

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.9.06-529+372.8:62

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ В ПОЗНАНИИ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

*канд. техн. наук, проф. А.И. ГОЛЕМБИЕВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)*

Рассматривается использование функционального проектирования кинематической структуры станочного оборудования с числовым программным управлением, содержащего сложные мехатронные формообразующие группы. Анализируется функционирование оборудования по закону, задаваемому соответствующим виртуальным техническим решением – способом формообразующей обработки. Показан итерационный характер функционального проектирования. Предлагается методика настройки мехатронных формообразующих групп на траекторию сложного формообразующего движения и его скорость. Решается задача устранения отрицательного влияния девиации механики исполнительных органов на качество обрабатываемой поверхности.

Ключевые слова: станочное оборудование с числовым программным управлением; функциональное проектирование; настройка мехатронных формообразующих групп; параметры настройки; девиация механики исполнительных органов; устранение девиации.

Введение. Современная парадигма познания кинематической структуры станочного оборудования в высшей школе [1] базируется на фундаментальных положениях теоретической механики: законе разветвления механической энергии в кинематических цепях и принципе возможных перемещений, известном в кинематике как принцип Даламбера. Эта парадигма включает логически связанные части: основы теории формообразования реальных поверхностей в машиностроении, понятие о способе формообразующей обработки и понятие о кинематической структуре, функции и настройке металлорежущих станков [2].

В учебной литературе для вузов по направлению подготовки «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», основополагающие понятия парадигмы познания представляются как уже известные, технические решения. Такой подход не стимулирует творческое мышление при изучении виртуальных технических решений (способов формообразующей обработки) и соответствующих им реальных технических объектов (кинематической структуры металлорежущих станков), являющихся объектами интеллектуальной собственности и защищаемых патентами на изобретения. Данное явление есть противоречие между современной парадигмой познания и сложившейся методикой ее использования, устраняется посредством включения функционального проектирования в методику изучения станочных дисциплин [3]. В учебном процессе функциональное проектирование – это синтез технического объекта (структурной схемы металлорежущего станка) по закону его функционирования, задаваемому виртуальным техническим решением (способом формообразующей обработки).

Согласно современной научной парадигме определяющую роль при синтезе кинематической структуры станка играют группы формообразования, воспроизводящие образующую и направляющую реальных поверхностей. В зависимости от характеристического образа инструмента и класса воспроизведения образующей и направляющей формообразующие группы делятся на два вида. *Первый вид* составляют простые (элементарные) формообразующие группы. В таких группах траектория вращательного или поступательного формообразующего движения не настраивается, а ее вид задается непосредственно соответствующей элементарной вращательной или поступательной кинематической парой. *Второй вид* – сложные формообразующие группы, воспроизводящие сложное двухэлементарное или трехэлементарное формообразующее движение, имитирующее более сложный механизм, например, передачу винт-гайка, червячную передачу, зубчато-реечную передачу. В таких группах траектория формообразующего движения настраивается соответствующим механизмом с точностью до 5...7 знаков после запятой.

Постановка задачи. Современная научная парадигма и функциональное проектирование разрабатывались на основе кинематического анализа станочного оборудования с механическими связями. Создание мехатронных технических систем, в том числе металлорежущих станков с числовым программным управлением (ЧПУ), привело к созданию сложных гибридных формообразующих групп, структура кото-

рых представляет собой объединение механических и электронных связей на основе типовых интегральных схем. В данном случае представляется целесообразным с позиций современной парадигмы рассмотреть функциональное проектирование в методике познания станочного оборудования с ЧПУ.

Анализ патентных источников показывает, что в сложных гибридных формообразующих группах, воспроизводящих станочное зацепление, имитирующее конкретную передачу, функциональная связь исполнительных органов группы осуществляется, как правило, отслеживающей синхронизацией по схеме «задающая – ведомая координаты» и по схеме «равнозначных координат».

Основная часть. Процесс функционального проектирования носит итерационный характер, то есть от этапа к этапу, начиная с анализа соответствующего способа формообразующей обработки, последовательно приближает к решению поставленной задачи.

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

На рисунке 1 приведена схема классического способа нарезания резьбы резцом, у которого характеристический образ соответствует профилю нарезаемой резьбы.

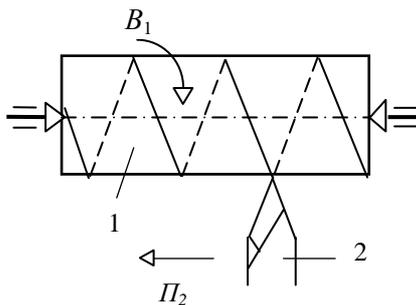


Рисунок 1. – Способ нарезания резьбы

Класс образования поверхности копирование – след ($E - H^C$) [4]. По этой схеме заготовке 1, определенной образом ориентированной в пространстве, сообщают вращательное движение B_1 , а резцу 2 – поступательное движение Π_2 , функционально связанное с движением B_1 заготовки. 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 осуществлять только одно сложное формообразующее движение, состоящее из двух функционально связанных элементарных вращательного и поступательного движений.

