

УДК 621.06.62

## МОДУЛЬНОЕ ПОСТРОЕНИЕ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ ПРИ ФУНКЦИОНАЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*д-р техн. наук, проф. В.А. ДАНИЛОВ*  
(Полоцкий государственный университет)

Показана значимость функционального проектирования и принципа преемственности технических решений при разработке станочного оборудования. Дано развитие модульного принципа его построения на этапе системно-структурного проектирования, включающего синтез кинематической структуры станка из модулей, создающих необходимые функциональные связи для обеспечения рациональных условий формообразования и резания. Рассмотрены методологические аспекты модульного построения формообразующих систем, отражающие принципы типизации, унификации и формирования состава модулей. Приведены примеры синтеза дифференциальных и бездифференциальных кинематических модулей с различным количеством конечных элементов и построения на их основе формообразующих систем станков. Показано, что структура модуля определяется количеством согласуемых им движений и типом кинематических связей, а взаимосвязанное выполнение параметрического и структурного синтеза обеспечивает рациональное построение кинематических модулей исходя из требований к процессу формообразования.

**Введение.** Разработка станочного оборудования включает этапы функционального и геометрического проектирования (рис. 1), уровни которых разделяются степенью общности (СО), абстракции принимаемого решения (СА) и степенью детализации (СД) разрабатываемого объекта [1; 2].

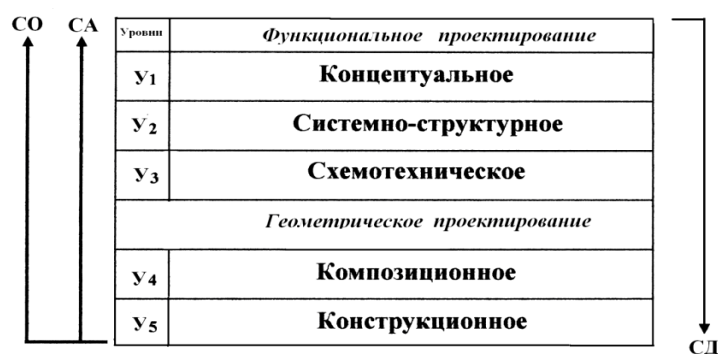


Рис. 1. Этапы и уровни проектирования станочного оборудования

Исходный этап функционального проектирования – концептуальное проектирование (уровень У<sub>1</sub>) – включает синтез способов и кинематики формообразования, общих и кинематических схем обработки, обоснование состава оборудования, т. е. его исполнительных систем (формообразующей, управляющей, инструментальной, транспортной и др.), выбор принципа построения и функционирования отдельных систем (например, типа приводов и системы управления, способа регулирования скорости исполнительного движения и т.п.), обеспечивающих потоки энергии, информации и материалов в обрабатывающей системе. Обеспечение требуемых характеристик проектируемого станка зачастую связано с разработкой принципиально новых технических решений. Например, переход от традиционного построения исполнительной системы на базе эталонов (прямолинейных и круговых направляющих) к системе с параллельной кинематикой обеспечивает инструменту до шести степеней свободы, в результате чего повышается универсальность станка.

Значимость функционального проектирования обусловлена тем, что допущенные здесь ошибки не могут быть компенсированы на последующих стадиях проектирования и производства станка. Например, необоснованный выбор при концептуальном проектировании нерационального метода обработки и кинематики формообразования, не обеспечивающего стабильные условия резания, не может быть компенсирован за счет применения современных систем управления и совершенствования конструкции станка.

Системно-структурное проектирование (уровень У<sub>2</sub>) включает в себя разработку структуры проектируемого оборудования исходя из принятых на этапе концептуального проектирования принципов функционирования его систем, их компонентного состава и связей между компонентами. Основным результатом выполнения этапа – разработка кинематической структуры станка.

Дальнейшая детализация технического решения осуществляется на этапе схмотехнического проектирования (уровень  $V_3$ ). Здесь, исходя из структурной схемы, конкретизируется структура проектируемого станка, определяются тип, состав и основные свойства структурных компонентов, уточняются связи между ними и функциональные зависимости, реализуемые разработанными принципиальными и функциональными схемами (кинематической и др.) станка.

Результаты функционального проектирования используются при выполнении этапов композиционного ( $V_4$ ) и конструкционного ( $V_5$ ) проектирования, итогом которых являются соответственно компоновка и конструкция (рабочий проект) станка.

Для сокращения объема и срока выполнения проектных работ, упрощения поиска оптимального решения целесообразно использовать системную модель проектирования, основанную на том, что каждому уровню ( $V_1...V_5$ ) соответствует определенный уровень дифференциации функций проектируемого объекта и реализующих их подсистем [2].

Следует отметить, что если решение задач геометрического проектирования в значительной степени алгоритмизировано и благодаря применению САПР автоматизировано [1], то функциональное проектирование, как правило, выполняется на интуитивном уровне. Для ускорения и повышения уровня проектирования актуальна разработка общих принципов решения типовых задач этого этапа. Методология решения задач концептуального проектирования, связанных с синтезом схем формообразования, общих и кинематических схем обработки, отражена в [3; 4].

