

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.1.02

УДК 621.941.23

Е.М. Самойлова, С.С. Колоколова, М.В. ВиноградовСаратовский государственный технический университет
им. Ю.А. Гагарина, Саратов, Россия**СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ МЕТОДОВ
УПРАВЛЕНИЯ ТОЧНОСТЬЮ ПРЕЦИЗИОННОЙ
ОБРАБОТКИ С УЧЕТОМ ДОМИНИРУЮЩЕЙ РОЛИ
ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ**

Рассмотрены вопросы системного подхода к обеспечению технологической надежности и предложены технические решения для подсистем и узлов прецизионных автоматизированных металлорежущих станков, направленные на минимизацию влияния процессов различной скорости на показатели точности прецизионной обработки.

С учетом накопленного опыта исследований предлагается концепция системного подхода к организации контроля, диагностирования и испытаний прецизионных автоматизированных металлорежущих станков для повышения их точности и надежности в виде многоуровневой структуры. Этапы жизненного цикла станков представлены в ней как уровни организации, причем в них можно выделить подуровни, каждый из которых имеет свой конечный результат. В соответствии с мировыми тенденциями развития технологии металлообработки и организации производства основу потребности этих отраслей будут составлять высокоточные автоматизированные виды оборудования для создания гибких быстроперенастраиваемых производств.

На базе комплексных теоретических и экспериментальных исследований обоснована необходимость повышения точности формообразующих движений рабочих органов прецизионного технологического оборудования за счет применения многоступенчатых фрикционных передач в силу того, что известные механические передачи приводов не удовлетворяют ряду требований для применения их в приводах подачи, обеспечивающих сверхпрецизионное формообразование деталей.

Анализ контактных и силовых взаимодействий в многоступенчатой фрикционной передаче определяет необходимые для конструирования соотношения геометрических размеров роликов, что обеспечивает, в совокупности с выбором оптимального угла между векторами сил поджима роликов, минимальное взаимовлияние фрикционных пар при передаче момента, создающего тяговую силу многоступенчатой фрикционной передачи привода подачи модуля. Разработана математическая модель взаимодействия сил, возникающих при работе двухступенчатой фрикционной передачи, что позволяет оптимизировать силы прижатия роликов, обеспечить повышение КПД многоступенчатых фрикционных передач.

Ключевые слова: точность, обработка, система, станок, управление, передача, трение, аэростатика, опора, лазер, интерферометр, технология, надежность.

E.M. Samoilova, S.S. Kolokolova, M.V. Vinogradov

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,
Saratov, Russian Federation

A SYSTEMATIC APPROACH TO THE ANALYSIS OF MANAGEMENT METHODS ACCURACY PRECISION MACHINING CONSIDERING THE DOMINANT ROLE OF MORPHOGENETIC MOVEMENTS

Considered the issues of system approach to ensure the process's reliability and proposed technical solutions for subsystems and components of precision automated machine tools aimed at minimizing the impact of processes of different speeds on the accuracy metrics precision machining.

With accumulated experience of research, proposed the concept of a systematic approach to monitoring, diagnosis and testing of automated precision cutting machines to enhance their accuracy and reliability in the form of multilevel structure. Stages vitally cycle machines are represented by the levels of the organization, and in them there are sublevels, each of which has its end result. In line with global trends of technology development IU-calibrate and organization of production the basis of the needs of those from-the spheres will be high-precision automated types of equipment to create flexible, rapid tool change tube industries.

On the basis of complex theoretical and experimental researches of the necessity of increasing the accuracy of movements precision of the working bodies of technological equipment through the use of multi-stage friction gear due to the fact that the known mechanical transmission actuators do not satisfy a number of requirements for their use in the feed drives, providing ultra-precise shaping of the parts.

The analysis of contact and power interactions in multi-stage friction gear determines necessary for the construction of ratios is the geometric dimensions of the rollers that provides, in conjunction with the selection of the optimal angle between the vectors of the force of the biasing rollers, the minimum interaction of friction pairs in the transmission of torque, creating a traction force of multi-stage friction gear drive supply module. The mathematical model of the interaction forces that arise when the two-stage friction gear that allows you to optimize the pressing force of the rollers, to improve the efficiency of multi-stage friction PE-of the heating main.

Keywords: accuracy, treatment, system, machine, management, transmission, friction, aerostatics, support, laser, interferometer, technology, reliability.

Возможность прецизионной обработки в автоматизированном режиме связана с решением целого комплекса вопросов. Методология обеспечения точности обработки на прецизионных автоматизированных металлорежущих станках (МРС) базируется на сформированной концепции системного подхода к проблеме обеспечения их технологической надежности. Основной тенденцией развития и совершенствования производства в последние годы является интенсивное внедрение интегрированных систем автоматизации и управления, охватывающих этапы проектирования изделий и разработки технологии изготовления, собственно производства и этап эксплуатации. К этому следует доба-

вить автоматизацию научных исследований, необходимых для организации производства и повышения качества ряда наукоемких изделий. При этом происходит снижение удельного веса операций, основанных на применении физического труда и органов чувств человека. Эти операции заменяются интеллектуальными формами труда с использованием средств вычислительной техники на всех стадиях производства – от проектирования до изготовления.

Одной из основных проблем, от решения которой зависит качество продукции, является организация контроля на всех этапах жизненного цикла изделий. Для обеспечения надежного функционирования интегрированной производственной системы необходимо организовать эффективный автоматизированный контроль конструкторской и технологической документации, автоматизированный контроль и диагностирование технологического оборудования, включая режимы обработки и техническое состояние, а также активный контроль качества продукции в процессе изготовления и выходных характеристик готовых изделий. В современном машиностроительном производстве, изготавливаемом для бурно развивающихся наукоемких отраслей аэрокосмической, приборостроительной, автомобильной, подшипниковой и других видов промышленности, наблюдается устойчивая тенденция повышения требований к точности и надежности технологического оборудования. Это обусловлено особенностями эксплуатации прецизионного оборудования в условиях автоматизированного производства, где необходимо сохранять его высокие выходные показатели в течение длительного периода функционирования.

