

максимальное расстояние между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки  $\Delta_{\max}$ , которое зависит от коэффициента асимметрии цикла колебаний. Прямая зависимость между величиной этого расстояния и максимальной толщиной среза предполагает, что с уменьшением расстояния  $\Delta_{\max}$  снижается высота гребешком микронеровности обработанных поверхностей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лавров Н.К. Завивание и дробление стружки в процессе резания / Н.К. Лавров. - М.: Машиностроение, 1971. - 88с.
2. Справочник по технологии резания материалов: в 2 кн. Кн.1. /ред. нем. изд.: Г. Шруп, Т. Штеферле; пер. с нем. В.Ф. Колотенкова [и др.]; под ред. Ю.М. Соломенцева. - М.: Машиностроение, 1985. - 616 с.
3. Гостева Г.К. Методы дробления сливных стружек / Г.К. Гостева, В.Т. Воробьев, Б.Ф. Канашкин // Технология машиностроения. Исследования в области технологии машиностроения и режущего инструмента: межвуз. сб. - Тула, 1971. - С. 78-79.
4. Гаршин К.В. О классификации методов дробления стружки / К.В. Гаршин, Л.Б. Быховский, В.В. Потапов // Управление качеством в механосборочном производстве: Тезисы докладов конференции / Перм. горком КПСС. Перм. политехн. ин-т. Перм. обл. правл. НТО Машпром. Зап.-Уральск. ЦНТИ. Дом техники обл. совета НТО. - Пермь, 1975. С.102-105.
5. Матвеев В.С. Классификация способов превращения сливной стружки из непрерывной в дробленую / В. С. Матвеев // Пути интенсификации производственных процессов при механической обработке: Межвуз. науч.-техн. сб. / Том. политехн. ин-т им. С. М. Кирова; редкол.: М. Ф. Полетика. [и др.]. - Томск: ТПИ, 1979.- С. 20-24.
6. Ахметшин Н.И. Вибрационное резание металлов / Н.И. Ахметшин, Э.М. Гоц, Н.Ф. Родиков; под ред. К.М. Рагульскаса. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. - 80с.
7. Мансырев, И. Г. Методы дробления сливной стружки в процессе резания / И. Г. Мансырев, А. А. Смирнов, И. И. Козарь. - Л.: ЛДНТП, 1983. - 20 с.
8. Ильин В.С. Способы завивания и дробления стружки при работе на токарных станках с программным управлением / В.С.Ильин, А.С. Кондратов, Б.Н. Бубнов. - [Б. м.], 1975. - 24 с. - (Технол. рекомендации / НИИ технологии и организации производства. НИИТ).
9. Захаров, Ю.Е. Полезные вибрации в машиностроении / Ю.Е. Захаров, В.Т. Гарбузюк. - Тула: Приокское книжное издательство, 1970.- 112с.
10. Подураев В.Н. Организация научно-исследовательских работ по вибрациям при механической обработке / В.Н. Подураев; Гос. науч.-техн. ком. Совета Министров СССР. Акад. наук СССР. Всесоюз. ин-т науч. и техн. информации. - М., 1961. - 66 с.
11. Способы завивания и дробления сливной стружки и области их применения. - М.: Науч.-исслед. ин-т информации по машиностроению, 1970. - 38 с. - (Руководящие материалы / М-во станкостроит. и инструм. пром-сти. Всесоюз. науч.-исслед. инструм. ин-т «ВНИИ»). 12. Бурский В.А. Разработка процессов механической обработки нежестких деталей и методов дробления стружки: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / В.А. Бурский; Физ.-техн. ин-т АН Беларуси. - Мн., 1995. - 30с.
13. Богословский Н.В. Кинематическое дробление стружки при точении труднообрабатываемых сталей / Н.В. Богословский, Т.И. Иващенко // Пути повышения эффективности обработки материалов резанием в машиностроении: материалы краткосроч. науч.-техн. семинара 13-14 мая 1991г. / под ред. Ю.М. Зубарева. - Л., О-во "Знание". Ленингр.орг.: ЛДНТП, 1991. - С. 47-48.
14. Коновалов Е.Г. Осциллирующее точение / Е.Г. Коновалов, А.В. Борисенко. - Минск: Из-во Академии наук БССР, 1960. - 32с.
15. Сергиев А.П. Вибрационное резание стали 110Г13Л / А.П.Сергиев, С.В. Волошин, Е.Г. Швачкин // Вестник машиностроения. - 2000. - №12. - С. 50-52.