На втором этапе выполним графическое оформление (рисунок 2) подвижных исполнительных органов (подвижных блоков) структурной схемы станка.

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), смонтированным с возможностью поступательного перемещения Π_2 по направляющим 6 параллельно линии центров станка. Поступательное перемещение суппорта обеспечивается посредством тягового вала (ТВ). В токарно-винторезных станках с ЧПУ в качестве тягового вала используется передача винт-гайка с телами качения.

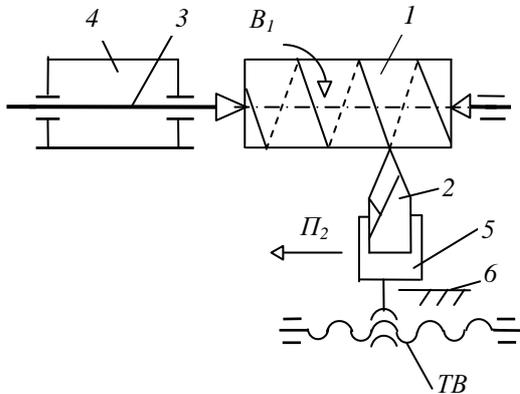


Рисунок 2. – Исполнительные органы структурной схемы станка

На третьем этапе решают вопрос о количестве источников механической энергии, о схеме электронной составляющей сложной гибридной группы, ее связи с механической составляющей группы и выводят формулы настройки на траекторию и скорость сложного двухэлементарного исполнительного движения.

Независимо от схемы электронной составляющей каждый исполнительный орган сложной гибридной формообразующей группы оснащается отдельным источником механической энергии (как правило, регулируемым электродвигателем).

Синтез кинематической структуры станка с системой синхронизации по схеме «задающая – ведомая координаты». Для воспроизведения сложного формообразующего движения $\Phi_v(B_1\Pi_2)$, 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 TB привода суппорта 5 (ведомая координата). Ведущую координату (шпиндель 3) кинематически соединим с электродвигателем M_1 .

Запишем связи разрабатываемой гибридной структурной схемы на языке символов.

Внутренняя связь – мехатронная цепь, включающая механические передачи и типовые интегральные схемы:

$B_1 \rightarrow 3 \rightarrow 7 \rightarrow$ (синхронная следящая система: $8 \rightarrow 9 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 13$) $M_2 \rightarrow TB \rightarrow 5 \rightarrow \Pi_2$.

Внешняя связь

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

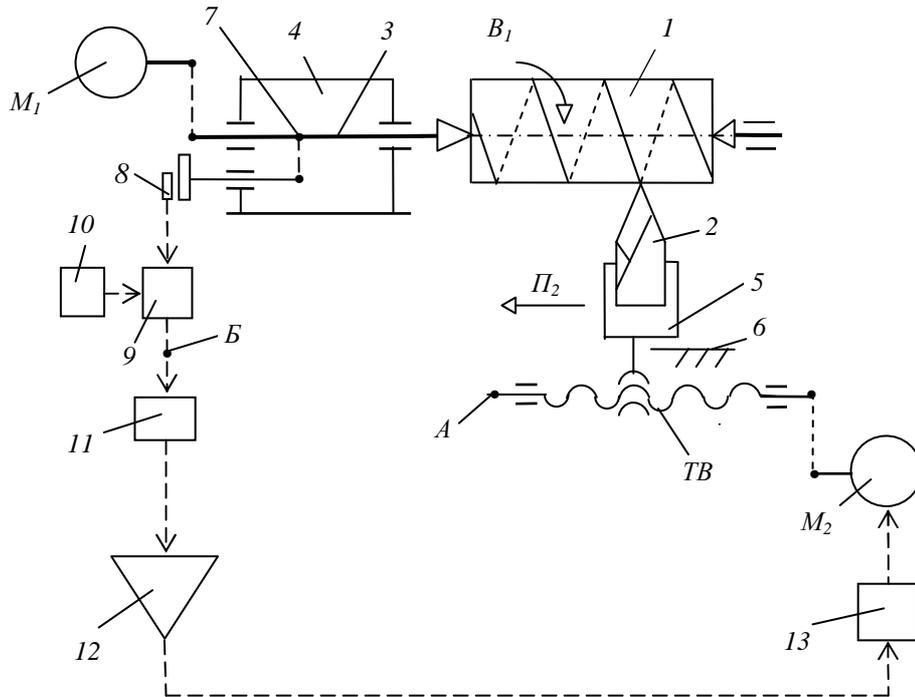


Рисунок 3. – Гибридная структура резбонарезного станка с электронной системой синхронизации по схеме задающая – ведомая координаты

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 дорогостоящую асинхронную машину переменного тока.