В данном исследовании рассматриваются задачи системно-структурного проектирования формообразующих систем станочного оборудования для механической и физико-технической обработки, связанные с синтезом кинематической структуры, исходя из системной модели технологии формообразования, структуры способа обработки и положения, что кинематическая структура станка должна обеспечить как процесс формообразования поверхности, так и рациональные условия резания.

Решение задач базируется на принципе модульного проектирования, широко применяемом в станкостроении [5] и других областях машиностроения. В этом случае кинематическая структура станка формируется в виде множества кинематических модулей, обеспечивающих создание необходимых функциональных связей в формообразующей системе. Модульное построение предполагает применение этого принципа на разных стадиях проектирования станка. Так, при разработке кинематики используются кинематические модули [6], при синтезе компоновки – компоновочные «технологические» модули [7], при конструировании станка – конструкторские модули [5]. При этом в соответствии с принципом преемственности технических решений компоновочные и конструкторские модули строятся на основе кинематических модулей, что отражает взаимосвязь отдельных уровней функционального и геометрического проектирования, в данном случае уровней  $V_2$  и  $V_4$ . Поэтому синтез и оптимизация структуры кинематических модулей имеет первостепенное значение при разработке структурной схемы станка. К основным задачам системно-структурного проектирования следует отнести типизацию и формирование состава модулей, их структурный и параметрический синтез, построение функциональных связей в формообразующих системах.

**Типизация и формирование кинематических модулей.** Основой модульного построения формообразующих систем технологического оборудования для обработки изделий машиностроения механическими и физико-техническими методами служат системная модель технологий формообразования и структура способа обработки [8], исходя из которых определяются типы и формируется состав модулей формообразующей системы станка. Типизация модулей основана на известном представлении технологии формообразования как совокупности потоков энергии, информации, материалов, обеспечивающих обработку изделия. Соответственно можно выделить энергетические, информационные, манипуляционные и обрабатывающие модули.

Энергетические модули служат для преобразования и передачи энергии в обрабатывающей системе от источника энергии исполнительным органам. К энергетическим модулям относятся, например, встраиваемые в технологическое оборудование источники постоянного тока, частотные преобразователи для питания регулируемых двигателей переменного тока.

Информационные модули механического, электромеханического, и немеханического и комбинированного типов обеспечивают хранение, преобразование и передачу информации в процессе формообразования. Механическими информационными модулями являются, например, штампы, обеспечивающие хранение и передачу информации на заготовку при ее пластическом деформировании, плоские и объемные копии аналоговых систем управления станками. К электромеханическим информационным модулям можно отнести устройства памяти систем циклового программного управления технологическим оборудованием. Современными немеханическими информационными модулями служат программируемые контроллеры и устройства числового программного управления.

Манипуляционные (кинематические) модули входят в кинематическую подсистему формообразующей системы и предназначены для создания настроечных, вспомогательных и рабочих относительных перемещений инструмента и заготовки. Обрабатывающие модули служат для энергетического воздействия инструмента на материал заготовки, которое может осуществляться механическими и физико-техническими методами. К ним относятся, например, фрезерные и сверлильные головки, устройства для лазерной, плазменной и гидроабразивной резки.

Формирование состава модулей обусловлено функциями конкретной системы, включающей данные модули. Так, кинематическая подсистема станка, обеспечивающая исполнительные перемещения его рабочих органов, может включать в себя модули механического, немеханического или комбинированного типов, которые в соответствии со структурой создаваемых движений исполнительных органов могут быть бездифференциального или дифференциального типов [6]. Таким образом, формообразующая система станка определяется в значительной мере составом и структурой кинематических модулей.

Универсальность формообразующей системы определяется множеством реализуемых на станке методов обработки (формообразования и резания). Каждый из них осуществляется соответствующим инструментальным модулем, поэтому обрабатывающая подсистема формообразующей системы включает множество необходимых инструментальных модулей. Например, обрабатывающая система 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 общем случае обрабатывающие модули могут быть в составе станка постоянными и сменными. Например, широкоуниверсальный станок модели ВС-50 производства Витебского станкостроительного завода «Вистан» имеет сменные обрабатывающие модули, позволяющие реализовать различные схемы обработки плоских, профильных, зубчатых, винтовых поверхностей стандартными и специальными червячными, дисковыми, цилиндрическими, ротационными, комбинированными и другими инструментами [9].

Необходимость применения как постоянных, так и сменных модулей следует учитывать при проектировании кинематической структуры и компоновки, конструировании узлов станка. Выполнение этого условия в первом случае связано с типизацией структур кинематических связей, выделением и анализом типовых кинематических модулей, разработкой структур внешних и внутренних связей на базе типовых кинематических модулей, 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, необходимых для создания определенного исполнительного движения [7]. Количество технологических модулей, формируемых из блоков данной компоновкой, определяется его кинематической структурой, устанавливающей связи между исполнительными органами и источниками движения.

Эффективность модульного проектирования повышается при наличии типовых решений, унификации модулей. Рассмотрим эту задачу применительно к кинематическим модулям, обеспечивающим необходимые функциональные связи в формообразующей системе.