Концепция системного подхода к организации контроля, диагностирования и испытаний (в дальнейшем в ряде случаев – просто контроля) прецизионных МРС для повышения их точности и надежности представлена в виде многоуровневой структуры. Этапы жизненного цикла станков представлены в ней как уровни организации, причем в них можно выделить подуровни, каждый из которых имеет свой конечный результат (рис. 1) [1–4].

Каждая операция, связанная с анализом состояния станка и процесса обработки на нем, представляет собой определенную совокупность действий (накопление данных для моделирования объектов, оснащение станка средствами контроля, построение системы диагностирования и т.д.), суть которых раскрывается в зависимости от уровня

организации. Такой структурный разрез при создании новых и модернизации эксплуатирующихся МРС позволяет проследить процесс накопления информации о состоянии объектов и определить целесообразные направления их совершенствования.



Рис. 1. Системный подход к обеспечению технологической надежности прецизионных автоматизированных металлорежущих станков

На уровне разработки *прецизионных автоматизированных металлорежущих станков* для успешной реализации новых технических решений узлов прецизионных МРС необходимо не только использовать современные средства автоматизированного расчета и проектирования, но и определить основные узлы и их характеристики, которые следует контролировать в дальнейшем, выявить возможные дефекты конструкции и выбрать рациональные диагностические параметры, по которым осуществить конструкторскую проработку встраиваемых в станок средств диагностирования (СД), а также провести ряд испы-

таний отдельных узлов для уточнения расчетных значений параметров и моделей, причем в ряде случаев целесообразным является использование как детерминированных, так и статистических методов. На основе разработанных моделей, исследований и испытаний (в том числе станков-прототипов) выявляются факторы, оказывающие наиболее сильное влияние на станок, определяются пути создания серийного образца.

Концепция системного подхода к проблеме обеспечения технологической надежности прецизионных МРС положена в основу методологии обеспечения точности обработки (рис. 2). Необходимый уровень качества станка определяется в первую очередь требованиями к точности изготовленных деталей. Важную роль при этом играет решение задач, связанных с совершенствованием приводов подачи. При этом МРС рассматривается как сложная иерархическая система, на верхнем уровне которой выделяется совокупность трех взаимодействующих подсистем: формообразующей, управляющей и вспомогательной [5–7].

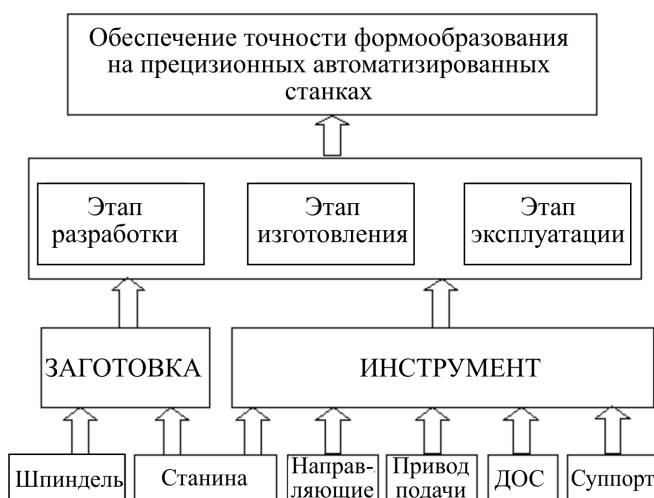


Рис. 2. Структура обеспечения точности формообразования на прецизионных автоматизированных станках

Для решения указанных задач необходимо создание диагностических моделей высокоточных МРС различных групп, которые с точки зрения современной теории управления можно рассматривать как сложные динамические системы. В этой связи для построения диагностических моделей объектов достаточно широкого класса целесооб-

разно применение методов пространства состояний, позволяющих выработать единый подход для систем, содержащих элементы различной физической природы.

На объект, исполнительные органы и датчики в случае возникновения неисправностей в объекте управления накладываются определенные условия, и модели записывают следующим образом [15]:

– для случая неисправностей исполнительных органов и изменений в динамике объекта

$$\dot{X}(t) = (A + \Delta A(t))X(t) + (B + \Delta B(t))U(t), \quad (1)$$

где $X(t)$ – n -мерный вектор состояния; $U(t)$ – r -мерный вектор управления; A – $(n \times n)$ – матрица коэффициентов, характеризующих динамику объектов; B – $(n \times r)$ – матрица передаточных коэффициентов исполнительных органов; $\Delta A(t)$ и $\Delta B(t)$ – соответственно матрицы, характеризующие изменение в динамике объекта и изменение коэффициента преобразования исполнительного органа;

– при неисправностях датчиков

$$Y(t) = (C + \Delta C(t))X(t), \quad (2)$$

где $Y(t)$ – m -мерный выход датчиков с соответствующими коэффициентами; C – $(m \times n)$ – матрица передаточных коэффициентов датчиков; $\Delta C(t)$ – матрица, характеризующая изменения коэффициентов передачи датчиков в результате их неисправности.

С учетом вышеизложенного задача диагностирования при различных испытаниях МРС может быть представлена как задача распознавания события в обобщенном объекте и состоит в следующем: известны виды неисправностей и изменения объекта согласно уравнениям (1) и (2), представленные обучающими выборками. Требуется на основании данной выборки найти рациональную систему диагностических параметров и построить алгоритм диагностирования, позволяющий по текущим значениям признаков определить техническое состояние объекта.

Исследование динамики приводов как исполнительных устройств автоматизированных МРС представляется неотъемлемым этапом проектирования, поскольку к ним предъявляются жесткие требования по обеспечению высокого качества формообразующих перемещений. Нестабильность заданного закона выходного перемещения может быть

обусловлена такими факторами, как кинематическая погрешность, зазор или самоторможение в передаче, пульсации управляющего момента, колебания нагрузки, высокая виброактивность привода.