Движение $\Phi_1(B_1\Pi_2)$ имеет незамкнутую траекторию и настраивается по всем пяти параметрам: на траекторию – делителем частоты; 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 программноносителе или непосредственно на дисплее устройства ЧПУ в соответствующем коде.

Делитель частоты (счетчик 9 – блок установки коэффициента деления 10) является аналогом механического органа настройки (например, гитары сменных зубчатых колес). Поэтому коэффициент деления определим по методике определения передаточного отношения механического органа настройки на траекторию. Следовательно, расчетные перемещения (РП) для коэффициента деления i_9 имеют вид:

$$1 \text{ оборот заготовки } (B_1) \rightarrow P \text{ мм перемещения инструмента } (\Pi_2).$$

Тогда уравнение кинематической цепи (УКЦ) представим как

$$P = 1 \cdot i_9 \cdot i_0 \cdot P_{TB},$$

где i_9 – коэффициент деления; P – шаг нарезаемой резьбы; i_0 – передаточное отношение передачи, связывающей электродвигатель M_2 с тяговым валом; P_{TB} – шаг тягового вала.

Формула настройки (ФН):

$$i_9 = P / (i_0 P_{TB}).$$

При включении управляемого электродвигателя M_1 ведущая координата (шпиндель 3) получает движение V_1 с круговой частотой, соответствующей скорости резания. Вращательное движение шпинделя непрерывно преобразуется в импульсном измерительном преобразователе 8 в высокочастотный импульсный сигнал, пропорциональный круговой частоте движения V_1 , который 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 Π_2 ведомой координате (суппорту 5), несущему резец. В результате такого прохождения сигнала от ведущей координаты к ведомой координате обеспечивается воспроизведение винтовой линии резьбовой поверхности сложным двухэлементарным движением $\Phi_v(V_1\Pi_2)$.

Полученная в результате функционального проектирования мехатронная структурная схема используется преимущественно в качестве частной кинематической структуры в универсальных токарно-винторезных станках с ЧПУ.

При функционировании полученной 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

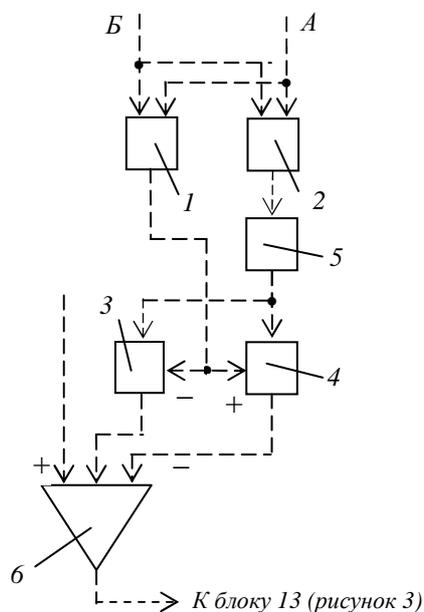


Рисунок 4. – Формирователи двухсторонней коррекции задающего сигнала

блок формирователя сигнала коррекции (рисунок 4). Этот блок [5] 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 через импульсно-аналоговый преобразователь 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. Первые входы обоих дискриминаторов соединены с разъемом Б (см. рисунок 3). Вторые входы дискриминаторов – с импульсным измерительным преобразователем, который устанавливаем на тяговом валу TB (см. рисунок 3, позиция А).

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, установленного на тяговом валу, поступает импульсный сигнал – аналог скорости движения Π_2 суппорта 5 (см. рисунок 3, позиция А). 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, который поступает на управляющие входы ключей 3 и 4. Одновременно на выходе фазового дискриминатора 2 образуется сигнал абсолютной погрешности. Этот сигнал после преобразования в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 5 поступает на аналоговые входы ключей 3 и 4, затем – 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 этот сигнал поступает 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, то есть происходит его непрерывная, двухсторонняя коррекция относительно номинального значения.