**Структурный синтез кинематических модулей.** Кинематические связи в формообразующей системе формируются на базе типовых кинематических модулей. Под типовым кинематическим модулем понимается совокупность кинематических элементов с вращающимися конечными звеньями, обеспечивающая настройку исполнительного движения по определенным параметрам [6]. Структура модуля зависит от количества конечных звеньев, источников движения и согласуемых модулем движений. При проектировании кинематики станков в большинстве случаев необходимы кинематические модули с двумя и тремя конечными звеньями, обеспечивающие согласование соответственно двух и трех движений.

По структуре типовые кинематические модули могут быть дифференциальные и бездифференциальные, а по исполнению – механические, немеханические (электрические, гидравлические) и комбинированные (электромеханические, мехатронные) [6]. Структуры типовых бездифференциальных и дифференциальных кинематических модулей с двумя конечными звеньями рассмотрены в [6; 8]. Применение конкретного кинематического модуля зависит от требований к точности, универсальности и степени автоматизации станка, его системы управления и других факторов.

Конечные звенья кинематического модуля могут быть ведущими и ведомыми (рис. 2, а, б) или только ведущими (рис. 2, в, г, д). Первый случай характерен для модулей механического (рис. 2, а) и электронного (рис. 2, б) типов. Во втором случае источники энергии (двигатели  $M_1$  и  $M_2$ ) являются структурными элементами самого модуля, который может быть электрическим (рис. 2, в), мехатронным (рис. 2, г) или комбинированным, например, электромеханическим (рис. 2, д), т.е. составленным из типовых электрического и механического модулей.

Бездифференциальный механический модуль (рис. 2, а) содержит между конечными звеньями 1 и 2 последовательно расположенные орган настройки постоянного передаточного отношения  $i_0$  и орган настройки  $i_y$  с переменным передаточным отношением. Последний задает закон и диапазон изменения отношения скоростей движений конечных звеньев модуля, а  $i_0$  – абсолютные значения этого отношения. Ведущее звено рассматриваемого модуля соединяется с источником движения, а ведомое звено – с исполнительным органом станка кинематической цепью, обеспечивающей за счет введения соответствующих механизмов требуемый характер его движения (поступательный, возвратно-поступательный, непрерывный, прерывистый, и т.д.). При таком представлении на базе одного типового кинематического модуля могут быть построены различные исполнительные модули и кинематические связи, настраиваемые по общей методике.

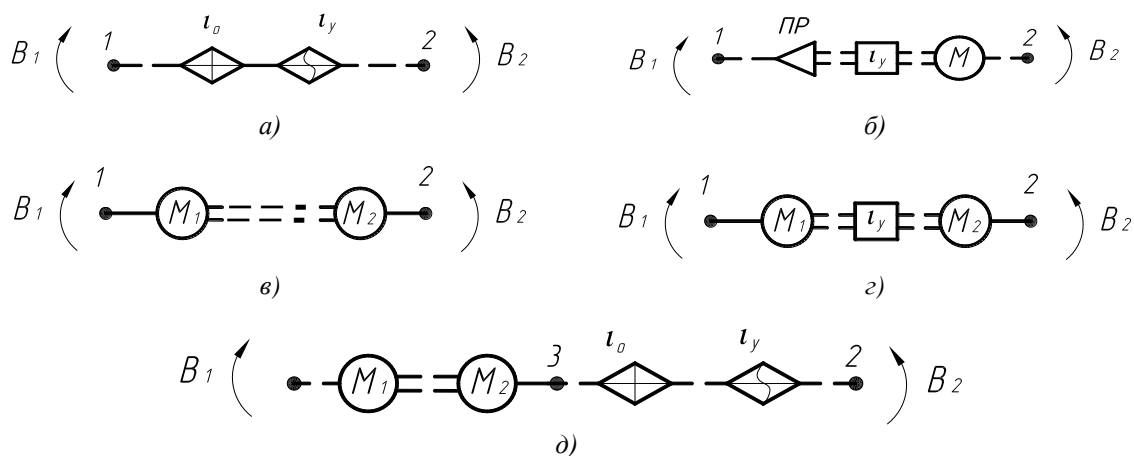


Рис. 2. Структура бездифференциальных кинематических модулей:  
а, б – с одним ведущим и одним ведомым конечными звеньями;  
в, г, д – с двумя ведущими конечными звеньями

Бездифференциальные механические кинематические модули, содержащие последовательно расположенные между конечными звеньями органы настройки передаточного отношения, в том числе изменяемого непрерывно, могут использоваться для построения как внутренних, так и внешних связей. В первом случае конечные звенья модуля соединяются с исполнительными органами, например, одно со шпинделем, а другое с суппортом токарно-винторезного станка. Наличие органа настройки с непрерывно изменяемым по определенному закону передаточным отношением (на рисунке 2, а орган  $i_y$ ) позволяет обрабатывать, например, винтовые поверхности переменного шага. Необходимость в органе настройки  $i_y$  отпадает при постоянном отношении скоростей исполнительных органов.

Если бездифференциальный механический модуль расположен во внешней связи, то одно его конечное звено соединяется с источником движения, например, двигателем, а другое со звеном соединения внешней и внутренней связей кинематической группы. При оснащении модуля органом настройки с непрерывно изменяемым передаточным отношением обеспечивается требуемое регулирование скорости исполнительного органа (например, частоты вращения шпинделя) для стабилизации скорости резания при изменении диаметра обрабатываемой поверхности. При использовании регулируемого двигателя функцию этого органа настройки выполняет устройство управления двигателем.