Известно, что при малых перемещениях в станках в условиях трения твердых тел даже при постоянной силе тяги может возникать неравномерность скольжения, представляющая фрикционные автоколебания. Вредными проявлениями этого вида колебаний являются снижение равномерности движения суппортов с режущим инструментом по направляющим и, как следствие, периодичность микрогеометрии обработанных поверхностей и погрешности позиционирования, представляющие рассогласование между заданной и фактической величинами подач.

В современных станках используются пять типов направляющих с различным характером трения: скольжения – 60 %, качения – 19 %, комбинированные (качения – скольжения) – 12 %, гидростатические и аэростатические – 9 %. В прецизионных МРС нашли применение направляющие последних трех типов. Это связано с тем, что направляющие скольжения характеризуются сравнительно высоким и непостоянным по величине трением, поскольку значительно различаются силы трения покоя и движения, которые, в свою очередь, зависят от скорости движения. В гидро- и аэростатических направляющих пренебрежимо мал износ, т.е. долговечность их практически не ограничена. Несомненным достоинством применения гидро- и аэростатических направляющих в прецизионных МРС является возможность осуществления обработки с исключительно высокой точностью (до десятых долей микрометра) и высоким качеством поверхности (шероховатость поверхности до сотых долей микрометра) [3, 8].

Привод главного движения (ПГД) обеспечивает необходимую скорость вращения детали и заданную точность ее положения в системе координат станка. В состав ПГД входят двигатель, механическая передача, шпиндельный узел и достаточно часто датчик скорости вращения. Шпиндельный узел (ШУ), всегда участвующий в движении формообразования, является одним из наиболее ответственных узлов любого МРС, во многом определяющим точностные параметры, поскольку на его долю приходится от 50 до 80 % погрешностей в общем балансе точности станка. Он работает в напряженных условиях, подвергаясь действию процессов различной скорости, при высоких требо-

ваниях к выходным характеристикам, в первую очередь точности, положения оси шпинделя. Анализ подшипников различного типа в ШУ МРС позволяет отметить, что в прецизионных станках применяются в основном гидростатические и газостатические опоры. Потребность в дальнейшем совершенствовании указанных ШУ обусловлена необходимостью создания МРС класса точности С и станков для сверхпрецизионной обработки алмазным инструментом [9].

Подсистема привода подачи (ППП) обеспечивает необходимые скорость и перемещение рабочих органов и заданную точность их положения в системе координат станка. В состав ППП входят двигатели, механические передачи, суппорт с направляющими, датчики обратной связи (ДОС). По мере роста требований к точности обработки повышаются требования ко всем показателям приводов (точности, быстродействию, надежности и др.). Стремление к снижению потерь мощности и нагрева, улучшению динамических характеристик, увеличению надежности и упрощению обслуживания привело к замене гидравлических приводов подачи электромеханическими, причем распространение получили следящие приводы. При проектировании новых станков приводам следует уделять большое внимание, так как возможности регулируемых приводов значительно упрощают кинематическую часть конструкции и даже исключают механизмы изменения скоростей и подач, когда двигатель соединяется непосредственно с ходовым винтом [10, 11].

С точки зрения системного подхода современные прецизионные МРС токарной группы, предназначенные для обработки деталей электронной и аэрокосмической техники, могут быть представлены с учетом влияния процессов различной скорости (рис. 3).

Показатели качества функционирования управляющей подсистемы МРС, в состав которой входят устройство ЧПУ (в том числе на основе микроЭВМ или просто автоматическое управляющее устройство) и блоки связи с другими подсистемами, определяются, во-первых, точностью и надежностью управления – формированием управляющих сигналов, во-вторых, реализацией, при наличии возможности, функций контроля технического состояния узлов и размера деталей, в-третьих, осуществлением диагностирования МРС (рис. 4). Указанные выходные показатели управляющей подсистемы не влияют на параметрическую надежность МРС.

Анализ влияния скорости процессов в станке	Технические решения для формообразующей подсистемы			
	Привод главного движения	Приводы подачи	Несущие элементы конструкции	Подсистема режущего инструмента
Медленные (износ деталей)	Гидро- или аэростатические подшипники	Гидро- или аэростатические направляющие	Искусственное старение металлов, железобетонные станины	–
Средней скорости (износ РИ, тепловые)	Стабилизация теплового режима	Электро-механический привод	Материалы с малым КТР	Твердые сплавы, керамика, алмазы
Быстро-протекающие (переходные, вибрации)	Передачи без зубчатых колес, балансировка шпинделя	Безлюфтовые механические передачи	Полимербетонные станины	Линейные резовые блоки

Рис. 3. Технические решения для подсистем и узлов прецизионных МРС, направленные на минимизацию влияния процессов различной скорости

Автоматизированный прецизионный металлорежущий станок						
Управляющая подсистема	Формообразующая подсистема					Вспомогательная подсистема
Точность и надежность функционирования (управление, контроль, диагностирование)	Привод главного движения	Привод подачи	Подсистема режущего инструмента	Несущие элементы конструкции	Измерительные средства	Точность и надежность функционирования (положение заготовки, подача воздуха, ТЖ и т.п.)
	Точность траектории шпинделя, вибрации, тепловые деформации	Точность позиционирования, вибрации, переходные характеристики	Износ инструмента вибрации	Тепловые деформации	Точность и надежность измерений	
Окружающая среда		Показатели точности обработки		Заготовка		
Стабильность температуры, давления, влажности воздуха; низкий уровень вибраций				Точность размеров, формы, микрогеометрических параметров, стабильность свойств		

Рис. 4. Влияние компонентов технологической системы на показатели точности обработки

Вспомогательная подсистема обеспечивает заданную точность положения заготовки, своевременную подачу заготовок, технологической жидкости (ТЖ), воздуха, масла, удаление готовых деталей и стружки из зоны резания. Параметры точности деталей наибольшим образом зависят от выходных характеристик формообразующей подсистемы, в частности, того, с какой точностью выполняются заложенные в технологическом процессе взаимные перемещения инструмента и заготовки при наличии ряда внешних и внутренних возмущений, имеющих как детерминированные, так и стохастические составляющие.