Синтез кинематической структуры станка с системой синхронизации по схеме равнозначных координат рассмотрим на примере фрезерования

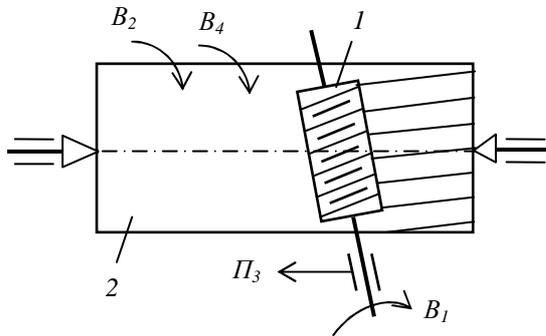


Рисунок 5. – Способ фрезерования червячной фрезой шлицевых валов

червячной фрезой винтовых и прямых шлицев. На рисунке 5 приведена схема способа фрезерования червячной фрезой винтовых шлицев. Характеристический образ червячной фрезы есть K -элементный класс равномоощных множеств $\{M_s\}$, где $\{M_s\}$ – множество материальных точек, образующих вершинную и боковые режущие кромки каждого зуба фрезы. Класс образования шлицевой поверхности обкат – касание ($H^K - \Pi$) [4]. По этому способу воспроизведение винтовой шлицевой поверхности должно осуществляться четырьмя элементарными движениями B_1 и P_3 червячной фрезы 1 и B_2 и B_4 обрабатываемой заготовки 2, образующими два сложных двухэлементарных формообразующих движения: обката $\Phi_v(B_1B_2)$ и винтовое $\Phi_s(P_3B_4)$. При этом на заготовке суммируется два вращательных движения. Следовательно, кинематическая структура станка будет содержать только три исполнительных органа – шпиндель фрезы, суппорт фрезы и шпиндель заготовки. Таким образом, кинематическая структура станка должна содержать две сложные формообразующие пересекающиеся группы $\Phi_v(B_1B_2)$ и $\Phi_s(P_3B_4)$.

При обработке прямых шлицев отпадает необходимость в движении B_4 . В этом случае сложное формообразующее движение $\Phi_s(P_3B_4)$ преобразуется в простое $\Phi_s(P_3)$. Соответственно сложная двухэлементарная группа подачи преобразуется в простую элементарную группу.

На втором этапе осуществим графическое оформление подвижных исполнительных органов и источников энергии (электродвигателей) структурной схемы станка.

Общую компоновку базовых блоков и подвижных исполнительных органов выполним аналогично компоновке, принятой для шлицефрезерных станков (рисунок 6).

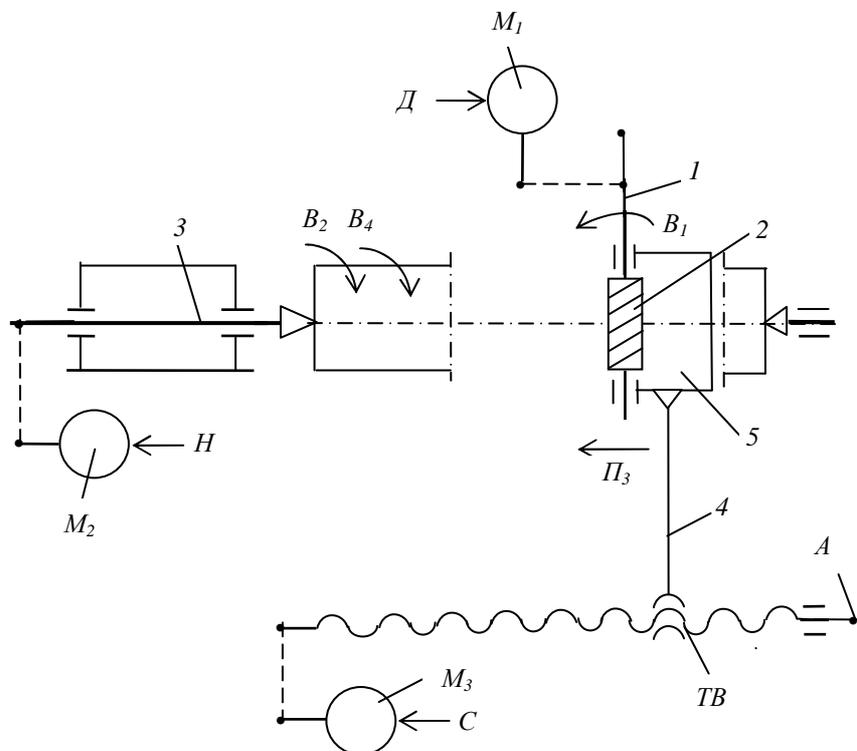


Рисунок 6. – Исполнительные органы структурной схемы станка

Управляемые электродвигатели (предпочтительно синхронные переменного тока M_1, M_2, M_3) кинематически свяжем соответственно со шпинделем 1 червячной фрезы 2, шпинделем 3, несущим заготовку, и тяговым валом TB , выполненным в виде передачи винт-гайка с телами качения. Гайку тягового вала жесткой связью 4 соединим с суппортом 5, несущим шпиндель 1 червячной фрезы 2. Шпиндель червячной фрезы, шпиндель заготовки и суппорт червячной фрезы являются подвижными исполнительными органами станка.

