

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.9.06+372.8

DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-2-12

СОВРЕМЕННАЯ ПАРАДИГМА ПОЗНАНИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

канд. техн. наук, проф. А.И. ГОЛЕМБИЕВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Предложена парадигма познания металлорежущих станков, соответствующая постулатам механики – принципу разветвления энергии движения в цепях и принципу возможных перемещений. Описана методология синтеза (создания) и анализа кинематической структуры металлорежущих станков. Представлены основы теории формообразования реальных поверхностей в машиностроении. Дано понятие о классах воспроизведения реальных поверхностей. Проанализировано функциональное проектирование, или синтез кинематической структуры металлорежущих станков по функции, задаваемой способами формообразующей обработки. Рассмотрено использование парадигмы познания при анализе кинематических схем металлорежущих станков.

Ключевые слова: металлорежущие станки, парадигма познания, методология парадигмы, способ формообразующей обработки, функциональное проектирование, частная кинематическая структура металлорежущих станков, обобщенная кинематическая структура металлорежущих станков, анализ кинематической схемы известного станка.

Введение. С точки зрения науки принципиальной особенностью ее развития в 30-е годы XX столетия выступает общая теория систем. Биолог-теоретик и философ Л. фон Берталанфи, автор этой теории, так определил ее сущность [1]: «Общая теория систем – это логико-математическая область, задачей которой является формулирование и вывод общих положений, возможных при рассмотрении систем вообще». Наука о системах занимается свойствами отношений исследуемых системных объектов и интеграцией с основанными на эксперименте традиционными научными дисциплинами. Закономерность возникновения науки о системах можно объяснить тем, что к моменту ее появления в различных областях теории и практики, основанных на экспериментальных исследованиях, сложился значительный массив совокупностей операций теоретического и практического освоения действительности, подчиненных решению конкретной задачи. Эта наука содержит минимальное количество допущений, а ее основы базируются на логике, что позволяет отнести данную научную дисциплину к точным наукам.

Общая теория систем стала исходной базой синергетики – нового объединяющего направления в современной науке, возникшей в конце 70-х годов XX столетия. Предложенный физиком Г. Хакеном, создателем синергетического направления, термин «синергетика» (Sinergeia) происходит от греческих слов («син» – совместный; «эргос» – действовать) [2]. Поэтому синергетика – это наука о совместном, согласованном поведении многих элементов как единого целого в составе сложной системы [3]. Синергетику, по Г. Хакену, можно рассматривать как часть общего системного анализа, поскольку и в синергетике, и в системном анализе основной интерес представляют общие принципы, лежащие в основе структуры, и функции (принцип работы) систем различной природы. Общая теория систем и расширяющая ее синергетическая концепция – это по существу фундамент эволюционного естествознания, который позволяет говорить о возникновении единого языка инженера, естествознателя и гуманитария.

Основополагающее понятие системной концепции – это система. Известны попытки дать ей однозначное определение. Как правило, они не альтернативны, а взаимно дополняют друг друга. Поэтому воспользуемся известным определением системы, наиболее приемлемым для парадигмы познания станочного оборудования [4]. Системой назовем совокупность целесообразно организованных, функционально связанных элементов, участвующих в процессе достижения определенной цели, выступающую по отношению к другим системам и окружающей среде как нечто единое. Качественная определенность системы обусловлена ее структурой и функцией. Под структурой будем понимать схему связей и отношений между элементами системы, а под функцией – целенаправленное поведение (функционирование) системы, или порядок осуществления процесса. Из приведенного определения системы следует, что любой способ формообразующей обработки и реализующая его технологическая машина, например, металлорежущий станок, могут быть отнесены к категории системных в том случае, если они обладают целостностью, а их свойства и функция не сводятся непосредственно к свойствам и функциям составляющих их элементов. В патентоведении виртуальное (способ формообразующей обработки) и реальное (технологическая машина, например, металлорежущий станок) технические решения связаны между собой общим творческим или изобретательским замыслом.

Основная часть. Методология современной парадигмы познания металлорежущих станков. С точки зрения теории технических систем (частная теория общей теории систем) металлорежущий станок можно рассматривать в виде объединения трех подсистем: кинематической структуры, подсистемы управления и подсистемы

компоновки, или несущей подсистемы. Однако первичной базой большинства конструкций металлорежущих станков является кинематическая структура, т.к. назначение такой технологической машины – создание относительных движений инструмента и заготовки, необходимых для получения заданных поверхностей на твердом теле. Поэтому, как правило, познание металлорежущих станков осуществляется посредством изучения их кинематической структуры.

Несмотря на разнообразие металлорежущих станков, предназначенных для выполнения не только различных, но и однотипных технологических операций, кинематическая структура любого из них базируется на ряде основных достаточно общих кинематических закономерностей, присущих всем станкам. В конструкции металлорежущих станков кинематическая структура выражается кинематической схемой. Развитость ее, в первую очередь, зависит как от сложности воспроизводимых поверхностей, так и от количества исполнительных органов, используемых источников энергии движения и подсистемы управления.

Методология рассматриваемой парадигмы включает три логически связанные части: основы теории формообразования реальных поверхностей при формообразующей обработке, функциональное проектирование кинематической структуры станочного оборудования по функции, задаваемой соответствующим способом формообразующей обработки, и анализ обобщенных структурных и кинематических схем станков.

Основы теории формообразования реальных поверхностей. Форма любой детали есть замкнутое пространство, ограниченное реальными геометрическими поверхностями, которые образованы в результате обработки тем или иным способом, например, резанием, штамповкой, литьем и т.д. Исходя из этого, автор теории кинематической структуры металлорежущих станков показал [5], что теоретически процесс формирования реальных поверхностей на станках аналогичен процессу образования идеальных поверхностей в проективной геометрии, т.е. базируется на идеальных геометрических представлениях. Любая геометрическая поверхность – это след движения одной производящей линии, называемой образующей, по другой производящей линии, называемой направляющей. Производящие линии на металлорежущих станках образуются посредством вспомогательных элементов в виде материальной точки или линии, материализованной на режущей кромке инструмента, за счет согласованных относительных движений заготовки и инструмента. Различные инструменты, например, токарный резец, имеет один вспомогательный элемент, другие, например, червячная фреза, – несколько последовательно расположенных вспомогательных элементов. По существу, вспомогательный элемент – это часть режущих кромок, перемещающихся по воспроизводимым линиям в процессе формообразования реальных поверхностей.