Анализ приводов подачи показал, что по сравнению с традиционными механическими передачами (шариковые винтовые пары) фрикционные передачи в приводах прецизионных станков обеспечивают более высокие точностные характеристики, в частности точность позиционирования. Отсутствие научной предыстории и обоснованного применения многоступенчатых фрикционных передач (МФП) в универсальных токарных МРС, а также лазерных интерферометров в качестве ДОС приводов подачи таких станков, например типа ТПАРМ, выявили целесообразность проведения соответствующих исследований, связанных с повышением параметрической надежности указанных приводов.

В составе формообразующей подсистемы станка можно выделить привод главного движения, приводы подачи, подсистему режущего инструмента, направляющие, несущие элементы конструкции. При расчетах характеристик функциональных подсистем станков используются различные математические модели.

Связь параметров детали, вектор которых обозначим $\bar{Y}(t)$, с совокупностью входных, внешних и внутренних параметров можно представить в виде функционала

$$\bar{Y}(t) = \bar{Y} \{ \bar{Z}(t), \bar{R}(t), \bar{T}(t), \bar{V}(t) \}, \quad (3)$$

где $\bar{Z}(t)$ – вектор параметров заготовки, описывающий ее физико-механические свойства и геометрические размеры; $\bar{R}(t)$ – вектор параметров режимов резания; $\bar{T}(t)$ – вектор параметров технологической системы; $\bar{V}(t)$ – вектор возмущающих воздействий [6].

В каждом конкретном случае имеется свой набор параметров, причем среди них целесообразно выделить доминирующие и в дальнейшем рассматривать только их влияние. Все параметры могут быть

переменными и иметь детерминированную и стохастическую составляющие, что затрудняет строгий анализ характера их влияния на точностные параметры детали и усложняет процесс управления формообразованием.

Введение глубокой отрицательной обратной связи по положению значительно повышает точность позиционирования рабочих органов станков, однако, как показали исследования, особенности механических передач иногда сводят на нет возможности таких высокоточных датчиков обратной связи, как лазерный гетеродинный интерферометр.

В обеспечении регламентированных показателей точности обработки основную роль играет формообразующая подсистема. Высказываемые до недавнего времени прогнозы, что развитие электроники и средств автоматики позволит создать системы управления, способные полностью исключить влияние геометрических погрешностей станка на точность обработки, себя не оправдали, поэтому требования к конструкции прецизионных станков очень высокие и, кроме того, по мере роста точностных показателей МРС стали проявлять себя такие возмущающие факторы, которые ранее не играли существенной роли.

Основными видами механических передач в приводах подачи являются передачи винт – гайка (скольжения, качения, гидростатические) и реечные (зубчатое колесо – рейка, червяк – рейка). В прецизионных МРС находят свое применение в подавляющем большинстве случаев шариковые винтовые пары ввиду малого трения, возможности создания предварительного натяга и минимизации зазоров за счет известных конструктивных решений. Имеются также сведения о применении в аналогичных станках планетарных роликовых винтовых и фрикционных передач. Результаты испытаний показали, что систематические ошибки приводов с шариковой и планетарной передачами находятся в пределах 0,5–0,6 мкм; фрикционные приводы имеют значительно меньшие ошибки и обеспечивают высокую плавность перемещений, поэтому они находят применение в координатно-измерительных машинах и прецизионных станках, в том числе отечественного производства – токарных модулях типа ТПАРМ [15].

Опыт промышленного применения МФП в приводах подач прецизионных металлорежущих станков показал их высокую работоспособность, возможность обеспечивать устойчивую передачу момента и высокую точность позиционирования, вплоть до долей микрометра

(рис. 5)¹ [12, 13]. МФП обладает рядом преимуществ перед традиционными передачами, применяемыми в приводах подач, в том числе отсутствием люфта, высоким КПД, низкой виброактивностью, и имеет возможность прямого преобразования вращательного движения двигателя в поступательное движение штока (суппорта) без дополнительных передач (см. рис. 5). Изготовление деталей передач традиционных типов (шестерни, червяки, винты и т.п.) сопряжено с известными трудностями. Изготовление же цилиндров, составляющих основу элементов фрикционной передачи, заметно проще и технологичнее и сводится к простейшим операциям металлообработки.

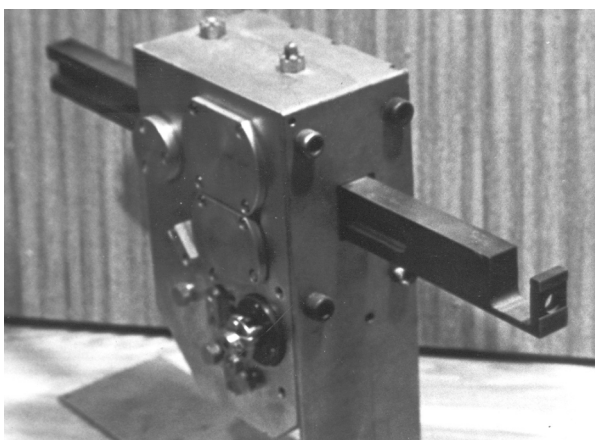


Рис. 5. Многоступенчатая фрикционная передача модуля ТПАРМ

Известно, что фрикционная передача может передать в точке контакта двух роликов силу [14]

$$F_{\tau} \leq N_k k_{\text{тр}}, \quad (4)$$

где N_k – нормальная сила в точке контакта; $k_{\text{тр}}$ – коэффициент трения.