На третьем этапе синтезируем систему синхронизации исполнительных органов на базе типовых интегральных схем (рисунок 7). Общим задатчиком для исполнительных органов служит эталонный генератор 1, вырабатывающий задающий импульсный сигнал, частота которого превышает частоту импульсных сигналов – аналогов частот вращения шпинделя червячной фрезы, шпинделя заготовки и тягового вала. Эталонный генератор 1 соединим с входами делителей частоты, выполненных в виде счетчиков 2, 3, 4, 5 и соединенных с ними блоков установки коэффициентов деления соответственно 6, 7, 8, 9. Функция этих блоков – установка передаточных отношений при наладке станка. Выход счетчика 2 соединим с входом блока 10 круговой частоты шпинделя фрезы в движении B_1 . Выход блока 10 посредством предварительного усилителя 11 соединим с усилителем мощности 12, а выход этого усилителя соединим с управляемым электродвигателем M_1 (см. рисунок 6) привода вращения фрезы.

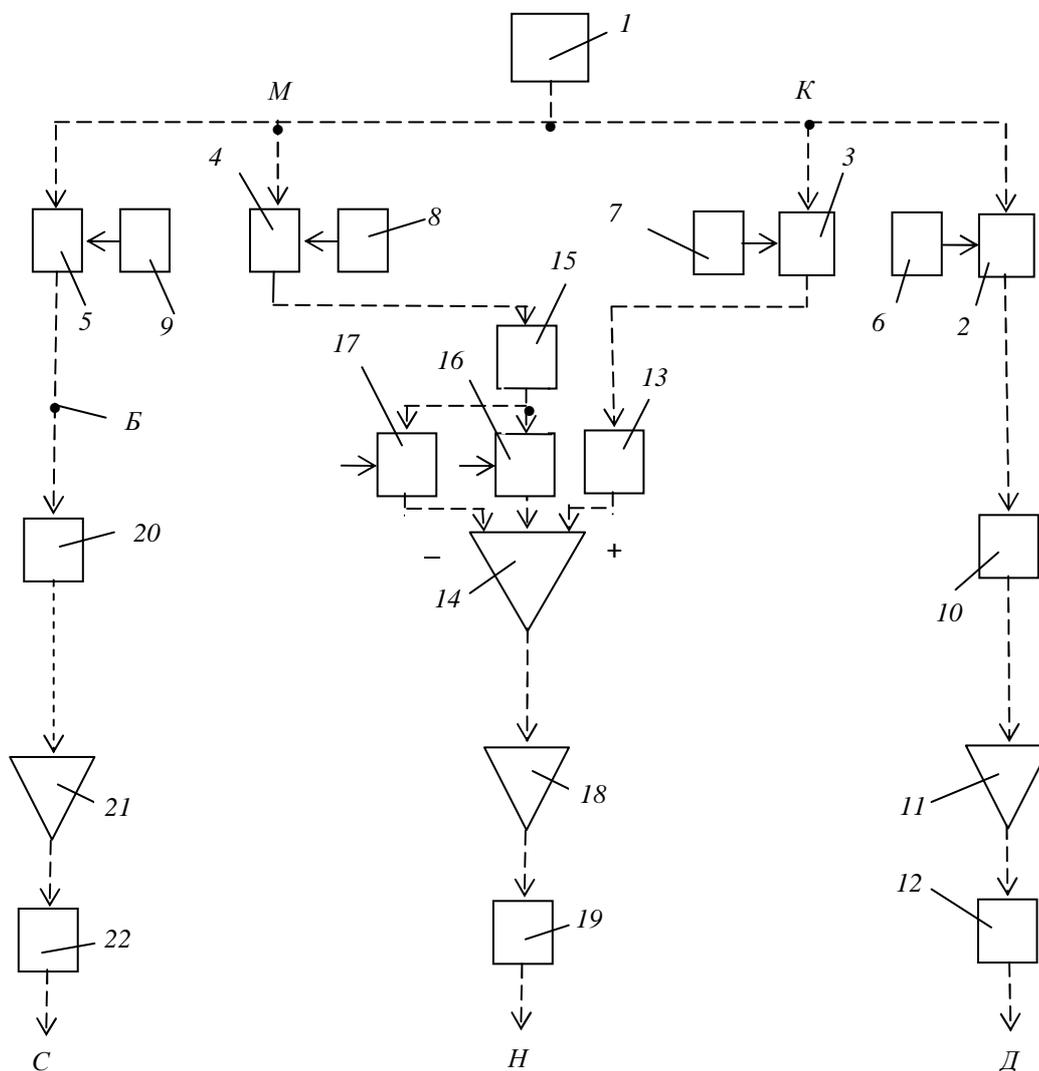


Рисунок 7. – Система синхронизации исполнительных органов станка по схеме равнозначных координат