Бездифференциальные немеханические модули основаны на применении регулируемых двигателей в станках с различными системами управления. Например, кинематический модуль электронного типа (рис. 2, б) снабжен регулируемым двигателем  $M$ , управляемым устройством  $i_y$ . Преобразование вращательного движения ведущего звена 1 во вращение ведомого звена 2 осуществляется с помощью датчика-преобразователя  $ПП$ , связанного с устройством  $i_y$ . Применение такого модуля характерно для исполнительных систем с ведущей координатой (например, токарно-винторезных станков с ЧПУ), когда один исполнительный орган станка (шпиндель) получает независимое перемещение (ведущая координата), а его связь с движением второго исполнительного органа (суппорта) обеспечивается описанной системой.

Кинематический модуль электрического типа (рис. 2, в) содержит два синхронных электродвигателя  $M_1$  и  $M_2$  с частотным регулированием. Мехатронный кинематический модуль (рис. 2, г) позволяет одновременно управлять скоростями движений двух исполнительных органов, осуществляемых от от-

дельных электродвигателей по алгоритму, реализуемому системой управления, что характерно для различных станков с контурными системами ЧПУ.

В рассмотренных бездифференциальных модулях связь между частотами  $n_1$  и  $n_2$  конечных звеньев 1 и 2 выражается уравнением:

$$n_2 = n_1 a i_y i_0, \quad (1)$$

где  $a$  – постоянная кинематической цепи.

Зависимость (1) позволяет определить закон изменения передаточного отношения  $i_y$  модуля в соответствии с требуемым изменением величины  $n_2$ .

Дифференциальные кинематические модули применяются в кинематических связях, если движение исполнительного органа станка составное, т.е. представляет сумму нескольких (обычно двух) движений. В этом случае движение  $B_2$  конечного звена модуля представляет сумму равномерных или равномерного и неравномерного движений. Каждое из слагаемых движений может создаваться общим или индивидуальным источником движения. В первом случае модуль имеет одно ведущее конечное звено 1 (рис. 3, а, б), а во втором (рис. 3, в, з) – два таких звена 1 и 4.

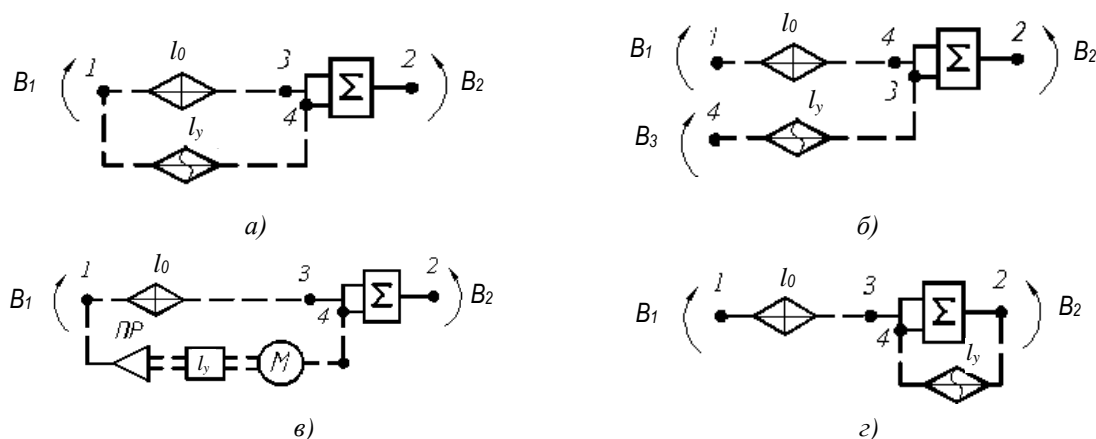


Рис. 3. Структура дифференциальных кинематических модулей: с одним ведущим звеном (а, б); с двумя ведущими звеньями (в, з)

Дифференциальный модуль комбинированного (электромеханического) типа (рис. 3, б) содержит между звеном 1 и суммирующим механизмом  $\Sigma$  две параллельные кинематические цепи: механическую с органом настройки  $i_0$  для настройки составляющей  $B_2'$  движения  $B_2$  и мехатронную цепь  $1 - \Pi_p - i_y - M - 3 - \Sigma$  для настройки его составляющей  $B_2''$ . Применение такого модуля целесообразно при неравномерном составном вращательном или поступательном движении исполнительного органа. На базе данного модуля основана, например, кинематика станков для обработки винтовых поверхностей переменного шага и зубофрезерных станков для нарезания колес с модифицированными зубьями [8].

Частоты вращения конечных звеньев модулей с одним ведущим звеном связаны между собой зависимостью

$$n_2 = n_1 (\pm a i_0 \pm b i_y), \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  – постоянные кинематических цепей  $1 - i_0 - \Sigma - 2$  и  $1 - i_y - \Sigma - 2$  соответственно.