Вспомогательный элемент будем рассматривать как множество материальных точек M_{ε} . Тогда в общем виде совокупность вспомогательных элементов любого инструмента – это вполне определенный класс P множеств M_{ε} :

$$P = \{M_{\varepsilon}\}_i, (i = 1, 2, 3, \dots k).$$

Класс P – это математическое представление вспомогательных элементов любого инструмента при формообразующей обработке. Будем называть класс P характеристическим образом инструмента, т.к. именно этот класс определяет поведение производящих линий в процессе формообразования производящих линий.

На металлорежущих станках производящие линии, как правило, образуются (имитируются) непрерывно в течение всего времени формообразования поверхности. В процессе непрерывной имитации обеих производящих линий и образуется с помощью резания требуемая поверхность.

На языке теории множеств воспроизводящие линии рассматриваются как вполне определенные множества точек M_o и M_n . Тогда любая поверхность в произвольный момент времени – это произведение двух одномерных множеств, каждое из которых является однозначным отображением характеристического образа инструмента на производящие (виртуальные) линии. На этой основе в работе [4] иллюстрируются и подробно рассматриваются, как во времени образуются одномерные множества, а именно образующая и направляющая. В итоге решения данной задачи получено многообразие осуществимых классов образования реальных поверхностей на вербальном языке и в скобках на языке теории множеств при обработке на металлорежущих станках: касание–касание ($P-P$), касание–след ($P-H^C$), касание–обкат ($P-H^K$), след–касание (H^C-P), след–след (H^C-H^C), след–обкат (H^C-H^K), обкат–касание (H^K-P), обкат–след (H^K-H^C), обкат–обкат (H^K-H^K), копирование–касание ($E-P$), копирование–след ($E-H^C$), копирование–обкат ($E-H^K$), где P , H^C , H^K , E – прерывистый, непрерывный при скольжении, непрерывный при качении, единовременный классы воспроизведения образующей и направляющей при формообразующей обработке.

Функциональное проектирование кинематической структуры станочного оборудования по функции, задаваемой соответствующим способом формообразующей обработки. В этом случае функциональное проектирование пересекается с научно-технической экспертизой изобретений, поскольку позволяет проследить путь создания, или «изобретения», виртуального технического решения – способа формообразующей обработки, и реального технического решения – кинематической структуры металлорежущего станка, связанных общим творческим или изобретательским замыслом при определенных условиях, защищаемых патентами.

Процесс функционального [6] проектирования носит итерационный характер, т.е. от этапа к этапу, от анализа соответствующего способа формообразующей обработки последовательно приближаясь к решению поставленной задачи.

Методику функционального проектирования рассмотрим на примере классического способа нарезания резьбы фасонным резцом.

На первом этапе анализируют способ формообразующей обработки, подлежащий реализации в кинематической структуре станка.

На рисунке 1 показана схема пионерного способа нарезания резьбы фасонным резцом. Характеристический образ фасонного резца $\{E\}_1$. По этой схеме заготовке 1, определенным образом ориентированной в пространстве, сообщают вращательное движение B_1 , а резцу 2, профиль которого соответствует профилю нарезаемой резьбы, поступательное движение Π_2 , согласованное с движением B_1 заготовки. Класс образования резьбы (винтовой поверхности) копирование – след $(E-H^C)$. Причем сложное исполнительное движение $\Phi_v(B_1\Pi_2)$, состоящее из двух согласованных между собой элементарных движений: вращательного B_1 и поступательного Π_2 , воспроизводит направляющую (винтовую линию) обрабатываемой поверхности. Следовательно, частная винторезная структура станка должна выполнять только одно сложное формообразующее движение $\Phi_v(B_1\Pi_2)$, состоящее из функционально связанных простых (элементарных) движений B_1 и Π_2 .

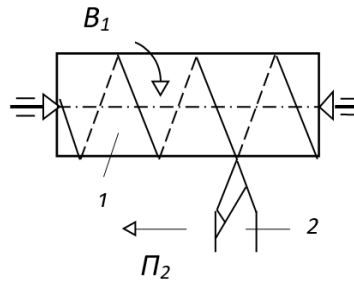


Рисунок 1. – Схема способа нарезания резьбы фасонным резцом

На втором и третьем этапах осуществляют графическое оформление (рисунок 2) исполнительных органов (подвижных блоков), решают вопрос о количестве источников механической энергии, выполняют графическое оформление связей между источниками механической энергии и исполнительными органами, устанавливают органы настройки исполнительных движений.

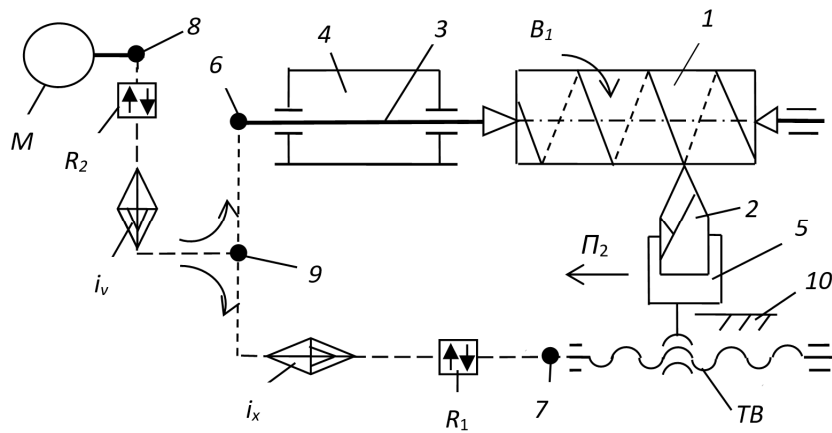


Рисунок 2. – Частная структурная схема станка для нарезания резьбы

В проектируемой схеме исполнительный орган, несущий заготовку 1, представляет собой шпиндель 3, смонтированный с возможностью вращения B_1 в стационарном блоке 4, называемом передней бабкой. Исполнительный орган, несущий резец 2, – это подвижный блок 5, называемый продольным суппортом, или кареткой, смонтированный с возможностью поступательного перемещения Π_2 по направляющим 10 параллельно линии центров станка. Поступательное перемещение суппорта обеспечивается посредством тягового вала (ТВ). По сложившейся традиции в токарно-винторезных станках с механическими связями в частной кинематической структуре для нарезания резьбы в качестве ТВ используют передачу винт-гайка.