Выход счетчика 3 соединим с входом блока 13 круговой частоты шпинделя заготовки в движении B_2 , выход которого соединим с первым входом сложения параллельного сумматора 14. Выход счетчика 4 соединим с входом блока 15 круговой частоты шпинделя заготовки в движении B_4 , у которого выход

соединен с входами ключей 16 и 17, управляемых положительным потенциалом. Выходы этих ключей соединим соответственно со вторым входом сложения и входом вычитания параллельного сумматора 14. Выход параллельного сумматора 14 соединим через предварительный усилитель 18 и усилитель мощности 19 с управляемым электродвигателем M_2 (см. рисунок 6) привода вращения шпинделя заготовки.

Выход счетчика 5 соединим с входом блока 20 круговой частоты ведущего звена тягового вала TB , преобразующего вращательное движение в продольную подачу $П_3$ суппорта 5. Выход блока 20 посредством предварительного усилителя 21 соединим с усилителем мощности 22. Выход этого усилителя соединим с управляемым электродвигателем M_3 (см. рисунок 5) привода продольной подачи суппорта.

Блоки 10, 13, 15, 20 круговых частот соответственно шпинделя фрезы, шпинделя заготовки, винта тягового вала выполняются одинаково по схеме «частота – напряжение». В этих блоках задающие импульсные сигналы преобразуются в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. Функциональное назначение блоков – задание скорости резания в движении B_1 шпинделя червячной фрезы, суммарной круговой подачи шпинделя заготовки в движении $B_2 \pm B_4$, продольной подачи в движении $П_3$ суппорта червячной фрезы.

Запишем связи проектируемой гибридной структурной схемы станка на языке символов, принятом в станковедении.

Группа $\Phi_1(B_1B_2)$. Ее внутренняя связь – мехатронная цепь, связывающая червячную фрезу и обрабатываемую заготовку:

$$B_1 \rightarrow 1 \rightarrow M_1 \rightarrow A \rightarrow 12 \rightarrow 11 \rightarrow 10 \rightarrow 2 \rightarrow \text{разъем } K \rightarrow 3 \rightarrow 13 \rightarrow 14 \rightarrow 18 \rightarrow 19 \rightarrow H \rightarrow M_2 \rightarrow B_2.$$

Внешняя связь: *Эталонный генератор* $1 \rightarrow \text{разъем } K$.

Группа настраивается на два параметра: на траекторию – делителем частоты (3...7); на скорость резания – делителем частоты (2...6).

Группа $\Phi_3(П_3B_4)$. Ее внутренняя связь – мехатронная цепь, связывающая червячную фрезу и обрабатываемую заготовку:

$$П_3 \rightarrow 5 \rightarrow TB \rightarrow M_3 \rightarrow C \rightarrow 22 \rightarrow 21 \rightarrow 20 \rightarrow 5 \rightarrow \text{разъем } M \rightarrow 4 \rightarrow 15 \rightarrow 16,$$

или $17 \rightarrow 14 \rightarrow 18 \rightarrow 19 \rightarrow H \rightarrow M_2 \rightarrow B_2$.

Внешняя связь:

Эталонный генератор $1 \rightarrow \text{разъем } M$.

Группа настраивается на четыре параметра: на траекторию – делителем частоты (4...8); на скорость подачи – делителем частоты (5...9); на путь и исходное положение – программно.

Согласно нормативам резания при шлицефрезеровании червячными фрезами скорость резания принимается по круговой частоте фрезы (движение B_1), а подача по ее перемещению параллельно оси заготовки (движение $П_3$). При наладке станка блоком 6 установки коэффициента деления задают частоту импульсного сигнала на выходе счетчика 2, соответствующую заданной скорости резания. Аналогично блоком 9 установки коэффициента деления задают частоту импульсного сигнала на выходе счетчика 5, соответствующую заданной подаче.

РП для исполнительных органов станочного зацепления, воспроизводящего движение обката $\Phi_v(B_1B_2)$:

$$1 \text{ об. шпинделя 1 фрезы } (B_1) \rightarrow \kappa/z \text{ об. шпинделя 3 заготовки } (B_2),$$

где κ – число заходов червячной фрезы; z – число нарезаемых шлицев.

УКЦ станочного зацепления:

$$\kappa/z = I \cdot c_1 \cdot n_1 / n_2,$$

где c_1 – произведение передаточных отношений постоянных механических передач кинематической связи; n_1 – круговая частота электродвигателя M_1 , соответствующая заданной скорости резания, мин^{-1} ; n_2 – круговая частота электродвигателя M_2 , необходимая для обеспечения функциональной связи в движении обката, мин^{-1} .