В качестве ведущего звена может использоваться ведомое конечное звено модуля, который в этом случае строится на базе замкнутого суммирующего механизма (см. рис. 3, з), что позволяет упростить кинематическую схему станка и повысить его кинематическую точность. Такое решение рационально, например, для винторезных цепей с коррекционными устройствами. Связь между частотами движений  $B_1$  и  $B_2$  в этом случае выражается зависимостью, позволяющей определить требуемый закон изменения передаточного отношения  $i_y$  модуля,

$$n_2 = n_1 i_0 (\pm l \pm d i_y), \quad (3)$$

где  $l, d$  – постоянные кинематической цепи.

На основе рассмотренных бездифференциальных и дифференциальных типовых кинематических модулей могут быть построены кинематические модули для согласования движений трех исполнительных органов, например, двух вращающихся (шпинделей) и одного поступательно перемещающегося, что имеет место в зубофрезерных станках. На рисунке 4 изображены структурные схемы кинематических модулей такого типа. От модулей, изображенных на рисунках 2, а и 3, а, они отличаются возможностью подключения к промежуточному звену 3 кинематической цепи модуля третьего исполнительного органа станка. На базе этих модулей могут быть построены соответственно бездифференциальная и дифференциальная кинематические структуры формообразующих систем станков с тремя исполнительными органами, например, зубофрезерных.

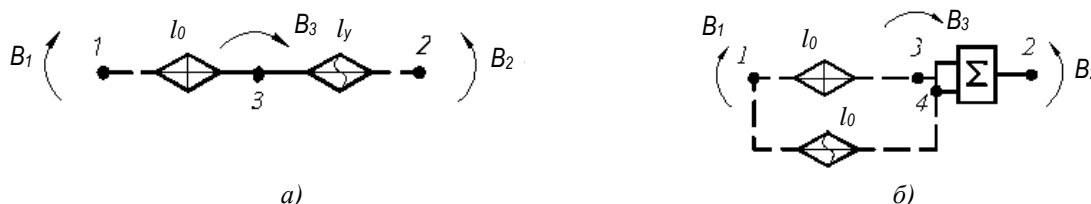


Рис. 4. Структура бездифференциального (а) и дифференциального (б) кинематических модулей с тремя конечными звеньями

Построение функциональных связей в формообразующей системе на базе немеханических кинематических модулей позволяет сократить протяженность кинематических цепей и повысить их точность за счет уменьшения числа передач. Рассмотрим это на примере зубодолбежного станка [10], кинематическая структура которого основана на применении бездифференциальных кинематических модулей немеханического и комбинированного типов (рис. 5).

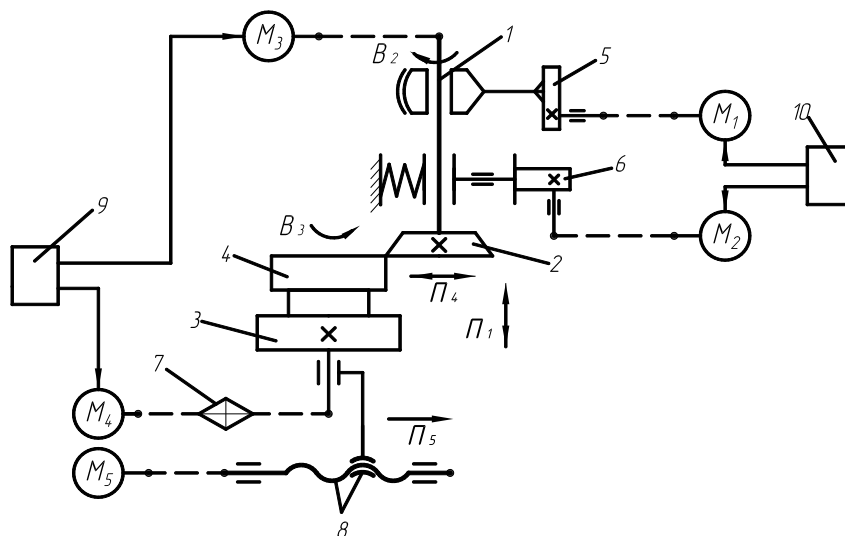


Рис. 5. Кинематическая структура зубодолбежного станка

Шпиндель 1, несущий долбяк 2, кинематически связан с синхронным электродвигателем  $M_3$  и установлен с возможностью вращения  $B_2$  вокруг своей оси и возвратно-поступательного движения  $\Pi_1$  вдоль этой оси от синхронного электродвигателя переменного тока  $M_1$  посредством преобразующего механизма 5. Шпиндель 1 имеет также возможность возвратно-поступательного (качательного) движения  $\Pi_4$  в радиальном направлении с помощью кулачкового механизма 6 от синхронного электродвигателя  $M_2$ .

Стол 3, несущий заготовку 4 нарезаемого зубчатого колеса, кинематически через орган настройки 7 (гитару сменных зубчатых колес) связан с синхронным электродвигателем  $M_4$  и установлен с возможностью вращения вокруг своей оси и радиального перемещения  $\Pi_5$  с помощью тягового устройства 8 и регулируемого двигателя  $M_5$ . Двигатель  $M_4$  подключен к преобразователю 9 частоты тока.