Для создания траектории сложного исполнительного движения $\Phi_v(B_1\Pi_2)$, воспроизводящего на заготовке 1 направляющую – винтовую линию нарезаемой резьбы, соединяют шпиндель 3, смонтированный в подшипниках передней бабки 4, с ТВ каретки 5, несущей резец 2, посредством жесткой кинематической связи в виде штриховой линии 6–7. Эта связь, состоящая из последовательно соединенных передач, накладывает ограничения на шпиндель 3 и каретку 5, не позволяющие им занимать произвольные положения относительно друг друга и иметь произвольные скорости. Данная связь (структурная или кинематическая цепь) создает потенциальную возможность винтового движения $\Phi_v(B_1\Pi_2)$. Для реализации этой возможности соединяют произвольное промежуточное звено 9 связи 6–7 с электродвигателем М кинематической связью 8–9.

При включении электродвигателя энергия движения по кинематической связи 8–9 будет сообщаться через звено 9 в кинематическую связь 6–7. Это вызовет вращение B_1 шпинделя, несущего заготовку, и продольное перемещение P_2 каретки, несущей резец. В итоге характеристический образ резца будет совершать относительно заготовки винтовое движение $\Phi_v(B_1P_2)$. При этом соотношение элементарных движений B_1 и P_2 зависит только от произведения передаточных отношений передач, образующих кинематическую связь 6–7. Таким образом, эта связь, при функционировании имитирующая передачу винт–гайка, будет обеспечивать качественную характеристику движения $\Phi_v(B_1P_2)$, т.е. его траекторию. Кинематическая связь, воспроизводящая траекторию исполнительного движения, называется внутренней связью. Количественную характеристику исполнительного движения, т.е. скорость, или темп воспроизведения направляющей винтовой поверхности, обеспечивает кинематическая связь 8–9. Такую связь принято называть внешней связью. Внутренняя и внешняя связи имеют общее звено 9, называемое звеном соединения связей.

Совокупность источника (источников) энергии движения исполнительных органов, внутренней и внешней связей принято называть *кинематической группой* [5] с наименованием, соответствующим движению, которое создает эта группа.

Сложное винтовое движение $\Phi_v(B_1P_2)$ имеет незамкнутую траекторию. Следовательно, оно должно настраиваться по всем пяти параметрам. Для этого во внутреннюю связь установим два органа настройки: i_x и R_1 . Посредством первого из них настраивают шаг нарезаемой резьбы, посредством второго – возможность нарезания левой или правой резьбы. Во внешней связи установим орган настройки на скорость i_v воспроизведения направляющей и технологический реверс R_2 , предназначенный для реверсирования движения формообразования при многопроходной обработке в исходное положение или при задании направления нарезания резьбы к передней бабке или от нее.

Расположение звена соединения связей 9 имеет принципиальное значение и зависит от расчетной цепи для органа настройки i_v . Элементарные движения B_1 и P_2 , образующие сложное винтовое движение $\Phi_v(B_1P_2)$, всегда одновременны и одинаковы по продолжительности. Это позволяет оценивать скорость сложного исполнительного движения через скорость одного из входящих в него элементарных движений. По сложившейся традиции в теории резания это движение исполнительного органа, имеющего большую скорость и потребляющего большую мощность. В рассматриваемой структурной схеме это шпиндель 3. Следовательно, звено соединения связей 9 целесообразно располагать между шпинделем 3 и органом настройки на траекторию i_x .

Органы настройки исполнительного движения на путь и исходную точку, как правило, на схемах не показывают. Регулирование этих параметров на станках с ручным управлением обычно осуществляют вручную по лимбам (упорам), на станках-автоматах с механическими связями – жесткими программносителями (кулачками), на станках, оснащенных системами ЧПУ, программно, например, непосредственно на дисплее устройства ЧПУ.

Описание связей структурной схемы винторезного станка, состоящего из одной сложной формообразующей группы, приведено на вербальном языке. При системном анализе и синтезе кинематической структуры следует отдать предпочтение языку символов, т.к. это обеспечивает большую наглядность и компактность описания. Приведем описание рассмотренной кинематической структуры станка на языке символов, используемом в литературе по станковедению.

Внутренняя связь:

$$B_1 \leftarrow 3 \leftarrow 6 \leftarrow 9 \rightarrow i_x \rightarrow R_1 \rightarrow 7 \rightarrow TB \rightarrow 5 \rightarrow P_2.$$

Внешняя связь:

$$M \rightarrow 8 \rightarrow R_2 \rightarrow i_v \rightarrow 9.$$

Разнонаправленные стрелки в описании внутренней связи показывают направление разветвления энергии движения после звена соединения связей 9 по обеим ветвям внутренней связи.

Таким образом, функционирование технической системы однозначно соответствует известному постулату теоретической механики – принципу разветвления энергии движения в цепях независимо от их природы.

На четвертом этапе на основе другого постулата теоретической механики – принципе возможных перемещений [5], известном как принцип Даламбера, выводят формулы настройки (ФН) для органов настройки i_x и i_v .

Орган настройки на траекторию сложного формообразующего движения i_x . Внутренняя связь кинематической группы $\Phi_v(B_1P_2)$ и расчетная цепь для этого органа настройки совпадают. Следовательно, расчетные перемещения (РП) для органа настройки i_x имеют вид:

$$1 \text{ оборот заготовки } (B_1) \rightarrow P \text{ мм перемещения инструмента } (P_2),$$

где P – шаг нарезаемой резьбы.

Тогда уравнение расчетной кинематической цепи (УКЦ):

$$P = 1 \cdot i_x \cdot i_{01} \cdot P_{TB},$$

где i_{01} – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи; P_{TB} – шаг (кинематическая характеристика) тягового вала.

Откуда ФН:

$$i_x = P/c_1,$$

где $c_1 = i_{01} \cdot P_{ТВ}$ – константа.

Орган настройки i_v на скорость воспроизведения направляющей – винтовой линии. Расчетная цепь связывает электродвигатель M со шпинделем 3 станка. Следовательно, РП для органа настройки i_v имеют следующий вид:

$$n_M \text{ мин}^{-1} \rightarrow n_{ш} \text{ мин}^{-1} (B_1),$$

Тогда УКЦ:

$$n_{ш} = n_M \cdot i_v \cdot i_{02},$$

где i_{02} – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Откуда ФН:

$$i_v = n_{ш}/c_2,$$

где $c_2 = n_M \cdot i_{02}$ – константа.

Аналогично проектируется частная кинематическая структура токарных станков для обработки цилиндрических и торцевых поверхностей по функциям соответствующих способов обработки. Процедура проектирования подробно рассмотрена в работе [6].