УДК 621.91.04

Данилов В.А.

### МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ МОДУЛЬНОГО ТИПА

*Полоцкий государственный университет*

*Полоцк, Беларусь*

*Рассмотрены методологические аспекты построения кинематических модулей и основанных на них функциональных связей при проектировании формообразующих систем станочного оборудования для обработки механическими и физико-техническими методами. Исходя из системной модели технологии формообразования и структуры способа обработки, определены состав модулей и типы функциональных связей обрабатываемых систем станочного оборудования, как основа синтеза его кинематической структуры. Приведены примеры построения на базе*

*типовых модифицированных кинематических модулей дифференциальных и бездифференциальных кинематических структур станков. Определены задачи параметрического синтеза основных элементов формообразующих систем и пути их решения.*

При создании станочного оборудования для обработки механическими и физико-техническими методами широко применяется модульный принцип [1], который целесообразно использовать при проектировании всех основных систем станка – энергетической, формообразующей, манипуляционной, инструментальной и др. Типизация модулей основана на представлении технологии формообразования как совокупности потоков энергии, информации, материалов, обеспечивающих обработку изделия [2]. Соответственно можно выделить энергетические, информационные, манипуляционные и обрабатывающие модули. Энергетические модули служат для преобразования и передачи энергии в обрабатывающей системе. Информационные модули обеспечивают хранение, преобразование и передачу информации в процессе обработки. Манипуляционные (кинематические) модули входят в кинематическую подсистему формообразующей системы и предназначены для создания рабочих и вспомогательных перемещений инструмента и заготовки. Обрабатывающие модули служат для энергетического воздействия инструмента на материал заготовки.

Модульное построение предполагает его применение на разных стадиях разработки станочного оборудования. Так, при проектировании кинематики формообразующей системы используются кинематические модули [3], при синтезе компоновки станка – компоновочные «технологические» модули [4], а при его конструировании – конструкторские модули [1]. Указанные модули должны разрабатываться с учетом преемственности технических решений. Принцип преемственности находит отражение, в частности, в том, что компоновочные и конструкторские модули строятся на основе кинематических модулей. В этой связи синтез и оптимизация структуры кинематических модулей и образуемых на их базе кинематических связей, определяющих структуру формообразующей системы, как основы для последующих этапов проектирования станка, имеет первостепенное значение на стадии его концептуального проектирования.

Универсальность, производительность, точность и другие технико-экономические характеристики станка в значительной мере зависят от совершенства его формообразующей системы, что определяет важность рационального построения ее функциональных связей. Основой модульного построения формообразующей системы станка служит структура способа обработки [5], в соответствии с которой может быть сформирован состав исполнительных модулей – компонентов этой системы. Поэтому одной из основных задач концептуального проектирования технологического оборудования для механической и физико-технической обработки является синтез кинематической структуры его формообразующей системы, которая определяется в основном функциональными кинематическими связями между источниками энергии (приводами) и исполнительными органами (структурой внешней связи), а также исполнительных органов между собой (структурой внутренней связи) [6]. Функциональные связи могут быть механическими, гидравлическими, электромеханическими, мехатронными и др. Ими обеспечивается передача энергии и информации в формообразующей системе, и создаются необходимые исполнительные движения.

Разработка методологии модульного построения формообразующей системы станка связана с решением следующих задач проектирования ее кинематической структуры: формирование состава модулей; синтез кинематических модулей; типизация и синтез структур функциональных кинематических связей и их разработка на базе типовых кинематических модулей; параметрический синтез кинематических модулей и связей. Рассмотрим методологические аспекты их решения.