Заменим в УКЦ отношение круговых частот отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках. Тогда

$$\kappa/z = I \cdot c_1 \cdot i_2 / i_3.$$

По этому выражению определим коэффициент деления (ФН), устанавливаемый на делителе частоты (3...7):

$$i_3 = (c_1 z / \kappa) i_2,$$

где i_2 – коэффициент деления, установленный на делителе частоты (2...6), соответствующий заданной круговой частоте электродвигателя M_1 (скорости резания); i_3 – коэффициент деления, который необхо-

димо установить на делителе частоты (3...7) для обеспечения функциональной связи шпинделя фрезы и шпинделя заготовки.

РП для исполнительных органов станочного зацепления, воспроизводящего винтовое движение $\Phi_s(P_3 B_4)$:

$$P \text{ мм перемещения суппорта } 5 (P_3) \rightarrow 1 \text{ об. шпинделя } 3 (B_4).$$

УКЦ станочного зацепления:

$$I = (P / P_{ТВ} \cdot (n_3 / n_2) \cdot c_2,$$

где P – шаг винтовой линии нарезаемых шлицев; $P_{ТВ}$ – шаг тягового вала; c_2 – произведения постоянных механических передач кинематической связи; n_3 – круговая частота электродвигателя M_3 , соответствующая заданной подаче, мм/мин; n_2 – круговая частота электродвигателя M_2 , необходимая для обеспечения функциональной связи в винтовом движении, мм/мин.

Заменим в УКЦ отношение круговых частот отношением коэффициентов деления на соответствующих блоках:

$$I = (P / P_{ТВ}) \cdot (i_5 / i_4) \cdot c_2.$$

Из этого выражения определим коэффициент деления (ФН), устанавливаемый на делителе частоты (4...8):

$$i_4 = (c_2 T / P) i_5,$$

где i_4 – коэффициент деления, который необходимо установить на делителе частоты (4...8) для обеспечения функциональной связи суппорта и шпинделя заготовки; i_5 – коэффициент деления, установленный на делителе частоты (5...9), соответствующий заданной круговой частоте электродвигателя M_3 (скорости подачи).

Шпиндель заготовки является исполнительным органом обоих станочных зацеплений. При работе устройства результирующая круговая частота этого шпинделя представляет собой математическую сумму $B_2 \pm B_4$ двух движений B_2 и B_4 , образующих совместно соответственно с движениями B_1 и P_3 движение обката ($B_1 B_2$) и винтовое движение ($P_3 B_4$). Выбор знака в математической сумме движений зависит от направления винтовых линий шлицев и червячной фрезы. Знак «плюс» соответствует условию, когда винтовые линии одноименные (например, обе левые); знак «минус» соответствует условию, когда винтовые линии разноименные (например, одна правая, а другая левая). Необходимый знак устанавливается при наладке устройства подачи управляющего сигнала на потенциальный вход ключа 16 или ключа 17.

Станок работает следующим образом. При включении эталонного генератора 1 задающий высокочастотный импульсный сигнал с его выхода поступает на счетчики 2, 3, 4, 5 делителей частоты, в которых происходит деление задающего сигнала в соответствии с коэффициентами деления, установленными на блоках задания этих коэффициентов 6, 7, 8, 9.

Импульсный сигнал с выхода счетчика 2 поступает на вход блока 10 круговой частоты шпинделя фрезы, где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. С выхода блока 10 сигнал через предварительный усилитель 11 и усилитель мощности 12 сообщается управляемому электродвигателю M_1 (см. рисунок 6), который сообщает вращательное движение B_1 шпинделю фрезы с круговой частотой, соответствующей заданной скорости резания. Синхронно с выхода счетчика 3 импульсный сигнал поступает на вход блока 13 круговой подачи шпинделя заготовки в движении B_2 , где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте. Выходной сигнал с блока 13 поступает на первый вход сложения параллельного сумматора 14. Синхронно с выхода счетчика 4 импульсный сигнал поступает на вход блока 15 круговой подачи шпинделя заготовки в движении B_4 , где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте. Выходной сигнал с блока 15 поступает в зависимости от знака математического сложения движений B_2 и B_4 на одном исполнительном органе или через ключ 16 на второй вход сложения параллельного сумматора 14, или через ключ 17 на вход вычитания этого параллельного сумматора. С выхода параллельного сумматора 14 результирующий сигнал через предварительный усилитель 18 и усилитель мощности 19 сообщается управляемому электродвигателю M_2 (см. рисунок 6), который сообщает вращательное движение $B_2 \pm B_4$ круговой подачи шпинделю заготовки с круговой частотой, согласованной с движениями B_1 и P_3 червячной фрезы. Синхронно с выхода счетчика 5 импульсный сигнал поступает на вход блока 20 продольной подачи суппорта в движении P_3 , где происходит его преобразование в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала. Выходной сигнал с блока 20 через предварительный усилитель 21 и усилитель мощности 22 сообщается управляемому электродвигателю M_3 (см. рисунок 6), который посредством тягового вала $ТВ$ сообщает движение P_3 суппорту фрезы, пропорциональное частоте сигнала на выходе делителя частоты 5. В итоге описанного прохождения сигнала от общего задатчика (эталонного генератора 1) к трем исполнительным органам: шпинделю червячной фрезы, шпинделю заготовки, суппорту червяч-