Для способов обработки винтовой (резьбовой), цилиндрической и торцевой поверхностей характерно одинаковое относительное положение траекторий движений B_1 и P_2 . Одинаково также абсолютное геометрическое положение заготовки и инструмента в горизонтальной плоскости. Поэтому в частных структурах технологическая компоновка исполнительных органов – шпинделя и суппорта – одинакова. Следовательно, частные структурные схемы можно объединить в обобщенную структурную схему универсального токарно-винторезного станка. Процедура обобщения и анализ полученной кинематической структуры универсального станка подробно рассмотрены в работе [6].

Методика функционального проектирования кинематической структуры создавалась при разработке структурных схем на базе механических передач. Создание мехатронных технических систем, в т.ч. металлорежущих станков с ЧПУ, привело к созданию сложных гибридных формообразующих групп, в которых внутренняя связь, задающая траекторию сложного исполнительного движения, представляет собой объединение механических и электронных связей на базе типовых интегральных схем. В связи с этим целесообразно рассматривать функциональное проектирование в методике познания станочного оборудования с ЧПУ.

Функциональное проектирование мехатронной кинематической структуры станка. Анализ известных источников показывает, что исторически первой в сложных гибридных формообразующих группах, воспроизводящих станочное зацепление, имитирующее конкретную передачу, функциональная связь исполнительных органов группы осуществляется отслеживающей синхронизацией по схеме задающая–ведомая координаты. Обязательным условием при этом является использование на каждом исполнительном органе отдельного регулируемого электродвигателя.

Проектирование мехатронной кинематической структуры рассмотрим на примере разработки частной структуры станка для нарезания резьбы (рисунок 3). Этапы анализа способа нарезания резьбы фасонным резцом и оформления исполнительных органов станка аналогичны рассмотренным выше.

Этап графического оформления связей между исполнительными органами и настройкой на траекторию сложного формообразующего движения отличается использованием настраиваемого электронного вала, или синхронной следящей системы. Для осуществления сложного формообразующего движения $\Phi_v(B_1P_2)$, воспроизводящего направляющую – винтовую линию нарезаемой резьбы, соединим шпиндель 3 , несущий заготовку, с тяговым валом $ТВ$ суппорта 5 , несущего резец 2 . Для этого соединим шпиндель 3 (задающая координата) посредством механической передачи 7 с импульсным измерительным преобразователем 8 . Выход этого преобразователя соединим с входом управляемого делителя частоты, выполненного в виде счетчика импульсов 9 и блока задания коэффициента деления 10 . Выход счетчика 9 делителя частоты соединим с входом импульсно-аналогового преобразователя 11 . Выход этого преобразователя соединим через предварительный усилитель 12 и усилитель мощности 13 с электродвигателем M_2 , кинематически связанным с тяговым валом $ТВ$ привода суппорта 5 (ведомая координата). Ведущую координату – шпиндель 3 – кинематически соединим с электродвигателем M_1 .

Запишем связи проектируемой гибридной структурной схемы на языке символов. Внутренняя связь – мехатронная цепь, включающая механические передачи и типовые интегральные схемы:

$$B_1 \leftarrow 3 \leftarrow 7 \rightarrow (\text{синхронная следящая система: } 8 \rightarrow 9 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 13) M_2 \rightarrow \\ \rightarrow ТВ \rightarrow 5 \rightarrow P_2.$$

Внешняя связь:

$$M_1 \rightarrow 3 \rightarrow 7 (\text{звено соединения связей}).$$

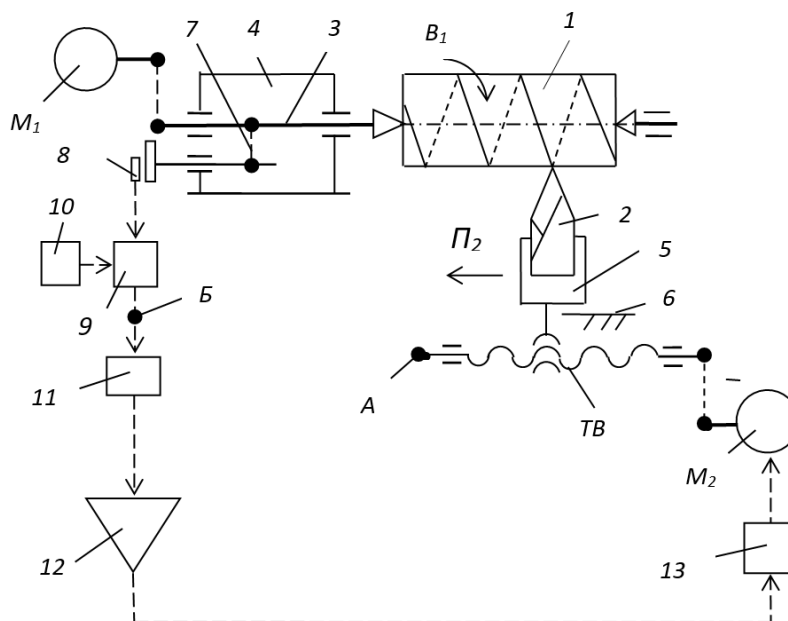


Рисунок 3. – Гибридная структура резбонарезного станка с системой синхронизации по схеме задающая–ведомая координаты

Принципиальной особенностью данной гибридной схемы является размещение электродвигателя M_2 ведомой координаты во внутренней связи формообразующей группы. Поэтому в качестве этого электродвигателя необходимо использовать высокомоментную машину постоянного тока или синхронную машину переменного тока. В качестве электродвигателя M_1 можно использовать менее дорогую традиционную асинхронную машину переменного тока.

Движение $\Phi_v(B_1 P_2)$ имеет незамкнутую траекторию и настраивается по всем пяти параметрам: на траекторию – делителем частоты 9–10; на скорость – посредством задания величины напряжения при использовании электродвигателя постоянного тока или частоты переменного тока при использовании электродвигателя переменного тока; на направление, исходное положение и путь – программно на программносителе или непосредственно на дисплее устройства ЧПУ в соответствующем коде.

Делитель частоты (счетчик 9 – блок установки коэффициента деления 10) является аналогом механического органа настройки на траекторию (например, гитары сменных зубчатых колес). Поэтому коэффициент деления определим по методике определения передаточного отношения механического органа настройки на траекторию. Следовательно, РП для коэффициента деления имеют вид:

$$1 \text{ оборот заготовки } (B_1) \rightarrow P \text{ мм перемещения инструмента } (P_2).$$

Тогда УКЦ:

$$P = 1 \cdot k_d \cdot i_0 \cdot P_{ТВ},$$

где k_d – коэффициент деления; P – шаг нарезаемой резьбы; i_0 – передаточное отношение передачи, связывающей электродвигатель M_2 с тяговым валом; $P_{ТВ}$ – шаг тягового вала.

