

## МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.9.06+372.8

### ЭВОЛЮЦИЯ РАЗВИТИЯ СЛОЖНЫХ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ГРУПП МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

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

*Кинематическая структура металлорежущего станка рассматривается как объединение кинематических групп, каждая из которых воспроизводит вполне определенное движение. Анализируются простые и сложные формообразующие группы, а также эволюция развития сложных формообразующих групп. Представлено станочное зацепление, воспроизводимое сложными формообразующими группами, имитирующими определенные механические передачи: винтовую червячную, зубчато-реечную и др. Рассмотрены сложные гибридные формообразующие группы мехатронных станочных систем, содержащие в структурной схеме типовые электронные интегральные схемы; системы синхронизации движения исполнительных органов сложных гибридных формообразующих групп. Показаны особенности настройки параметра «траектория сложных исполнительных движений», воспроизводимых гибридными формообразующими группами.*

**Ключевые слова:** кинематическая структура металлорежущего станка, станочное зацепление, формообразующие группы, эволюция развития сложных формообразующих групп.

**Введение.** Современная научная парадигма [1], основанная на положениях теоретической механики (принципе возможных перемещений и законе разветвления энергии движения в кинематических цепях), рассматривает кинематическую структуру металлорежущего станка как объединение кинематических групп, каждая из которых воспроизводит вполне определенное формообразующее или вспомогательное движение. Определяющую роль в формировании кинематической структуры станка играют группы формообразования, воспроизводящие образующую и направляющую реальных поверхностей. В зависимости от характеристического образа инструмента и класса воспроизведения образующей и направляющей многообразия формообразующих групп можно разделить на два вида: *первый вид* составляют простые, или элементарные, формообразующие группы, воспроизводящие простое вращательное или поступательное формообразующее движение. В таких группах траектория формообразующего движения не настраивается, а ее вид задается непосредственно соответствующей элементарной вращательной или поступательной кинематической парой; *второй вид* – сложные формообразующие группы, воспроизводящие сложное двухэлементарное (реже трехэлементарное) формообразующее движение, имитирующее более сложный механизм, например передачу винт-гайка, червячную передачу, зубчато-реечную передачу и т.д. В таких группах траектория формообразующего движения в станках с механическими связями настраивается соответствующим механизмом, например гитарой сменных зубчатых колес, передаточное отношение которой определяется с точностью до 5...7 знаков после запятой.

На рисунке 1 приведена классическая структурная схема винторезного станка, содержащего двухэлементарную формообразующую группу  $\Phi_1(B_1P_2)$ , воспроизводящую направляющую винтовую линию резьбы на заготовке 1, профиль (образующая) которой воспроизводится зеркальным отображением характеристического образа резца 2. В этом случае класс образования винтовой поверхности «копирование + след». По существу данная схема является частной винторезной структурой, входящей в общую структурную схему универсальных металлорежущих станков токарной группы.

Внутренняя связь рассматриваемой формообразующей группы – кинематическая цепь, состоящая из механических передач:

$$B_1 \leftarrow 3 \leftarrow 4 \leftarrow 5 \rightarrow i_x \rightarrow R_1 \rightarrow 6 \rightarrow TB \rightarrow 7 \rightarrow P_2.$$

Внешняя связь:

$$M \rightarrow 8 \rightarrow R_2 \rightarrow i_v \rightarrow 5.$$

Внутренняя связь создает потенциальную возможность винтового движения и обеспечивает качественную характеристику этого движения, т.е. его траекторию. Поэтому во внутренней связи расположен орган настройки на траекторию  $i_x$ , посредством которого устанавливают жесткую кинематическую связь между исполнительными органами шпинделем 3 и кареткой 7, и реверс  $R_1$ , обеспечивающий возможность воспроизведения левой или правой винтовой линии резьбы. Внешняя связь обеспечивает количе-

ственную характеристику исполнительного движения, т.е. скорость воспроизведения направляющей, для чего во внешней связи установлен орган настройки на скорость  $i_v$  исполнительного движения и технологический реверс  $R_2$ , предназначенный для реверсирования движения формообразования при многопроходной обработке. Вывод формул настройки для органов настройки  $i_x$  и  $i_v$  приведен в работе [1].

Таким образом, внутренняя связь сложной винторезной кинематической группы при функционировании имитирует передачу винт-гайка. Скорость этой имитации (темп воспроизведения направляющей винтовой поверхности) зависит только от скорости звена 5 соединения связей, являющегося конечным звеном внешней связи. Это правило характерно для любой сложной формообразующей группы, имитирующей другую передачу, например, червячную, зубчатую, зубчато-реечную.