В простейшем случае двух роликов сила N_k равна силе прижима P_n , обеспечиваемой устройством натяга. Важнейшими показателями фрикционных передач являются передаваемый момент, КПД, реализуемое передаточное отношение. Основная зависимость, определяющая их работоспособность, имеет вид

¹ А.с. 1144774. Токарный станок / И.Р. Зацман, Л.И. Брук, С.И. Зайцев [и др.] // Открытия. Изобретения. 1985. № 10. С. 31.

$$P_{\text{п}}k_{\text{тр}} = \beta_c F_{\tau}, \quad (5)$$

где $P_{\text{п}}$ – сила прижатия роликов; $k_{\text{тр}}$ – коэффициент трения; β_c – запас сцепления (для силовых передач $\beta_c = 1,2 \dots 2,0$, для приборных $\beta_c = 2,0 \dots 3,0$); F_{τ} – передаваемая окружная сила. Из уравнения (5) следует, что сила $P_{\text{п}}$ значительно превышает F_{τ} .

Материалы элементов фрикционных передач должны обладать возможно более высоким $k_{\text{тр}}$, достаточно высоким модулем упругости и низким коэффициентом внутреннего трения (в противном случае увеличиваются скольжение и гистерезисные потери на деформацию при перекачивании роликов), высокой контактной выносливостью, повышенной стойкостью к износу при скольжении, хорошей теплопроводностью. В связи с этим для роликов фрикционных передач используются закаленные стали твердостью HRC 60 (шероховатость поверхности $Ra = 0,32 \dots 1,25$ мкм), например ШХ-4, ШХ-15, 18ХГТ, 18ХВН, 65Г и др.

МФП обладают особенностями, обусловленными процессом передачи касательной силы F_{τ} через несколько контактирующих пар роликов. На плавающий ролик действуют несколько сил: силы прижима, силы реакции и касательные силы при передаче момента. Когда оси роликов и линии контакта расположены не на одной прямой, действующая сила зависит от передаваемого момента и влияет на нормальные силы реакции в точках контакта роликов. Учитывая это, можно выбрать как рациональную схему компоновки МФП на стадии проектирования, так и целесообразную методику настройки в процессе изготовления и эксплуатации.

Указанное подробно исследовано на примере двухступенчатой фрикционной передачи, состоящей из двух фрикционных пар ролик – ролик и одной фрикционной пары ролик – шток (рис. 6) [15]. Оси роликов O_1 и O_3 жестко закреплены в корпусе, а ролик O_2 имеет возможность самоустанавливаться по роликам O_1 и O_3 и прижимается к ним силами $P_{\text{п1}}$ и $P_{\text{п2}}$, направленными по линии центров соответствующих роликов и действующими на ось ролика O_2 .

Обозначив угол между $N_{\text{к1}}$ и $P_{\text{п2}}$ через α , условие статического равновесия ролика O_2 в векторной форме можно записать в виде

$$\begin{cases} N_{\text{к2}} - P_{\text{п2}} + F_{\tau1} \sin \alpha - (N_{\text{к1}} - P_{\text{п1}}) \cos \alpha = 0, \\ N_{\text{к1}} - P_{\text{п1}} + F_{\tau2} \sin \alpha - (N_{\text{к2}} - P_{\text{п2}}) \cos \alpha = 0. \end{cases} \quad (6)$$

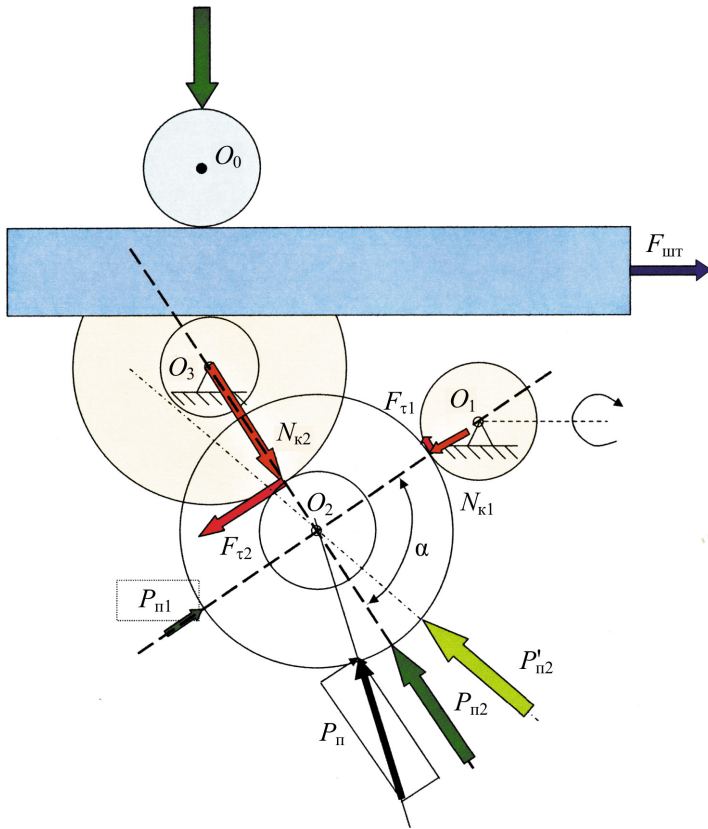


Рис. 6. Схема распределения сил в двухступенчатой фрикционной передаче привода подачи модуля ТПАРМ

Из схемы (см. рис. 6) видно, что возникающие в процессе передачи крутящего момента силы $F_{\tau 1}$ и $F_{\tau 2}$ оказывают влияние на величину нормальных сил N_{k2} и N_{k1} при постоянных силах $P_{п1}$ и $P_{п2}$. Большой и малый диаметры роликов O_2 и O_3 обозначим D_2 , d_2 и D_3 , d_3 соответственно.