**Формирование состава модулей** обусловлено функциями конкретной подсистемы, включающей данные модули. Так, кинематическая подсистема станка, обеспечивающая исполнительные перемещения его рабочих органов, может включать в себя модули кинематических цепей механического, немеханического (электрического, гидравлического и т.п.) или комбинированного (электромеханического, мехатронного, пневмогидравлического и др.) типов, которые в зависимости от состава создаваемых движений исполнительных органов могут иметь бездифференциальную или дифференциальную структуру [3]. Структура кинематического модуля (бездифференциальная или дифференциальная) определяется типом проектируемой кинематической связи. Таким образом, формообразующая система станка зависит от состава и структуры входящих в нее кинематических модулей.

Универсальность формообразующей системы определяется множеством реализуемых на станке методов обработки, каждый из которых осуществляется соответствующим инструментальным модулем, поэтому обрабатывающая подсистема формообразующей системы станка включает множество необходимых инструментальных модулей. Например, обрабатывающая подсистема универсального станка для раскроя материала может иметь модули для воздействия на материал заготовки энергетическим лучом (плазменная и гидроабразивная резка), а также модули для механической обработки (сверления отверстий и др.), применение которой может быть более эффективным по производительности и затратам энергии по сравнению с обработкой отверстий энергетическим лучом. В этой связи кинематическая структура станка должна обеспечивать возможность оснащения его необходимыми инструментальными модулями.

В общем случае в зависимости от универсальности станка инструментальные модули могут быть в составе станка постоянными и сменными. Например, формообразующая система широкоуниверсального станка-профилятора для обработки профильных валов [7] содержит сменные модули, позволяющие реализовать различные схемы их обработки червячными, дисковыми, цилиндрическими, ротационными, комбинированными и другими инструментами. Современные токарно-фрезерные многооперационные станки оснащены постоянными модулями для точения, фрезерования, обработки концевыми инструментами.

Необходимость оснащения станка постоянными и сменными модулями следует учитывать при проектировании кинематической структуры и компоновки станка, конструировании узлов исходя из требований к его универсальности. Выполнение этого условия при проектировании кинематической структуры связано с типизацией структур кинематических связей; разработкой структур внешних и внутренних связей на базе типовых кинематических модулей [8], которые являются основой проектирования конструктивных модулей как сборочных единиц технологического оборудования.

Компоновка же станка должна обеспечить соответствующую его универсальности совокупность «технологических модулей», каждый из которых состоит из блоков компоновки, необходимых для создания определенного исполнительного движения [4]. Количество технологических модулей, формируемых из блоков данной компоновки, определяется его кинематической структурой, устанавливающей связи между исполнительными органами и источниками движения. Это обстоятельство обуславливает необходимость комплексного подхода к проектированию кинематической структуры и компоновки оборудования модульного типа. Эффективность модульного проектирования повышается при наличии апробированных типовых решений, унификации модулей.

**Синтез кинематических модулей.** Структура и характеристики типовых бездифференциальных и дифференциальных кинематических модулей механического, немеханического и комбинированного типов, обеспечивающих согласование двух движений, область применения в станках и синтез на их основе функциональных кинематических связей рассмотрены в [8]. Структуры этих модулей относятся к базовым. На их основе для конкретных задач могут быть построены модифицированные модули с иным количеством и размещением органов настройки, числом ведущих и ведомых звеньев, что позволяет, например, согласовывать более двух движений.

К модулям этого типа относятся, например, дифференциальные модули с двумя ведущими звеньями 1, 3 (рис. 1.) и одним ведомым звеном 2, а также модули с двумя ведомыми звеньями 2, 3 (рис. 2.) и одним ведущим звеном 1, позволяющие согласовывать движения трех исполнительных органов станка, например, двух вращающихся (шпинделей) и одного поступательно перемещающегося. Это достигается кинематическим соединением промежуточного и конечных звеньев модуля с соответствующими исполнительными органами станка. Кроме органов настройки модули могут содержать целевые механизмы, например, реверсирующий.

#### **Типизация и синтез структур функциональных кинематических связей.**

Различают внутренние и внешние кинематические связи. Внутренняя связь обеспечивает траекторию, а внешняя – остальные параметры исполнительного движения. Применение электромеханических или мехатронных модулей позволяет совместить внешнюю и внутреннюю связи и тем самым упростить кинематическую структуру станка, что характерно, в частности, для станков с ЧПУ.