Движения  $B_2$  и  $B_3$  соответственно шпинделя  $I$  и стола  $3$  связаны между собой электромеханической кинематической цепью, основанной на комбинированном кинематическом модуле (рис. 3, в), в состав которого входят типовой электрический кинематический модуль (см. рис. 3, а) с электрически связанными синхронными двигателями  $M_3$  и  $M_4$ , подключенными к общему для них частотному преобразователю  $9$ , и механический кинематический модуль с одним органом настройки  $7$  (гитарой сменных зубчатых колес). Конечные звенья модуля посредством одиночных передач связаны с исполнительными органами станка – шпинделем и столом.

При переключении преобразователя  $9$  пропорционально частоте тока одновременно изменяются, но остаются равными друг другу частоты двигателей  $M_3$  и  $M_4$ , благодаря чему сохраняется постоянным отношение частот вращательных движений долбяка и заготовки, задаваемое органом настройки  $7$  (гитарой сменных зубчатых колес). Передаточное отношение  $i$  гитары настраивается в соответствии с числом нарезаемых зубьев  $z$ :  $i = Cz_1/z$ , где  $C$  – постоянная механической части кинематической цепи между шпинделем  $I$  и столом  $3$ ;  $z_1$  – число зубьев долбяка.

Движение  $П_4$  обеспечивает отвод долбяка от заготовки во время его обратного хода и подвод к ней перед выполнением рабочего хода, поэтому движения  $П_1$  и  $П_4$  должны быть согласованы и осуществляться с одинаковой частотой двойных ходов. Согласование указанных движений осуществляется функциональной связью на базе типового электрического модуля (см. рис. 2, а), снабженного синхронными двигателями  $M_1$  и  $M_2$ , подключенными к общему частотному преобразователю  $10$ . Одно конечное звено модуля кинематически связано с механизмом  $5$ , преобразующим вращательное движение в возвратно-поступательное, а второе конечное звено соединено с кулачковым механизмом  $6$ . Частотным преобразователем  $10$  обеспечиваются равные по значению частоты вращательных движений двигателей  $M_1$  и  $M_2$  и, соответственно, одинаковые частоты двойных ходов движений  $П_1$  и  $П_4$  долбяка  $2$ .

Переключением частотного преобразователя  $9$  и, следовательно, частоты  $n_{33}$  вращения электродвигателя  $M_3$  настраивается частота  $n_1$  вращения шпинделя  $I$  (круговая подача  $S_{кр}$ ) в соответствии с заданным значением круговой подачи  $n_1 = S_{кр}/\pi m z_1$ , где  $m$  – модуль нарезаемого зубчатого колеса. Значения частот  $n_1$  и  $n_{33}$  связаны между собой зависимостью  $n_{33}/i_0$ , где  $i_0$  – передаточное отношение кинематической цепи между электродвигателем  $M_3$  и шпинделем  $I$ . Так как электродвигатель  $M_4$  подключен к тому же преобразователю  $9$  частоты тока, что и двигатель  $M_3$ , то оба двигателя, будучи синхронными, имеют равные частоты вращения. Благодаря этому и наличию между двигателем органа настройки в виде гитары сменных зубчатых колес обеспечивается требуемое согласование вращательных движений долбяка и заготовки. Скорость движения  $П_5$  настраивается регулированием двигателя  $M_5$ .

Благодаря тому, что приводы всех исполнительных органов станка оснащены индивидуальными электродвигателями, этот станок, как и станки с ЧПУ, имеет простую механику. Его преимуществом является меньшая стоимость, что обеспечивается применением в кинематической цепи обкатки электромеханического модуля.

**Параметрический синтез кинематических связей.** Цель параметрического синтеза – расчет настройки внешних и внутренних кинематических связей, обеспечивающих формирование заданной поверхности при рациональных условиях резания. Основой для параметрического синтеза кинематических связей является кинематическая структура станка как совокупность кинематических групп, создающих необходимые для формообразования исполнительные движения. Это требует проведения параметрического синтеза для каждой группы с учетом межгрупповых связей. Поскольку основными структурными компонентами кинематической группы являются внутренняя и внешняя связи, решающие различные задачи в процессе формообразования, то параметрический синтез следует проводить для обеих связей в отдельности, исходя из решаемых ими задач.

Как известно, внешняя связь кинематической группы обеспечивает скорость исполнительного движения. Поэтому определенные в результате параметрического синтеза параметры должны обеспечить постоянство скорости исполнительного движения или изменение ее по заданному закону, например, для обеспечения стабильного стружкодробления при точении вязких материалов. При синтезе внутренней связи, обеспечивающей траекторию исполнительного движения, ее параметры определяются исходя из требуемой формы траектории.

При проектировании кинематической структуры оборудования на базе кинематических модулей задача параметрического синтеза сводится к определению параметров расположенных в них органов настройки исходя из исходных перемещений ведущих и результирующих перемещений ведомых исполнительных органов для заданной структуры модуля. В противном случае необходим структурно-параметрический синтез, при котором вначале разрабатывается структура модуля, а затем определяются параметры его структурных элементов. Кроме структуры модуля для решения задач параметрического синтеза должна быть определена целевая функция, отражающая требования к его функционированию,

например, закон движения исполнительного органа станка, точность формы и размеров обработанной поверхности и т. п.