Из анализа выражения (6) установлено, что для каждого из значений $\chi = d_2/D_2$, определяющих соотношение касательных сил $F_{\tau 1}$ и $F_{\tau 2}$ (так как $d_2/D_2 = F_{\tau 1}/F_{\tau 2}$), существует оптимальное значение угла α , при котором это взаимовлияние сил минимально. Действительно, для момента проскальзывания между роликами выражение (6) может быть приведено к виду

$$N_{k1} = \frac{P_{п1} x_2 \sin \alpha}{x_2 \sin \alpha + k_{тр} x_2 \cos \alpha + k_{тр}}. \quad (7)$$

Из выражения для первой производной по α

$$\frac{dN_{к1}}{d\alpha} = \frac{P_{п1}\chi_2 k_{тр} (\cos \alpha + \chi^2)}{(\chi_2 \sin \alpha + k_{тр}\chi_2 \cos \alpha + k_{тр})^2} \quad (8)$$

можно получить условие экстремума

$$\alpha_{\min} = \arccos(-\chi_2), \quad (9)$$

которое для значения $\chi_2 = 0,28$, полученного для МФП ТМ ТПАРМ-100, будет $\alpha_{\min} = 106^\circ$. В упомянутой МФП из конструктивных соображений угол α выбран близким к 90° , тогда из выражения (6) следуют соотношения

$$P_{п1} = N_{к1} + F_{\tau 2}, \quad (10)$$

$$P_{п2} = N_{к2} + F_{\tau 1}, \quad (11)$$

с учетом которых и принятого обозначения $\chi_i = d_i/D_i$ силы прижима, необходимые для обеспечения заданной силы на штоке $F_{шт}$, можно выразить как

$$P_{п1} = \frac{F_{шт}}{k_{тр}\chi_1\chi_2} (1 + k_{тр}\chi_2), \quad (12)$$

$$P_{п2} = \frac{F_{шт}}{\chi_1 k_{тр}} \left(1 + \frac{k_{тр}}{\chi_2} \right). \quad (13)$$

В процессе эксплуатации МФП взаимовлияние фрикционных пар проявляется в несимметрии привода подачи, выражающейся в различии максимальных сил $F_{шт.max}$, развиваемых приводом при движении суппорта в различных направлениях, что влияет как на динамические свойства привода, так и на его параметрическую надежность в целом. Был обнаружен эффект «отжима» плавающего ролика O_2 . В некоторых передачах ввиду несовершенства механизма нагружения при положении вектора $P'_{п2}$ его проекция на линию O_1-O_2 будет вычитаться из $P_{п1}$ (см. рис. 6). Исключить указанный эффект можно задав несимметричный допуск на отклонение угла между вектором силы $P_{п2}$ и линией, соединяющей центры роликов O_2 и O_3 , что довольно трудно контролировать при сборке. Очевидно, что при одинаковом коэффициенте трения соотношение сил прижима $P_{п2}$ и $P_{п1}$ равно соотношению диаметров D_2

и d_2 плавающего ролика O_2 (см. рис. 6). Приложив к плавающему ролику O_2 прижимную силу $P_{п}$, раскладывающуюся на составляющие $P_{п2}$ и $P_{п1}$, из параллелограмма сил можно определить как величину, так и направление силы прижима $P_{п}$.

Рассмотренный вариант прижима плавающего ролика двухступенчатой фрикционной передачи практически исключает возможность возникновения эффекта его «отжима», значительно упрощает конструкцию механизма прижима и методику настройки фрикционной передачи. Оптимизация угла α между $N_{к1}$ и $P_{п2}$ обеспечит минимальное взаимовлияние сил в МФП, а прижим одной силой, раскладывающейся на две составляющие – надежную работу фрикционной передачи. Это будет способствовать повышению кинематической точности, надежности и долговечности МФП.

В приводах подачи известных станочных модулей типа ТПАРМ применяется двигатель постоянного тока, ротор которого посредством специальной муфты соединен с входным валом МФП. В качестве датчика обратной связи используется лазерный интерферометр, контролирующий скорость движения суппорта, соединенного со штоком МФП. Блок управления приводом обеспечивает реализацию управляющих команд с учетом сигналов обратной связи с точностью до 0,2 мкм.

На рис. 7 приведен внешний вид роликов МФП прецизионного токарного модуля ТПАРМ, расположенных в кинематической последовательности.



Рис. 7. Ролики трехступенчатой фрикционной передачи

Основные недостатки обычных зубчатых передач – неравномерность передаточного отношения и люфт – удалось преодолеть за счет использования гладких цилиндрических колес – роликов, вращающих-

ся в опорах качения. Кинематическая пара ролик – шток обеспечивает преобразование вращательного движения в поступательное. Ролики прижимаются определенной силой для передачи вращающего момента. Оригинальная схема прижима самоустанавливающихся роликов исключает люфты и минимизирует потери на трение. Это обеспечивает высокий (выше, чем у ШВП) КПД. С валом двигателя соединен первый – самый маленький – ролик передачи, следовательно, инерционность такого привода невысокая. В приводе с МФП исключена так называемая зубцовая погрешность. Отсутствие «мертвого хода» позволяет реализовать работу привода в режиме стружкодробления, когда суппорт совершает возвратно-поступательные движения с определенной частотой, обеспечивая дробление сливной стружки на фрагменты. Удаление дискретной стружки из зоны резания происходит естественным путем, что важно в условиях автоматизированного производства.

Эффективность применения новых приводов сразу же нашла убедительное подтверждение. Серия токарных станков ТПАРМ с МФП имела повышенные технико-технологические и эксплуатационные характеристики по сравнению с аналогичными станками, имеющими традиционные приводы. Повысилась точность станков, расширились диапазоны параметров обрабатываемых деталей и т.д. В настоящее время электроприводы с МФП используются в конструкции электроэрозионных станков нового поколения, разрабатываемых в НПК ПО, обеспечивая высокое качество обработки при минимальном количестве проходов. МФП имеют высокую технологичность, что позволяет изготовить их элементы (ролики) с высокими точностными показателями на универсальном оборудовании, просты в эксплуатации, доступны по цене.

