройка точности. Поэтому предпочтительно применение винтового четырехзвенника (рис. 7). Для него проблема взаимовлияния в приводах решается, как и для более сложных манипуляторов [19], использованием решения задачи обратной динамики для разгрузки от сил инерции на основе данных управляющего воздействия.

Следует также учитывать особенности управления синхронным электродвигателем с ротором на основе постоянных магнитов (СДПМ). Как правило, применяют метод подчиненного регулирования с учетом обратной динамики [19], внутренний контур – это контур регулирования крутящего момента. В работе [20] показано, что постоянная времени при управлении крутящим моментом СДПМ невелика. Существует также проблема пульсаций момента по причине неточной математической модели (уравнения Парка–Горева). Наиболее подходящий способ ее решения изложен в диссертации [21]. Автор ставит целью разработать достаточно точную математическую модель, позволяющую вести расчеты в реальном времени за счет целенаправленного формирования величины и формы фазных токов. Это проводится путем предварительного снятия зависимостей электромагнитного момента от угла поворота ротора СДПМ.

Предпочтительно применение шариковинтовой передачи (ШВП) в винтовой кинематической паре (рис. 7), а в шлицевой паре – шлицевой шариковой втулки [22]. Пример конструкции от японской фирмы ТНК показан на рис. 10.

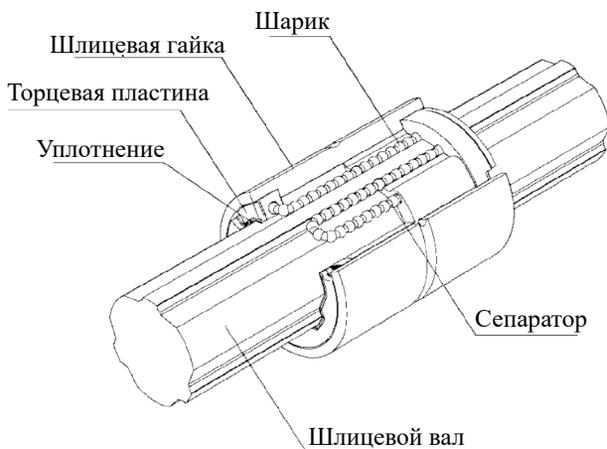


Рис. 10. Шлицевая шариковая втулка.

Однако с точки зрения выбора оптимальных передаточных отношений не всегда возможно изготовить требуемую ШВП, приходится использовать пару винт – гайка скольжения. Производство шлицевых шариковых втулок требуемого качества может быть проблематично. Кроме того, такая кинематическая пара менее жесткая [23] по сравнению с кинематической парой скольжения, это может приводить к вибрациям, хотя и уменьшает силу трения.

При использовании пар скольжения возможно снижение неопределенности силы трения за счет микроуглублений на поверхностях трения [24]. Показано, что эти микроуглубления являются резервуарами для смазки и собирают продукты износа, исключая их из контакта, тем самым предотвращая скачкообразное изменение силы трения (stick-slip movement).

Предпочтительно применение микроуглублений только на одной из поверхностей пары скольжения [25].

Влияние микрорельефа на трение исследуется достаточно давно, например авторское свидетельство [26], где описано устройство для нанесения микрорельефа на поверхность ходового винта. Эти исследования проводятся и в настоящее время [27].

Таким образом, проблема неопределенности силы трения может решаться как созданием микрорельефа, так и выбором оптимальной для этого смазки, затем должна быть проведена идентификация [28, 29] зависимостей силы трения от скоростей скольжения кинематических пар, и эти зависимости должны быть учтены при построении системы управления.

Необходимые комплектующие для изготовления мехатронного модуля (рис. 7) в настоящее время производятся в РФ. Встраиваемые СДПМ с полым ротором выпускает фирма KUBO, ее инженерный центр и производство расположены в Санкт-Петербурге.

Встраиваемые датчики угла (также с полым ротором) изготавливают ОАО СКБ ИС, Санкт-Петербург. ШВП по чертежу или эскизу выпускают, например, ООО “Аверекс”, Москва и PDSU, Подольск. Подшипники для применения в технологических машинах могут изготавливаться организациями “Ленинградский подшипник”,

Санкт-Петербург, и “Подшипник-Волга”, Саратов. Основная проблема состоит в проектировании системы управления, которая должна иметь низкоуровневый доступ к управлению двигателями и информации с датчиков, а также удобство ее программирования.

Выводы. Применение РТК абразивной размерной обработки лопаток ГТД связано с созданием системы интеллектуального управления, включая управление силой прижатия, снятие зависимостей удельного съема материала от режимов резания, алгоритмы для измерительной системы и планирование траектории [30]. Их применение эффективно, когда требования к размерной точности обрабатываемых поверхностей невысокие. Поэтому в настоящее время актуально применение более простой кинематики.

Для лопаток малой и средней величины, имеющих достаточную жесткость, перспективно применение МОМ на основе вращательно-линейных модулей с креплением только за замок. Возможно также использование дополнительной опоры (рис. 9), чтобы обрабатывать лопатки меньшей жесткости. Это потребует добавления к манипулятору перемещения детали дополнительного несложного устройства с цикловым управлением.