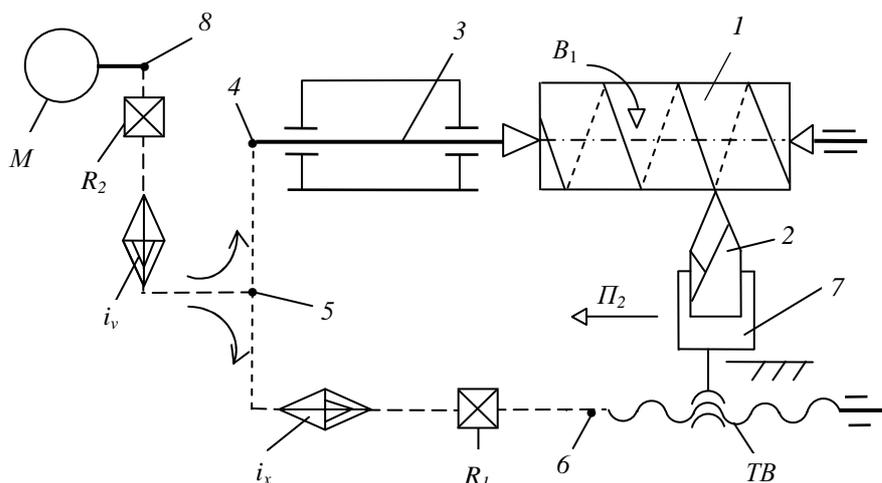


Рисунок 1. – Частная структурная схема станка с механическими связями для нарезания резьбы

**Постановка задачи.** Теория кинематической структуры металлорежущих станков разрабатывалась ее автором [2] на основе кинематического анализа станочного оборудования с механическими связями. Появление мехатронных технических систем, в том числе металлорежущих станков с числовым программным управлением (ЧПУ), и их интенсивное развитие привело к созданию сложных гибридных формообразующих групп, структура которых представляет собой объединение механических и электронных связей на основе типовых интегральных схем. Поэтому считаем целесообразным с позиций современной парадигмы познания станочного оборудования рассмотреть эволюцию развития таких групп, имитирующих приведенные выше передачи.

Как показывает анализ патентных источников, в сложных гибридных формообразующих группах, воспроизводящих станочное зацепление, имитирующее конкретную передачу, жесткая связь (синхронизация) исполнительных органов осуществляется, как правило, отслеживающей синхронизацией по схеме «задающая – ведомая координаты» или по схеме равнозначных координат.

**Отслеживающая синхронизация по схеме задающая – ведомая координаты.** На рисунке 2 приведена мехатронная структурная схема винторезного станка, содержащего гибридную двухэлементарную формообразующую группу  $\Phi_v(B_1\Pi_2)$ , воспроизводящую направляющую винтовую линию резьбы на заготовке 1. Профиль (образующая) резьбы, как и в схеме, представленной рисунке 1, воспроизводится зеркальным отображением характеристического образа резца 2. Класс образования винтовой поверхности – «копирование + след». Данная схема является частной винторезной структурой, входящей в общую структурную схему универсальных металлорежущих станков с ЧПУ. В токарных станках с ЧПУ оба исполнительных органа формообразующей группы  $\Phi_v(B_1\Pi_2)$  имеют отдельные электродвигатели, а жесткая функциональная связь элементарных движений  $B_1$  и  $\Pi_2$  осуществляется посредством электронной системы синхронизации, выполненной по схеме задающая – ведомая координаты. Задающей (ведущей) координатой является шпиндель 3 заготовки 1, ведомой – каретка 4, несущая инструмент 2. На различных этапах развития в качестве электродвигателя  $M_1$  ведущей координаты, как правило, используется асинхронный электродвигатель. При этом на первых этапах в качестве органа настройки  $i_v$  использовалась типовая ступенчатая автоматическая коробка скоростей с электромагнитными муфтами. В современных станках рассматриваемого типа эта коробка заменена частотным преобразователем, обеспечивающим бесступенчатое регулирование круговой частоты электродвигателя  $M_1$ . В качестве электродвигателя  $M_2$  ведомой координаты последовательно использовались шаговый электродвигатель с гидросилителем крутящего момента, высокомоментный электродвигатель постоянного тока и синхронный электродвигатель.