Для решения рассматриваемой задачи целесообразно использовать методику кинематической настройки станков, согласно которой для определения искомого параметра органа настройки рассматриваемой кинематической цепи выполняются следующие процедуры:

- составляются расчетные перемещения, связывающие исходное перемещение ведущего звена и результирующее перемещение ведомого звена;
- составляется уравнение кинематической цепи, включающее указанные перемещения ведущего и ведомого звеньев, постоянные и настраиваемые параметры этой цепи;
- решением уравнения кинематической цепи устанавливается зависимость для расчета параметра органа настройки (формула настройки).

Требуемая функциональная зависимость между перемещениями связываемых рассматриваемой кинематической цепью исполнительных органов определяется на основе анализа схемы формообразования поверхности. Исходя из анализа схемы формообразования устанавливаются также настраиваемые параметры, влияющие на траекторию исполнительного движения. Например, форма циклоидальной кривой, образуемой двумя согласованными вращательными движениями производящей точки, зависит от соотношения угловых скоростей этих вращательных движений, расстояния между осями этих движений и расстояния между производящей точкой и осью вращения. Указанные параметры определяются в результате параметрического синтеза в зависимости от формируемой линии. Учитывая, что к обработанной поверхности предъявляются определенные требования к точности формы и размеров, при параметрическом синтезе должны быть установлены как номинальные значения настраиваемых кинематических и геометрических параметров формообразующей системы, так и допуски на них.

При параметрическом анализе определяются значения параметров, обеспечивающие целевую функцию проектируемого объекта. Задача решается методом математического моделирования. По результатам параметрического синтеза может потребоваться изменение кинематической структуры формообразующей системы, например, замена бездифференциальной структуры дифференциальной за счет использования соответствующего кинематического модуля.

Рассмотрим задачу параметрического синтеза на примере кинематического профилирования обработанной поверхности множеством пересекающихся кривых, что имеет место при обработке поверхностей с периодически повторяющимся профилем, например, некруглых валов. Формирование такого профиля обеспечивается двумя согласованными вращательными движениями, создаваемыми кинематической группой на базе бездифференциального механического кинематического модуля.

Определим основные параметры схемы профилирования (рис. 6), необходимые для настройки соответствующей кинематической цепи формообразующей системы станка.

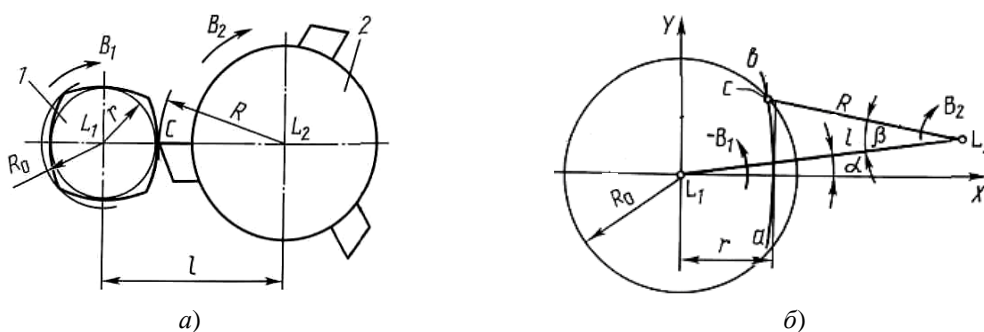


Рис. 6. Формирование многогранной поверхности вращающимся многолезвийным инструментом:  
а – кинематическая схема обработки; б – схема профилирования

Некруглый профиль, вписанный в окружность радиусом  $R_0$ , образуется при сообщении заготовке 1 и режущему инструменту 2 согласованных вращательных движений  $B_1$  и  $B_2$  с угловыми скоростями, соответственно  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , вокруг параллельных осей  $L_1$  и  $L_2$ , расстояние между которыми  $l = R + r$ , где  $R$  – расстояние от вершины  $C$  резца до оси  $L_2$  вращения инструмента,  $r$  – радиус вписанной в профиль окружности.

Производящая точка  $C$  режущего зуба инструмента в относительном движении перемещается по траектории  $ab$  (рис. 6, б), параметрические уравнения которой

$$\begin{cases} x = l \cos \alpha - R \cos(\beta - \alpha); \\ y = l \sin \alpha + R \sin(\beta - \alpha), \end{cases} \quad (4)$$



где  $\beta$  – угол поворота точки  $C$  вокруг оси  $L_2$ , соответствующий углу  $\alpha$  поворота заготовки.

Отношение  $\beta/\alpha$  должно обеспечивать процесс непрерывного деления.

Анализ зависимости (4) позволяет определить значения параметров схемы обработки для формирования профиля из кривых определенной формы. Например, при  $\beta = \alpha$  кривые профилируются по окружности, так как траектория производящей точки  $C$  описывается уравнением

$$(x + R)^2 + y^2 = l^2. \quad (5)$$

При  $\beta = 2\alpha$  траектория точки  $C$  представляет собой эллипс, так как описывается системой уравнений

$$\begin{cases} x = r \cos \alpha; \\ y = (r + 2R) \sin \alpha. \end{cases} \quad (6)$$

Таким образом, при профилировании обработанной поверхности дугами окружности или эллипса внутренняя связь группы профилирования может быть основана на механическом типовом кинематическом модуле (см. рис. 2, а), оснащенный одним органом настройки  $i_0$ , передаточное отношение которого настраивается равным 1 при профилировании обработанной поверхности дугами окружности или равным 2 при ее профилировании дугами эллипса.