Откуда ФН:

$$k_d = P / (i_0 P_{ТВ}).$$

Станок функционирует следующим образом. При включении управляемого электродвигателя M_1 ведущая координата – шпиндель 3 – получает движение B_1 с круговой частотой, соответствующей скорости воспроизведения направляющей винтовой поверхности. Вращательное движение шпинделя непрерывно преобразуется в импульсном измерительном преобразователе 8 в высокочастотный импульсный сигнал, пропорциональный круговой частоте движения B_1 . Этот сигнал поступает в счетчик 9 делителя частоты, где происходит его деление в соответствии с заданным на блоке 10 коэффициентом деления. Импульсный сигнал с выхода делителя частоты преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 11 в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, и с его выхода через предварительный усилитель 12 поступает на усилитель мощности 13. С выхода этого усилителя задающий сигнал поступает на управляемый электродвигатель M_2 , который посредством тягового вала TB сообщает движение P_2 ведомой координате – суппорту 5, несущему резец. В результате такого прохождения сигнала от ведущей координаты к ведомой обеспечивается воспроизведение винтовой линии резьбовой поверхности сложным двухэлементарным движением $\Phi_v(B_1 P_2)$.

Полученная в результате функционального проектирования мехатронная структурная схема используется преимущественно в качестве частной резьбонарезной кинематической структуры в универсальных токарно-винторезных станках с ЧПУ, например, в станке модели 16К20Ф3.

При функционировании структурной схемы девиация механики ведомой координаты (электродвигатель M_2 – тяговый вал TB – суппорт 5) проецируется на воспроизводимую винтовую поверхность. Это явление, снижающее качественные показатели резьбы, можно устранить посредством адаптивной двухсторонней коррекции задающего сигнала ведомой координаты. Для этого используем блок формирователя сигнала коррекции (рисунок 4). Этот блок содержит знаковый 1 и фазовый 2 дискриминаторы. Выход знакового дискриминатора 1 соединен с управляющим входом ключа 3, управляемого отрицательным потенциалом, и с управляющим входом ключа 4, управляемого положительным потенциалом. Выход фазового дискриминатора 2 соединен посредством импульсно-аналогового преобразователя 5 с аналоговыми входами ключей 3 и 4. Выход ключа 3 соединен со вторым входом сложения параллельного сумматора 6, а выход ключа 4 – с входом вычитания этого сумматора.

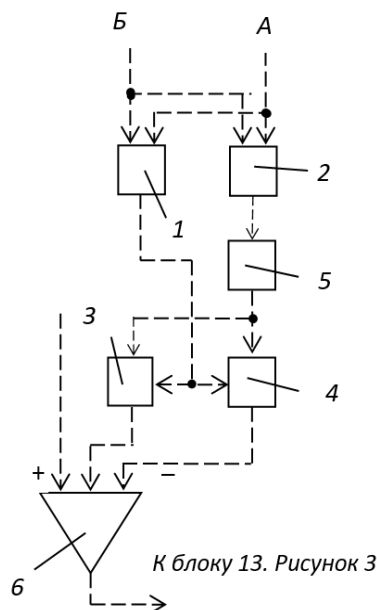


Рисунок 4. – Формирователь сигнала коррекции задающего сигнала

Первые входы обоих дискриминаторов соединим с разъемом B (см. рисунок 3). Вторые – с импульсным измерительным преобразователем, который установим на тяговом валу TB (см. рисунок 3, позиция A). Из структурной схемы (см. рисунок 3) исключим предварительный усилитель 12, а выход импульсно-аналогового преобразователя 11 соединим с первым входом сложения параллельного сумматора 6 формирователя сигнала коррекции. Выход параллельного сумматора соединим с усилителем мощности 13.

Двухсторонняя коррекция задающего сигнала, действующего на выходе параллельного сумматора 6, осуществляется следующим образом. На первых входах знакового 1 и фазового 2 дискриминаторов постоянно действует задающий импульсный сигнал с выхода счетчика 9 делителя частоты. На вторые входы обоих дискриминаторов непрерывно с импульсно-аналогового преобразователя, устанавливаемого на тяговом валу, поступает импульсный сигнал – аналог скорости движения $П_2$ суппорта 5 (см. рисунок 3, позиция A). В результате сравнения сигналов на выходе знакового дискриминатора 1 образуется отрицательный потенциал при отставании ведомой координаты от заданного значения и положительный потенциал при его опережении. Этот потенциал поступает на управляющие входы ключей 3 и 4. Одновременно на выходе фазового дискриминатора 2 образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 5 поступает на аналоговые входы ключей 3 и 4. Этот сигнал поступает на параллельный сумматор 6 через один из ключей в зависимости от знака управляющего воздействия. При отставании ведомой координаты сигнал абсолютной погрешности поступает через ключ 3, управляемый отрицательным потенциалом, на второй вход сложения параллельного сумматора 6, а при опережении – через ключ 4, управляемый положительным потенциалом, на вход вычитания этого сумматора. В итоге в параллельном сумматоре 6 происходит в зависимости от знака погрешности увеличение или уменьшение управляющего сигнала ведомой координаты, т.е. происходит его непрерывная, двухсторонняя коррекция относительно номинального значения.

Возможно также использование системы синхронизации по схеме равнозначных координат с двухсторонней адаптацией управляющего сигнала обеих координат¹. В этом варианте необходимо использовать управляемые электродвигатели одного типа.

Анализ кинематической схемы станка. Рассмотрим использование приведенный выше парадигмы познания на примере токарно-револьверного станка модели 1Г340, широко представленного в современной учебной литературе.

Станок модели 1Г340 относится к станкам с горизонтальной осью револьверной головки, имеющей 16 гнезд для различных инструментов. На станке можно обрабатывать детали как из прутка, так и из заготовок. Область использования – серийное производство. Кинематическая схема станка представлена на рисунке 5.