Лопатки больших размеров, а также небольшой жесткости обрабатывают с креплением за оба конца (рис. 4), применяется также управляемое растягивающее усилие. Однако для остальных видов лопаток такое оборудование является избыточно сложным и дорогостоящим.

Финансирование. Работа финансировалась за счет средств бюджета института. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смоленцев А. Н. Робототехническая технологическая установка на основе винтового четырехзвенного механизма // Русский инженер. 2023. № 2. С. 38–40.
2. Мубаракшин Р. М., Дическул М. Д., Николаев Н. Н., Травкин А. А., Мубаракшин М. Р. Роботизированная адаптивная размерная полировка компрессорных и турбинных лопаток // Авиационные двигатели. 2021. № 4. С. 51–62.
3. Wormley D., Agranat E. US Patent 5193314, 1993.
4. Killer F., Scherer J. US Patent 7261500, 2007.
5. Shusheng L., Yexi X. CN Patent 101559574A, 2009.
6. Ravelli S. IT Patent 201800007638, 2020.
7. Губанов Г. А., Деев К. А. Применение технологических демпферов при фрезеровании нежестких деталей // Материалы XXVIII научно-технической конференции по аэродинамике. п. Володарского, 20–21 апреля 2017 года. С. 106.
8. Крайнев А. Ф., Афонин В. Л., Глазунов В. А., Ковалев В. Е. РФ. Патент 2063329, 1996.
9. Аксенов В. И., Афонин В. Л., Веденев В. Н., Власенков А. В., Крайнев А. Ф. РФ. Патент 2202465, 2003.
10. Афонин В. Л., Веденев В. Н., Власенков А. В., Елисеев Ю. С., Крюков В. Н., Ляхов Д. М., Семенов Е. Н. РФ. Патент 2377116, 2009.
11. Казаков А. В. Системы статической разгрузки и повышения динамической манипулятивности в механизмах параллельной структуры. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. М.: Моск. гос. технол. ун-т “Станкин”, 2009. 25 с.
12. Афонин В. Л., Раков Д. Л., Смоленцев А. Н., Яковлев М. Г. РФ. Патент 2629419, 2017.
13. Глазунов В. А., Ковалев В. Е., Левин С. В., Сухоруков Р. Ю., Шалюхин К. А. РФ. Патент 2478464, 2013.

14. *Gosselin C., Kong X.* US Patent 6729202, 2004.
15. *Раков Д. Л., Кондратьев И. М., Печейкина М. А.* РФ. Патент 2674358, 2018.
16. *Артоболевский И. И.* Теория механизмов и машин. Гл. 17, § 76. Уравнения движения механизма. М.: Наука, 1988. С. 357.
17. *Смоленцев А. Н.* РФ. Патент 2353502. 2009.
18. *Артоболевский И. И.* Теория механизмов и машин. Гл. 2, § 11. Структура пространственных механизмов. М.: Наука, 1988. С. 50.
19. *Honegger M., Codourey A., Burdet E.* Adaptive Control of the Hexaglide, a 6 dof Parallel Manipulator // Proceedings – IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. 1997. V. 1. P. 543–548. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1997.620093>
20. *Takahashi I., Noguchi T. A.* New quick-response and high efficiency control strategy of an induction machine // IEEE Transactions on Industry Application. 1986. V. 22. № 5. P. 820–827.
21. *Алейников А. В.* Разработка методов снижения пульсаций электромагнитных виброусилий в многофазном магнитоэлектрическом электроприводе: Дис. ... канд. тех. наук. Иваново: Ивановский гос. энерг. ун-т им. В. И. Ленина, 2022.
22. *Teramachi H., Suga K.* US Patent 5993064, 1999.
23. *Xuesong W., Dongsheng Zh. and Zheng Zh.* A review of dynamics design methods for high-speed and high-precision CNC machine tool feed systems. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.03440>
24. *Ibatan T., Uddina M. S., Chowdhury M. A.K.* Recent development on surface texturing in enhancing tribological performance of bearing sliders // Surface & Coatings Technology. 2015. V. 272. P. 102–120.
25. *Wenjun L., Song Zh., Jianghai L., Yuhai X., Jiayang W., Yingli S.* Advancements in accuracy decline mechanisms and accuracy retention approaches of CNC machine tools: a review // The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology. 2022. V. 121. P. 7087. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09720-0>
26. *Сорокин В. М., Крылов И. П., Дементьев В. И., Соломаха Г. А.* СССР. Патент 1701413, 1991.
27. *Славский И. С., Кулаков О. И.* Способы повышения триботехнических свойств упорных подшипников скольжения // В сб.: XXXII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения. 2021. С. 241.
28. *Петраневский И. В., Клюнин А. О., Пыркин А. А.* Идентификация сухого и вязкого трений в сочленениях робота-манипулятора // Материалы XX конференции молодых ученых “Навигация и управление движением”. 2018. С. 324.
29. *Алёшин А. К.* Теоретическое обоснование и разработка методологии определения параметров, обуславливающих функциональные характеристики механизмов: Дис. ... докт. техн. наук. М.: ИМАШ РАН, 2021. 210 с.
30. *Zhu D., Feng X., Xu X., Yang Z., Li W., Yan S., Ding H.* Robotic grinding of complex components: A step towards efficient and intelligent machining—challenges, solutions, and applications // Robotics and Computer Integrated Manufacturing. 2020. V. 65. P. 101908. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101908>