Рассмотрим случай получения поперечного сечения обработанной поверхности в виде правильного многоугольника с прямыми сторонами. В этом случае формообразующая точка  $C$  должна перемещаться по прямой, что обеспечивается при выполнении следующего условия:

$$(R + r) \cos \alpha - R \cos(\beta - \alpha) - r = 0, \quad (7)$$

откуда

$$\beta/\alpha = 1 + \sqrt{1 + r/R}. \quad (8)$$

Совмещение процессов формообразования и деления возможно, если

$$i = m/Pz, \quad (9)$$

где  $m$  – количество граней;  $z$  – число резцов в головке;  $P$  – целое число, задающее последовательность обработки [8].

Как следует из (8), на участке формирования плоских граней отношение угловых скоростей инструмента и заготовки не равно двум, а для выполнения условия деления частота вращения инструмента должна быть в два раза больше частоты вращения заготовки. Выполнение этих противоречивых условий возможно при неравномерной скорости вращения инструмента или заготовки, т. е. изменении ее по определенному закону, что технически проще достигается при построении формообразующей системы станка на базе дифференциального кинематического модуля, например, изображенного на рис 3, а. Передаточное отношение его органа настройки  $i_0$  в этом случае задается равным 2, а изменение передаточного отношения обеспечивается органом настройки  $i_y$ . Установленная необходимость замены бездифференциального кинематического модуля дифференциальным подтверждает отмеченное выше положение о возможной модификации структуры кинематического модуля по результатам его параметрического синтеза.

**Заключение.** Анализ взаимосвязи уровней проектирования станочного оборудования показывает целесообразность модульного принципа построения его структурных компонентов при преемственности технических решений на различных этапах проектирования. Его реализация при системно-структурном проектировании связана с построением кинематической структуры станка в виде совокупности кинематических модулей и построением на их основе связей, обеспечивающих функционирование формообразующей системы станка. Основой для типизации и формирования состава кинематических модулей при синтезе формообразующей системы является представление технологии формообразования в виде потоков энергии, материалов, информации и структуры способа формообразующей обработки. Структура разрабатываемого кинематического модуля определяется количеством согласуемых им движений и типом кинематических связей в формообразующей системе. Взаимосвязанное выполнение параметрического и структурного синтеза обеспечивает рациональное построение кинематических модулей исходя из требований к процессу формообразования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев, Г.Н. Автоматизация проектирования металлорежущих станков / Г.Н. Васильев. – М.: Машиностроение, 1987. – 280 с.
2. Данилов, В.А. Системный подход к проектированию способов формообразующей обработки / В.А. Данилов, В.А. Терентьев // Современные методы проектирования машин. – Минск: БНТУ, 2004. – Вып. 2, т. 5.
3. Данилов, В.А. Синтез рациональных общих схем обработки при проектировании станков / В.А. Данилов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – № 11. – С. 89 – 96.
4. Данилов, В.А. Методологические основы синтеза кинематики формообразования и кинематических схем обработки при функциональном проектировании станочного оборудования / В.А. Данилов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2012. – № 3. – С. 2 – 10.
5. Аверьянов, О.И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ / О.И. Аверьянов. – М.: Машиностроение, 1982. – 358 с.
6. Данилов, В.А. Синтез и оптимизация кинематической структуры станков с использованием типовых модулей / В.А. Данилов // СТИН. – 1999. – № 7. – С. 9 – 15.
7. Врагов, Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков: (Основы компоновки) / Ю.Д. Врагов. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
8. Данилов, В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В.А. Данилов. – Минск: Наука и техника, 1995. – 264 с.
9. Данилов, В.А. Новые технологии формообразования профильных и прерывистых поверхностей резанием / В.А. Данилов // Инженер-механик. – 2003. – № 3 (20). – С. 26 – 31.
10. Зубодолбежный станок: пат. 3999 Респ. Беларусь, МПК(2006) В 23F 5/00 / В.А. Данилов; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № и 20070329; заявл. 02.05.2007; опубл. 01.08.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007.

Поступила 31.01.2013

## THE MODULAR STRUCTURE OF FORMING SYSTEMS IN THE FUNCTIONAL DESIGN OF MACHINE TOOLS

V. DANILOV

*The importance of functional design and the principle of continuity in the development of technical solutions of machine tools is shown. The development of its modular construction during systematic structural design, including synthesis of the kinematic structure of the machine modules that creates the necessary functional relationships to ensure rational conditions of forming and cutting is given. Methodological aspects of modular forming systems that reflect the principles of typing, unification and formation of modules are considered. The examples of the synthesis of differential and non-differential kinematic modules with different number of finite elements and forming machine systems built on their base are shown. The structure of the module is determined by the number of movements coordinated by it and the type of kinematic constraints and interrelated performance of parametric and structural synthesis provides a rational construction of kinematic modules based on the requirements in the process of formation.*