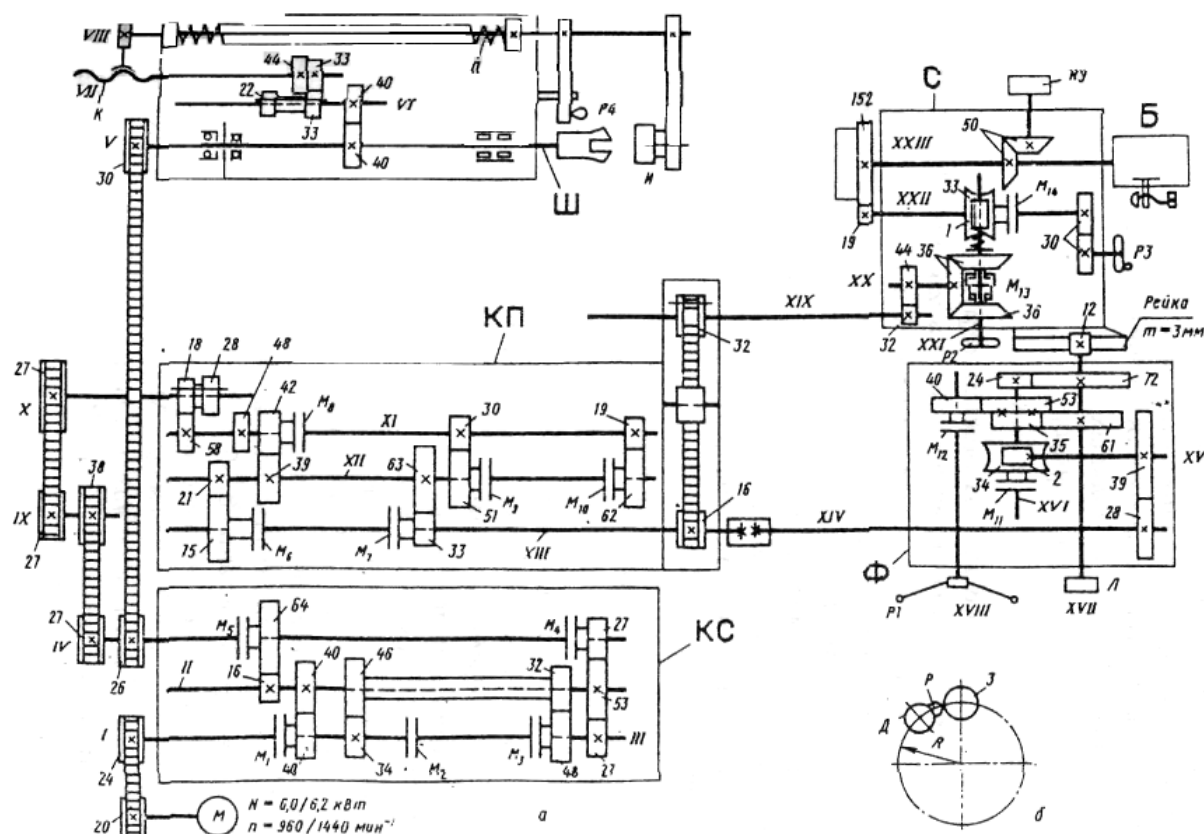


Рисунок 5. – Кинематическая схема токарно-револьверного станка модели 1Г340

Техническая характеристика. Максимальный диаметр обрабатываемого прутка 40 мм; максимальный диаметр заготовки, обрабатываемой в патроне, 400 мм; количество частот вращения шпинделя – 12, диапазон частот вращения шпинделя 45–2000 мин⁻¹; количество продольных и поперечных (круговых) подач – 12, диапазон подач: продольных 0,035–1,6 мм/об, поперечных (круговых) 0,02–0,8 мм/об.

Формообразующая часть кинематической структуры станка включает две основные частные структуры: токарную $\Phi_v(B_1)$, $\Phi_{s1}(P_2)$ для продольной обработки и токарную $\Phi_v(B_1)$, $\Phi_{s2}(B_3)$ для поперечной (торцевой) обработки. Группа скорости резания $\Phi_v(B_1)$ входит в обе частные структуры. Переход от одной структуры к другой осуществляется посредством механизмов управления станка.

Структура для продольной обработки состоит из простых групп скорости резания $\Phi_v(B_1)$ и продольной подачи $\Phi_{s1}(P_2)$, соединенных между собой электродвигателем M и общей частью внешних связей шкив 20, установленный на валу электродвигателя, – выходной вал IV коробки скоростей $KС$.

Группа $\Phi_v(B_1)$ воспроизводит образующую (окружность) обрабатываемой поверхности. Ее внутренняя связь:

подшипниковые опоры шпиндельной коробки → шпиндель Ш (вал V) (B_1).

¹ Устройство для синхронизации приводов исполнительных органов шлифрезерного станка: пат. ВУ 16976 / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 26.12.2012.

Внешняя связь – кинематическая цепь, состоящая из двух зубчато-ременных передач и коробки скоростей KC , соединяющая двухскоростной электродвигатель M со шпинделем, являющимся звеном соединения связей:

$$M \rightarrow 20/24 \rightarrow KC \rightarrow 26/30 \rightarrow \text{шпиндель } (B_1).$$

Группа настраивается на скорость изменением круговой частоты электродвигателя и коробкой скоростей KC (орган настройки i_v) и на направление – реверсированием направления вращения электродвигателя. При этом переключение частоты вращения шпинделя осуществляется посредством электромагнитных муфт M_1 – M_5 автоматически при смене позиций револьверной головки в соответствующие положения по программе, заданной на штекерной панели пульта управления.

Расчетная цепь для органа настройки на скорость совпадает с внешней связью группы. Поэтому РП для круговой частоты вращения шпинделя имеют вид:

$$n_m \text{ мин}^{-1} \text{ электродвигателя} \rightarrow n_i, \{i = 1, 2, 3, \dots, 12\} \text{ шпинделя } (B_1) \text{ мин}^{-1}.$$

Ряд круговых частот шпинделя образует геометрическую прогрессию с $\phi = 1,41$. Предельные значения круговых частот вращения шпинделя:

$$n_1 = 960 \cdot \frac{20}{24} \cdot \frac{34}{46} (M_3) \cdot \frac{32}{48} \cdot \frac{27}{53} \cdot \frac{16}{24} (M_5) \cdot \frac{26}{30} = 45 \text{ мин}^{-1};$$

$$n_{12} = 1440 \cdot \frac{20}{24} (M_1) \cdot \frac{40}{40} \cdot \frac{53}{27} (M_4) \cdot \frac{26}{30} = 2000 \text{ мин}^{-1}.$$

Торможение шпинделя производится одновременным включением муфт M_4 и M_5 .