ной фрезы, образующим два станочных зацепления, происходит воспроизведение профиля и винтовой линии по длине шлицев на обрабатываемой заготовке.

На станке можно обрабатывать также шлицевые поверхности с прямыми шлицами. Для этого достаточно отключить делитель частоты (4...8). В результате сложное двухэлементарное движение продольной подачи суппорта $\Phi_s(P_3B_4)$, а следовательно и соответствующая формообразующая группа коммутируются к виду $\Phi_s(P_3)$.

Выше при функциональном проектировании кинематической структуры станка для нарезания резьбы решалась также задача устранения отрицательного влияния девиации механики подачи инструментального суппорта на качество обрабатываемой поверхности. Используемый для этого формирователь сигнала коррекции задающего сигнала (см. рисунок 4) без изменений можно включить и в проектируемую структурную схему. Для этого необходимо на тяговом валу TB (см. рисунок 6, позиция A) установить импульсный измерительный преобразователь и соединить его с входом A формирователя сигнала коррекции (см. рисунок 4, позиция A). Вход B этого формирователя необходимо соединить со счетчиком 5 (см. рисунок 7, позиция B). Из схемы синхронизации необходимо исключить предварительный усилитель 21, а выход импульсно-аналогового преобразователя 20 соединить с первым входом сложения параллельного сумматора 6 (см. рисунок 4) формирователя сигнала коррекции. Выход параллельного сумматора необходимо соединить с усилителем мощности 22.

Уместно отметить, что мехатронная структурная схема шлицефрезерного станка, разработанная по методике функционального проектирования, признана изобретением [6].

Заключение. В результате проведенного исследования рассмотрено использование функционального проектирования кинематической структуры станочного оборудования с ЧПУ, содержащего сложные мехатронные формообразующие группы, по закону его функционирования, задаваемому соответствующим виртуальным техническим решением, а именно способом формообразующей обработки. Предложена методика настройки мехатронных формообразующих групп на траекторию сложного формообразующего движения и его скорость. Показано, что такой подход при использовании функционального проектирования в процессе познания станочного оборудования с ЧПУ стимулирует творческое мышление при изучении реальных технических решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федотенок, А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков. – Изд. 2-е / А.А. Федотенок. – М.: Машиностроение, 1970.
2. Голембиевский, А.И. Эволюция познания и методики преподавания дисциплины металлорежущие станки / А.И. Голембиевский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 3. – С. 2–11.
3. Голембиевский, А.И. Функциональное проектирование в методике познания дисциплины «Металлорежущие станки» / А.И. Голембиевский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2018. – № 11. – С. 2–9.
4. Голембиевский, А.И. Системология способов формообразующей обработки в машиностроении / А.И. Голембиевский. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2017. – 236 с.
5. Зубодолбежный станок с ЧПУ: а. с. SU 1366360 / А.И. Голембиевский. – Опубл. 1988.
6. Устройство для синхронизации приводов исполнительных органов шлицефрезерного станка: пат. BY 16976 / А.И. Голембиевский. – Опубл. 26.12.2012.

Поступила 14.12.2018

FUNCTIONAL DESIGN IN THE COGNITION METHOD MACHINE EQUIPMENT WITH NUMERIC PROGRAM CONTROL

A. GOLEMBIEVSKY

The use of the functional design of the kinematic structure of CNC machine tools containing complex mechatronic forming groups is considered. The operation of the equipment according to the law specified by the corresponding virtual technical solution – by means of formative processing. The iterative nature of functional design. The method of setting up mechatronic forming groups on the trajectory of a complex forming movement and its speed is proposed. The problem of eliminating the negative influence of the deviation of the mechanics of the executive bodies on the quality of the treated surface is being solved.

Keywords: machine equipment with numerical control, functional design, setting up mechatronic forming groups, settings, deviating the mechanics of executive bodies, eliminating deviation.