По мере развития науки и техники верхний предел достижимой точности непрерывно повышается. При повышении верхнего предела точности сверхпрецизионной обработки повышается предел точности как прецизионной, так и нормальной механической обработки. В структуре системного подхода к обеспечению точности сверхпрецизионной обработки наглядно показана роль компонентов ТС в обеспечении сверхпрецизионной обработки (рис. 8).

При условии обеспечения требований к заготовкам, к режущему инструменту, к управлению процессом резания и минимизации внешних

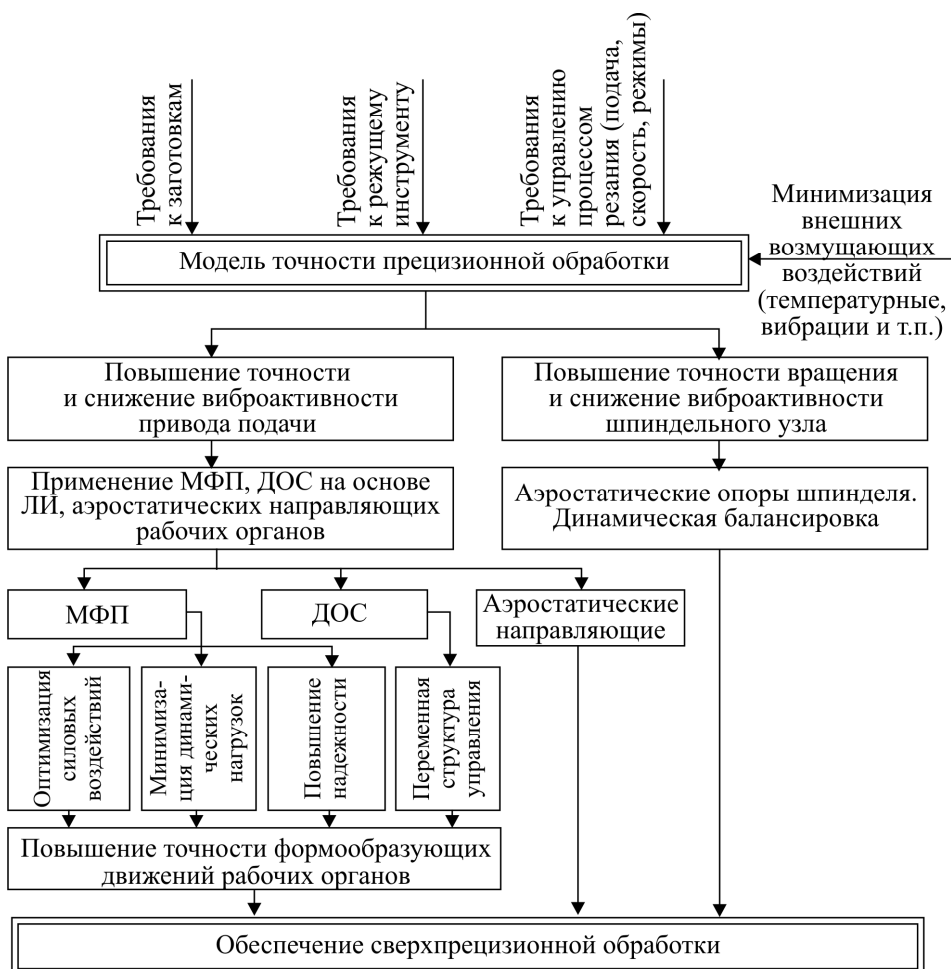


Рис. 8. Структура системного подхода к обеспечению точности сверхпрецизионной обработки

возмущающих факторов можно рациональным подбором компонентов ТС обеспечить сверхпрецизионную обработку. Системный подход позволяет выделить доминирующие факторы, влияющие на точность обработки, и наметить пути минимизации их воздействия.

Список литературы

1. Игнатьев А.А., Виноградов М.В. Параметрическая надежность приводов подачи с фрикционной передачей // СТИН. – 1996. – № 1. – С. 12–15.

2. Точность и надежность автоматизированных прецизионных металлорежущих станков / Б.М. Бржозовский, В.А. Добряков, А.А. Игнатьев [и др.]. – Саратов: Изд-во Саратов. гос техн. ун-та, 1994. – Ч. 2. – 156 с.
3. Бушуев В.В. Тенденции развития мирового станкостроения // СТИН. – 2000. – № 9. – С. 20–24.
4. Управление качеством формообразования на прецизионных автоматизированных металлорежущих станках / А.А. Игнатьев, М.В. Виноградов, Е.А. Сигитов [и др.]. – Саратов: Изд-во Саратов. гос техн. ун-та, 2003. – 132 с.
5. Moronuki N., Furukawa Y. On the Design of Precise Feed Mechanism by Friction Drive // *Tap. Soc. Precis. Eng.* – 1988. – Vol. 54, № 11. – P. 81–86.
6. Виноградов М.В., Игнатьев А.А. Методология анализа формирования параметров точности прецизионной обработки на этапах жизненного цикла станка // *Вестник СГТУ.* – 2011. – № 1(52). – С. 41–49.
7. Научные основы прогрессивной техники и технологии / Г.И. Марчук, И.Ф. Образцов, Л.И. Седов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1986. – 376 с.
8. Виноградов М.В. Оптимизация параметров четырехступенчатой фрикционной передачи привода подачи прецизионного металлорежущего станка // *Вестник СГТУ.* – 2010. – № 3(48). – С. 37–42.
9. Точность и надежность автоматизированных прецизионных металлорежущих станков / Б.М. Бржозовский, В.А. Добряков, А.А. Игнатьев [и др.]. – Саратов: Изд-во Саратов политехн. ин-та, 1992. – Ч. 1. – 160 с.
10. Виноградов М.В., Игнатьев А.А., Сигитов Е.А. Привод подачи с многоступенчатой фрикционной передачей для прецизионного токарного модуля // СТИН. – 2004. – № 11. – С. 11–12.
11. Пуш В.Э. Малые перемещения в станках. – М.: Машгиз, 1961. – 124 с.
12. Виноградов М.В., Игнатьев А.А., Сигитов Е.А. Механическая передача без зубьев // *Наука: XXI век (транспорт и машиностроение).* – 2012. – № 1. – С. 64–68.
13. Виноградов М.В., Игнатьев А.А., Сигитов Е.А. Обеспечение нанометровой точности формообразующих перемещений рабочих органов прецизионных автоматизированных станков. – Саратов: Изд-во Саратов. гос техн. ун-та, 2011. – 102 с.