Группа $\Phi_{s1}(P_2)$ воспроизводит направляющую (прямую, параллельную линии центров станка) обрабатываемой поверхности. Ее внутренняя связь имеет вид:

$$\text{направляющие станины} \rightarrow \text{продольный суппорт } (P_2).$$

Внешняя связь – кинематическая цепь, соединяющая двухскоростной электродвигатель M с продольным суппортом, являющимся звеном соединения связей, посредством трех зубчато-ременных передач, коробки скоростей KC , коробки подач $KП$, фартука Φ и тягового вала (зубчато-реечной передачи):

$$M \rightarrow 20/24 \rightarrow KC \rightarrow 27/38 \rightarrow 27/27 \rightarrow KП \rightarrow \Phi \rightarrow 28/39 \rightarrow 2/34 \rightarrow 24/72 \rightarrow \\ \rightarrow \text{тяговый вал (зубчато-реечная передача)} \rightarrow \text{продольный суппорт } (P_2).$$

Группа настраивается на скорость (продольную подачу) коробкой подач $KП$ (орган настройки i_s), на путь – по упору с отсчетом величины пути по лимбу L , расположенному на валу $XVII$ фартука Φ . При каждом положении подвижного блока 18–28 при смене позиций револьверной головки в соответствующие положения по программе, заданной на штекерной панели пульта управления, автоматически посредством включения соответствующих электромагнитных муфт M_6 – M_{10} получается шесть ступеней продольной подачи.

Продольная подача включается муфтой M_{11} , при этом муфта M_{12} выключена (муфты заблокированы). Ручное перемещение осуществляется маховиком $P1$ через включенную муфту M_{12} , передачи 40/53, 35/61 и реечное колесо 12 (ведущее звено тягового вала). Автоматическое выключение продольной подачи в каждой позиции осуществляется упорами, установленными на барабане управления (БУ).

В известных учебниках для вузов [7; 8 и др.] утверждается, что «привод подачи осуществляется от шпинделя (вал V) через три зубчато-ременные передачи и коробку подач $KП$...». Данное утверждение наделяет шпиндель – исполнительный орган группы $\Phi_v(B_1)$ воспроизведения – образующей функцией источника энергии движения для группы $\Phi_{s1}(P_2)$ воспроизведения направляющей воспроизводимой поверхности. Такой подход к объяснению функции металлорежущих станков характерен для парадигмы познания, основанной только на принципе возможных перемещений, сложившейся в 50-е годы XX столетия, некорректен. Фактически отрицается принцип разветвления энергии движения в цепях, а физическая цепь подменяется расчетной цепью. Тем не менее, по сложившейся традиции эта парадигма познания металлорежущих станков доминирует в учебной литературе. Указанная некорректность устранена в представляемой парадигме.

В соответствии с принципом разветвления энергии движения шпинделю и суппорту анализируемого станка движение сообщается с выходного вала IV общего участка внешних связей (M – KC) формообразующих групп станка.

Для станков токарной группы принято задавать подачу относительно 1 оборота шпинделя. Для этого на основе принципа возможных перемещений назначается расчетная цепь, как правило, не совпадающая с внешней связью кинематической группы. Из этого правила следует, что расчетная цепь продольных подач анализируемой группы связывает шпиндель станка с тяговым валом. Для этой цепи РП имеют вид:

$$1 \text{ оборот шпинделя} \rightarrow s_{\text{прод.}} \text{ мм перемещения суппорта } (P_1).$$

Минимальная продольная подача:

$$s_{\text{прод.1}} = 1 \cdot \frac{30}{26} \cdot \frac{27}{38} \cdot \frac{27}{27} \cdot \frac{18}{58} (M_{10}) \cdot \frac{19}{62} \cdot \frac{21}{75} (M_6) \cdot \frac{28}{39} \cdot \frac{2}{34} (M_{11}) \cdot \frac{24}{72} \cdot \pi \cdot 3 \cdot 12 = 0,035 \text{ мм/об.}$$

Максимальная продольная подача:

$$s_{\text{прод.12}} = 1 \cdot \frac{30}{26} \cdot \frac{27}{38} \cdot \frac{27}{27} \cdot \frac{28}{48} (M_8) \cdot \frac{42}{39} \cdot \frac{63}{33} (M_7) \cdot \frac{28}{39} \cdot \frac{2}{34} (M_{11}) \cdot \frac{24}{72} \cdot \pi \cdot 3 \cdot 12 = 1,6 \text{ мм/об.}$$

Группа $\Phi_{s2}(П_3)$ воспроизводит направляющую обрабатываемой поверхности при торцовой обработке. Ее внутренняя связь:

$$\text{подшипниковые опоры} \rightarrow \text{револьверная головка } \Gamma(П_3).$$

Внешняя связь, соединяющая электродвигатель M с револьверной головкой, являющейся звеном соединения связей, включает общую с внешней связью группы $\Phi_{s1}(П_2)$ часть от электродвигателя до вала $XIII$ коробки подач $KП$ и последовательно расположенные передачи $16/32$, $32/44$, $36/36$ (реверс, управляемый муфтой M_{13}), $1/33$ (муфта M_{14}), $19/152$.

Группа настраивается на скорость круговую (торцовую) подачу коробкой подач $KП$, на путь – упорами, на направление – реверсом. Ручное круговое движение подачи осуществляется маховиком $P2$ при включенной муфте M_{14} . Ручной поворот револьверной головки при смене позиций осуществляется маховиком $P3$ при включенной муфте M_{14} .

Расчетная цепь круговых подач связывает шпиндель станка с револьверной головкой. Для этой цепи РП имеют вид:

$$1 \text{ оборот шпинделя} \rightarrow s_{\text{кр.}} \text{ мм перемещения револьверной головки } (П_3).$$

Минимальная круговая подача:

$$s_{\text{кр.1}} = 1 \cdot \frac{30}{26} \cdot \frac{27}{38} \cdot \frac{27}{27} \cdot \frac{18}{58} (M_{10}) \cdot \frac{19}{62} \cdot \frac{21}{75} (M_6) \cdot \frac{16}{32} \cdot \frac{32}{44} \cdot \frac{36}{36} (M_{13}) \cdot \frac{1}{33} \cdot \frac{19}{152} \cdot 2\pi \cdot 100 = 0,02 \text{ мм/об.}$$

Максимальная круговая подача:

$$s_{\text{кр.12}} = 1 \cdot \frac{30}{26} \cdot \frac{27}{38} \cdot \frac{27}{27} \cdot \frac{28}{48} (M_8) \cdot \frac{42}{39} \cdot \frac{63}{33} (M_7) \cdot \frac{16}{32} \cdot \frac{32}{44} \cdot \frac{36}{36} (M_{13}) \cdot \frac{1}{33} \cdot \frac{19}{152} \cdot 2\pi \cdot 100 = 0,8 \text{ мм/об.}$$

В приведенных формулах 100 – расстояние от оси поворота револьверной головки до осей гнезд для инструментов, равное R .