Функциональные связи между движениями исполнительных органов, а также между двигателем и исполнительным органом осуществляются посредством кинематических цепей, которые в зависимости от характера движений ведущего и ведомого элементов кинематической цепи можно разделить на следующие основные типы.

1. Цепи, связывающие вращающиеся ведущий и ведомые элементы, посредством которых соединяют источник движения (двигатель или ведущее вращающееся звено, например, шпиндель) с исполнительным органом станка или исполнительные органы между собой.

2. Цепи, связывающие вращающийся и поступательно перемещающийся элементы, при этом ведущим элементом может быть как вращающийся, так и поступательно-перемещающийся элемент. В последнем случае требуется применение обратимого тягового устройства, позволяющего преобразовывать поступательное движение во вращательное или вращательное в поступательное.

3. Цепи, связывающие между собой поступательно перемещающиеся элементы, например, продольный и поперечный суппорты токарного станка. Цепи этого типа содержат два тяговых устройства с кинематически связанными тяговыми валами, при этом одно из устройств должно быть обратимым.

4. Цепи, связывающие между собой вращающиеся и возвратно-поступательно перемещающиеся (совершающие качательные движения) исполнительные органы. Они отличаются наличием механизма для преобразования движения и органа настройки пути движения ведомого элемента.

5. Цепи, связывающие между собой поступательно перемещающиеся и возвратно-поступательно перемещающиеся звенья.

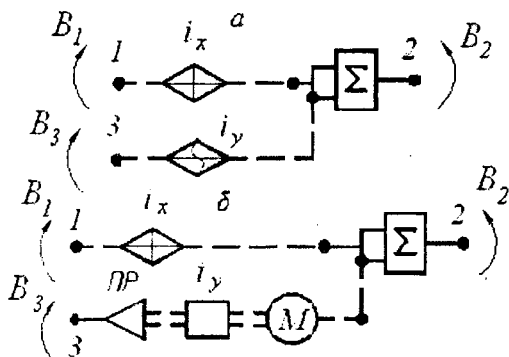


Рис. 1. – Структурные схемы дифференциальных кинематических модулей с двумя ведущими звеньями  
а - механический модуль;  
б - комбинированный модуль

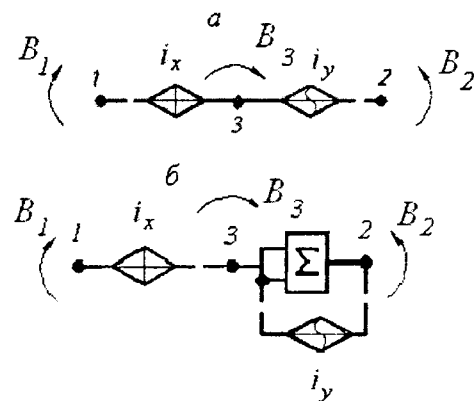


Рис. 2. – Структурные схемы бездифференциального (а) и дифференциального (б) кинематических модулей с двумя ведомыми звеньями

По принципу действия кинематическая цепь может быть механическая, немеханическая или комбинированная. Посредством этих цепей кинематический модуль соединяется с источником движения и исполнительными органами станка.

Основой синтеза внутренней связи является структура исполнительного движения. В частности, внутренние связи кинематических групп, создающих исполнительные движения с составными движениями исполнительных органов, должны быть построены на дифференциальном кинематическом модуле, например, механическом (рис. 1., а) или комбинированном (рис. 1., б). Бездифференциальная структура внутренней связи возможна, если движение каждого исполнительного органа образовано несоставным движением, что имеет место, например, в станке для нарезания резцом конической резьбы.

Выбор в качестве базы того или иного модуля зависит от требований к универсальности и точности станка, применяемой системы управления, компоновочного и других факторов. Рассмотрим применение показанных на рис. 1. и 2. модулей для построения функциональных связей в кинематической структуре зубофрезерных станков.