14. Вирабов Р.В. Тяговые свойства фрикционных передач. – М., 1982. – 263 с.

15. Виноградов М.В., Игнатъев А.А., Сигитов Е.А. Приводы подачи прецизионных автоматизированных станков с многоступенчатой фрикционной передачей: монография. – Саратов: Изд-во Сарат. гос. техн. ун-та, 2014. – 140 с.

References

1. Ignat'ev A.A., Vinogradov M.V. Parametricheskaiia nadezhnost' privodov podachi s friktsionnoi peredachei [Parametric reliability of supply to the friction drive transmission]. *STIN (Stanki Instrument)*, 1996, no. 1, pp. 12-15.

2. Brzhozovskii B.M., Dobriakov V.A., Ignat'ev A.A. [et al.] Tochnost' i nadezhnost' avtomatizirovannykh pretsizionnykh metallovezhushchikh stankov [The accuracy and reliability of automated precision lathes metallovezhushchih]. Saratovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 1994. Part 2. 156 p.

3. Bushuev V.V. Tendentsii razvitiia mirovogo stankostroeniia [Tendencies of development of the world machine tool industry]. *STIN (Stanki Instrument)*, 2000, no. 9, pp. 20-24.

4. Ignat'ev A.A., Vinogradov M.V., Sigitov E.A. Upravlenie kachestvom formoobrazovaniia na pretsizionnykh avtomatizirovannykh metallovezhushchikh stankakh [Forming quality management precision automated machine tools]. Saratovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2003. 132 p.

5. Moronuki N., Furukawa Y. On the Design of Precise Feed Mechanism by Friction Drive. *Tap. Soc Precis. Eng.*, 1988, vol. 54, no. 11, pp. 81-86.

6. Vinogradov M.V., Ignat'ev A.A. Metodologiiia analiza formirovaniia parametrov tochnosti pretsizionnoi obrabotki na etapakh zhiznennogo tsikla stanka [Methodology for analysis of formation of parameters of accuracy precision processing stages of the machine life cycle]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni Gagarina Iu.A.*, 2011, no. 1(52), pp. 41-49.

7. Marchuk G.I., Obratsov I.F., Sedov L.I. Nauchnye osnovy progressivnoi tekhniki i tekhnologii [Scientific basis for the progressive engineering and technology]. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 376 p.

8. Vinogradov M.V. Optimizatsiia parametrov chetyrekhstupenchatoi friktsionnoi peredachi privoda podachi pretsizionnogo metallorazhushchego stanka [Optimization parameters four- friction gear drive system of a precision machine tool]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni Gagarina Iu.A.*, 2010, no. 3(48), pp. 37-42.

9. Brzhozovskii B.M., Dobriakov V.A., Ignat'ev A.A. [et al.] Tochnost' i nadezhnost' avtomatizirovannykh pretsizionnykh metallorazhushchikh stankov [The accuracy and reliability of automated high-precision machine tools]. Saratovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 1992. Part 1. 160 p.

10. Vinogradov M.V., Ignat'ev A.A., Sigitov E.A. Privod podachi s mnogostupenchatoi friktsionnoi peredachei dlia pretsizionnogo tokarnogo modul'ia [Drive supply with multi- friction transmission module for precision lathe]. *STIN (Stanki Instrument)*, 2004, no. 1, pp. 11-12.

11. Push V.E. Malye peremeshcheniia v stankakh [Small movements in machine tools]. Moscow: Mashgiz, 1961. 124 p.

12. Vinogradov M.V., Ignat'ev A.A., Sigitov E.A. Mekhanicheskaia peredacha bez zub'ev [Mechanical transmission without teeth]. *Nauka: XXI vek (transport i mashinostroenie)*, 2012, no. 1, pp. 64-68.

13. Vinogradov M.V., Ignat'ev A.A., Sigitov E.A. Obespechenie nanometrovoi tochnosti formoobrazuiushchikh peremeshchenii rabochikh organov pretsizionnykh avtomatizirovannykh stankov [Ensuring the accuracy of forming nanometer displacements working bodies precision automated machines]. Saratovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2011. 102 p.

14. Virabov R.V. Tiagovye svoistva friktsionnykh peredach [Traction properties of friction gear]. Moscow: Mashinostroenie, 1982. 263 p.

15. Vinogradov M.V., Ignat'ev A.A., Sigitov E.A. Privody podachi pretsizionnykh avtomatizirovannykh stankov s mnogostupenchatoi friktsionnoi peredachei [Drives feed precision automated machines with multifriction transmission]. Saratovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2014. 140 p.

Получено 28.10.2015

Об авторах

Самойлова Елена Михайловна (Саратов, Россия) – кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина; e-mail: helen_elenka@mail.ru.

Колоколова Светлана Сергеевна (Саратов, Россия) – магистрант кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина.

Виноградов Михаил Владимирович (Саратов, Россия) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина; e-mail: michail1948@mail.ru.

About the authors

Elena M. Samoylova (Saratov, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Doctoral Student, Department “Automation, Control, Mechatronics”, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; e-mail: helen_elenka@mail.ru.

Svetlana S. Kolokolova (Saratov, Russian Federation) – Master Student, Department “Automation, Control, Mechatronics”, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Mikhail V. Vinogradov (Saratov, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Department “Automation, Control, Mechatronics”, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; e-mail: michail1948@mail.ru.