При работе станка частоту вращения шпинделя и подачу можно изменять вручную с помощью переключателей. Автоматическое переключение режимов обработки при смене позиций револьверной головки осуществляется через зубчатую передачу $50/50$, связанную с коллектором управления $KУ$, а на штекерной панели пульта управления программируются режимы обработки для каждой позиции головки. Длину пути суппорта устанавливают в соответствующих позициях револьверной головки, посредством регулируемых упоров на барабане B .

Для нарезания наружной и внутренней резьбы резцами или гребенками в структуре станка предусмотрено также резьбонарезная (винторезная) группа $\Phi_1(B_1П_4)$. Ее внутренняя связь:

$$(B_1) \text{ шпиндель } Ш \rightarrow 40/40 \rightarrow 33/33 \text{ или } 22/44 \rightarrow \text{копир } K \rightarrow \\ \text{резьбовая гайка} \rightarrow \text{штанга } V111 \rightarrow \text{державка инструмента } И (П_4).$$

Внешняя связь совпадает с внешней связью группы $\Phi_1(B_1)$, т.е. представляет собой кинематическую (структурную) цепь, связывающую электродвигатель со звеном соединения связей – шпинделем.

Группа настраивается на траекторию, путь и направление сменными комплектами копира K , резьбовой гайкой и блоком зубчатых колес $33-22$. Причем при включении передачи $33/33$ шаг нарезаемой резьбы равен шагу резьбы копира, а при включении передачи $22/44$ – вдвое меньше.

При нарезании резьбы инструмент $И$ закрепляют в державке, связанной со штангой $VIII$. Штангу поворачивают рукояткой $P4$, подводя инструмент к заготовке и вводя резьбовую гайку на левом конце штанги в зацепление с резьбовым копиром K . Копир получает вращение от шпинделя через передачу $40/40$ и блок зубчатых колес $33-22$. При этом резьбовая гайка со штангой $VIII$ и инструментом $И$ движется вдоль оси.

Заключение. Предложена парадигма познания металлорежущих станков, соответствующая двум постулатам теоретической механики: принципу разветвления энергии движения в механических цепях и принципу возможных перемещений, или принципу Даламбера. Первый из этих принципов раскрывает физическую сущность функционирования кинематики станков, второй – методику настройки станков. Рассмотрена методология

парадигмы познания, включающая три логически связанные части: основы теории формообразования реальных поверхностей при формообразующей обработке, функциональное проектирование кинематической структуры станочного оборудования по функции, задаваемой соответствующим способом формообразующей обработки, и анализ обобщенных структурных и кинематических схем станков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bertalanffy L. *Ogólna teoria systemów*. – Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1984. – 339 st.
2. Хакен Г. Синергетика / пер. с англ. канд. физ.-мат. наук В.И. Емельянова; под ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. Ю.Л. Климонтовича и д-ра физ.-мат. наук С.М. Осовца. – М.: Мир, 1980. – 405 с.
3. Колесников А.А. Шанс для рывка // Поиск. – 2002. – № 42(700). – С. 8.
4. Голембиевский А.И. Системология способов формообразующей обработки в машиностроении. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2017. – 236 с.
5. Федотенок А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков. – Изд. второе. – М.: Машиностроение, 1970. – 403 с.
6. Голембиевский А.И. Эволюция парадигмы познания металлорежущих станков. – Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. – 156 с.
7. Металлорежущие станки: учеб.: в 2 т. / В.В. Бушуев, А.В. Еремин, А.А. Какойло и др.; под ред. В.В. Бушуева. – М.: Машиностроение, 2011. – Т. 2. – 586 с.
8. Ефремов В.Д., Горохов В.А., Схиртладзе А.Г. Металлорежущие станки / под общ. ред. П.И. Ящерицына. – Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 695 с.

REFERENCES

1. Bertalanffy, L. (1984). *Ogólna teoria systemów*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe. (in Polish)
2. Khaken, G., Klimontovich, Yu.L. (Eds.) & Osovets, S.M. (Eds.) (1980). *Sinergetika. [Synergetics]*. Moscow: Mir. (In Russ.)
3. Kolesnikov, A.A. (2002). Shans dlya ryvka. *Poisk*, 42(700), 8. (In Russ.)
4. Golembievskii, A.I. (2017). *Sistemologiya sposobov formoobrazuyushchei obrabotki v mashinostroenii*. – Novopolotsk: Polotskii gosudarstvennyi universitet. (In Russ.)
5. Fedotenok, A.A. (1970). *Kinematicheskaya struktura metallovezhushchikh stankov*. Moscow: Mashinostroenie. (In Russ.)
6. Golembievskii, A.I. (2019). *Evolutsiya paradigmy poznaniya metallovezhushchikh stankov*. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing. (In Russ.)
7. Bushuev, V.V., Eremin, A.V., Kakoilo, A.A., Makarov, V.M., Meshcheryakov, Yu.V., Molodtsov, V.V., ... Bushuev, V.V. (Eds.) (2011). *Metallovezhushchie stanki: v 2 t. T. 2*. Moscow: Mashinostroenie. (In Russ.)
8. Efremov, V.D., Gorokhov, V.A., Skhirtladze, A.G. & Yashcheritsyn, P.I. (Eds.) (2015). *Metallovezhushchie stanki*. Staryi Oskol: TNT. (In Russ.)

Поступила 14.04.2023

THE MODERN PARADIGM OF KNOWLEDGE OF METAL-CUTTING MACHINES

A. GOLEMBIEVSKY

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

A paradigm of cognition of metal-cutting machines in the logical and mathematical language of the general theory of systems is proposed. The methodology of creating and analyzing the kinematic structure of metal-cutting machines is considered. Fundamentals of the theory of shaping real surfaces in machine-building. The concept of classes of reproduction of real surfaces. Functional design of a particular kinematic structure of machine tools according to the function set by the method of formative processing. Generalization of particular structures into the generalized structure of a universal machine. The use of the cognition paradigm in the analysis of kinematic schemes of metal-cutting machines.

Keywords: *metal-cutting machines, paradigm of knowledge, methodology of the paradigm, method of shaping processing, functional design, particular and generalized kinematic structure of metal-cutting machines, analysis of the kinematic scheme of a known machine tool.*