Формообразующая система универсального зубофрезерного станка (рис. 3., а) основана на дифференциальном механическом кинематическом модуле (рис. 1., а). Ведущее звено 3 суммирующего механизма  $\Sigma$  кинематической цепи 1-2-3 внутренней связи соединено с инструментальным шпинделем  $I$ , а второе ведущее звено 9 этого механизма кинематической цепью 7-

$i_y-9$  – с ходовым винтом тягового устройства 6, который кинематической цепью 7-8- $i_x$ -12-5 соединен со шпинделем II. Ведомое звено суммирующего механизма цепью 4- $i_x$ -12-5 связано с этим шпинделем. Благодаря такой структуре обеспечивается согласование движений  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  и  $B_4$  исполнительных органов I, II, III станка, необходимое для нарезания косозубого цилиндрического зубчатого колеса при возможности гибкой перенастройки станка. Указанные движения создаются двигателем  $M$ , от которого вращение по кинематической цепи внешней связи с органом настройки скорости  $i_x$  передается во внутреннюю связь.

Формообразующая система зубофрезерного станка (рис. 3. б) построена на бездифференциальном кинематическом модуле (рис. 2. а) с двумя ведомыми звеньями 3 и 5, первое из которых цепью 3-4 соединено со шпинделем II, другое – с тяговым устройством. Ведущее звено 2 модуля цепью 1-2 соединено с инструментальным шпинделем I, вращение  $B_1$  которого согласуется по указанным кинематическим цепям с помощью органов настройки  $i_x$  и  $i_y$  кинематического модуля с вращением  $B_2$  шпинделя II (заготовки) и перемещением  $B_3$  суппорта III в соответствии с параметрами нарезаемого зубчатого колеса.

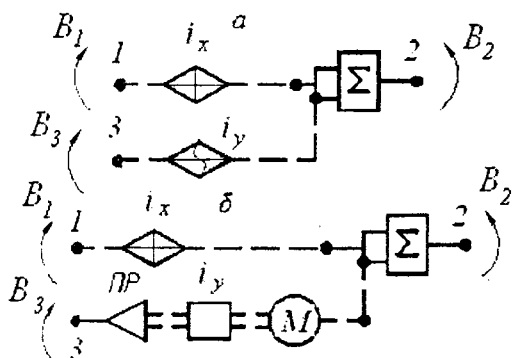


Рис. 1. – Структурные схемы дифференциальных кинематических модулей с двумя ведущими звеньями  
а - механический модуль;  
б - комбинированный модуль

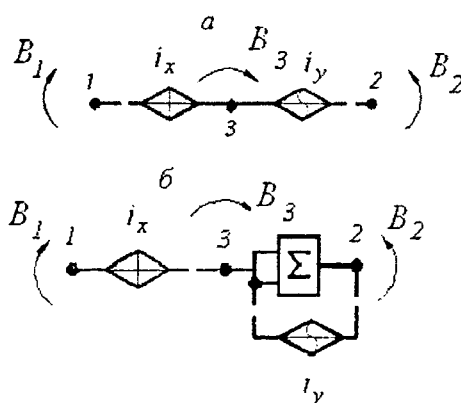


Рис. 2. – Структурные схемы бездифференциального (а) и дифференциального (б) кинематических модулей с двумя ведомыми звеньями

Обе представленные структуры реализуют одинаковые методы обработки цилиндрических зубчатых колес с прямыми и косыми зубьями, что свидетельствует о возможности замены дифференциальной структуры бездифференциальной, когда вместо физического сложения элементарных движений с помощью суммирующего механизма осуществляется их математическое сложение. Переход от дифференциальной структуры к бездифференциальной возможен, если слагаемые движения создаются общим источником движения (в механических системах) или согласованы системой управления (в станках с ЧПУ), одновременны и имеют одинаковую скоростную характеристику (равномерны или изменяются по одному закону). Указанные условия выполняются для представленных на рис. 3. структур.

Замена дифференциальной структуры бездифференциальной упрощает кинематику и конструкцию станка, однако дифференциальная структура обеспечивает возможность его настройки в более широком диапазоне параметров изделия, что необходимо учитывать при проектировании кинематики станка для конкретного типа производства.

#### Параметрический синтез кинематических модулей и связей.

Основной задачей параметрического синтеза формообразующих систем является расчет настройки внешних и внутренних кинематических связей, обеспечивающих формирование заданной поверхности с требуемой точностью при рациональных условиях резания (стабилизация скорости движения и кинематических углов режущей части и т.п.). Задача параметрического синтеза кинематических связей сводится, таким образом, к определению параметров расположенных в них органов настройки исходя из исходных перемещений ведущих и результирующих перемещений ведомых звеньев. Она может быть решена на основе общей методики расчета кинематической

настройки станков. Требуемая функциональная зависимость между перемещениями связываемых рассматриваемой кинематической цепью исполнительных органов определяется на основе анализа математической модели схемы формообразования обрабатываемой поверхности.

Изложенные принципы построения кинематики формообразующих систем носят универсальный характер и могут быть использованы при проектировании станков для механической и физико-технической обработки с различными системами управления. На их основе построены, например, кинематические структуры формообразующих систем станков с механическими и немеханическими связями для обработки некруглых поверхностей деталей профильных моментопередающих соединений, некруглых зубчатых колес, колес с бочкообразными зубьями и др. [7-9].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аверьянов О.И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ / О.И. Аверьянов. – М.: Машиностроение, 1982. – 358 с.
2. Смирнов А.И. Анализ перспектив развития методов формообразования в машиностроении / А.И. Смирнов. – М.: НИИМаш, 1982. – 49 с.
3. Данилов В.А. Синтез и оптимизация кинематической структуры станков с использованием типовых модулей / В.А. Данилов // СТИН.– 1999.– №7.– С. 9 – 15.
4. Врагов Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков: (Основы компнететики) / Ю.Д. Врагов. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
5. Данилов В.А. Общие принципы синтеза рациональных технологий формообразования сложных поверхностей резанием / В.А. Данилов // Мир технологий. – 2003. №1. – С. 61–71.
6. Федотенок А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А.А. Федотенок. – М.: Машиностроение, 1970. – 403 с.
7. Данилов В.А. Новые технологии формообразования профильных и прерывистых поверхностей резанием / В.А. Данилов // Инженер – механик. –2003. –№3(20). – С. 26-31.
8. Данилов В.А. Синтез внутренних связей кинематических групп при проектировании металлорежущих станков / В.А. Данилов // Машиностроение: Республиканский межведомственный сб. научных трудов, Вып. 25. – Мн: БНТУ, 2010. – С. 312–318.
9. Данилов В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В.А. Данилов – Мн.: Наука и техника, 1995. – 264 с.

УДК 621.9.06

Каштальян И.А.

### РЕАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫМИ ПРОЦЕССАМИ РЕЗАНИЯ НА СТАНКАХ С ЧПУ

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Беларусь*

*Рассмотрена задача повышения эффективности использования станков с числовым программным управлением (ЧПУ) путем создания адаптивных систем управления нестационарными процессами резания. Представлены математические модели и алгоритмы управления подачей в функции пути. Описано взаимодействие программных модулей, реализующих математические модели и алгоритмы управления подачей, с другими модулями микропроцессорной системы ЧПУ. Приведены примеры использования разработанных программных модулей при разработке систем адаптивного управления нестационарными процессами резания на токарных станках с ЧПУ.*

**Введение.** Современный этап развития машиностроительного производства характеризуется широким внедрением станков и станочных комплексов с ЧПУ. Оборудование с ЧПУ является сложным и дорогостоящим. Его приобретение всегда связано с большими финансовыми затратами. Вследствие этого проблема эффективного использования такого оборудования является актуальной для любого машиностроительного предприятия. Среди причин, снижающих эффективность использования станков с ЧПУ, выделяют нестабильность процесса резания, которая обусловлена рядом систематических и случайных факторов (нестабильность структуры и физико-механических свойств заготовок, нестабильность припуска, неоднородность пластической деформации при резании, изнашивание режущего инструмента). Однако современные станки с ЧПУ оснащены системами управления, которые ориентированы на управление процессами резания без учета факторов