Внутренняя связь гибридной формообразующей группы первых моделей токарных станков с ЧПУ – мехатронная цепь, включающая механические передачи и типовые интегральные схемы:

$$B_1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow \text{синхронная следящая система} \rightarrow M_2 \rightarrow TB \rightarrow 4 \rightarrow \Pi_2.$$

Внешняя связь – механическая цепь:

$$M_1 \rightarrow R_1 \rightarrow i_v \rightarrow \text{звено соединения связей 5}.$$

Синхронная следящая система содержит измерительный преобразователь 6, кинематически связанный посредством звена соединения связей 5 со шпинделем 3. Выход этого преобразователя соединен с входом управляемого делителя частоты, выполненного в виде счетчика импульсов 7 и блока задания коэффициента деления 8. Выход счетчика 7 соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя 9. Выход этого преобразователя через предварительный усилитель 10 и усилитель мощности 11 соединен с электродвигателем  $M_2$ , кинематически связанным с тяговым валом  $TB$  привода поступательного движения каретки 4.

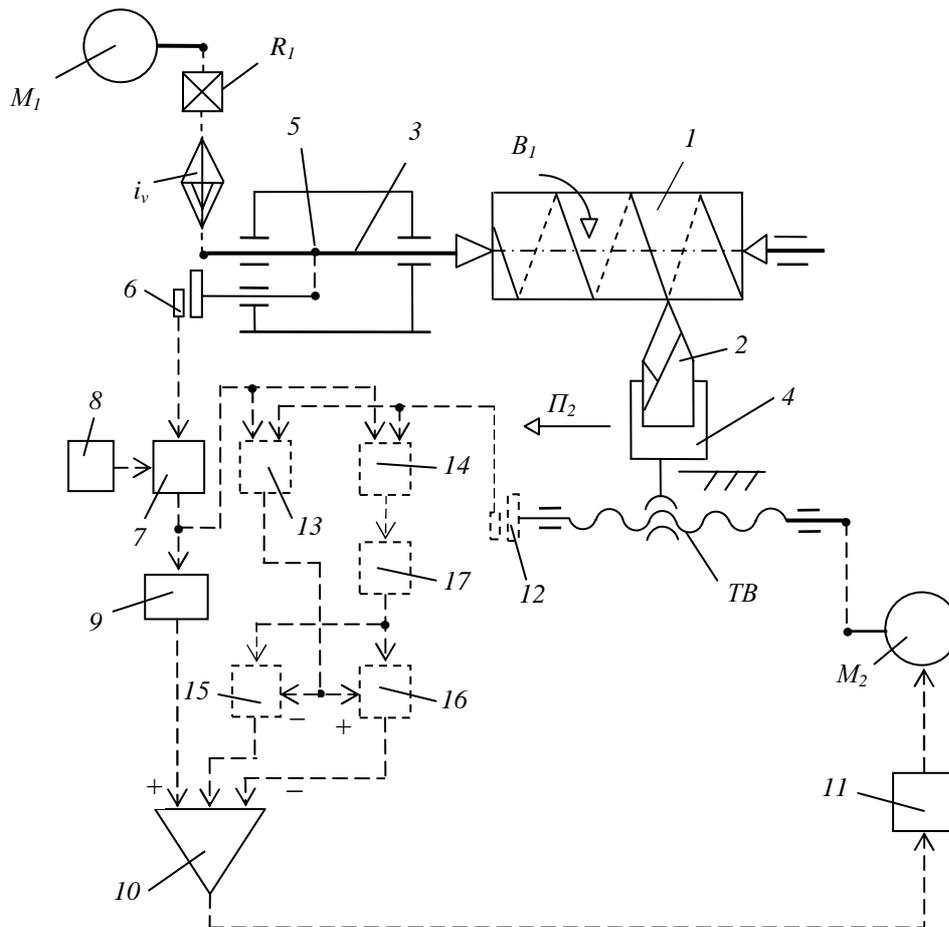


Рисунок 2. – Мехатронная структура резьбонарезного станка с электронной системой синхронизации по схеме задающая – ведомая координаты

Принципиальной особенностью рассматриваемой схемы системы синхронизации является размещение электродвигателя ведомой координаты во внутренней связи формообразующей группы. При этом измерительный преобразователь 6 выполняет функцию задатчика управляющего сигнала для электродвигателя  $M_2$  ведомой координаты – каретки 4. Делитель частоты (счетчик 7 – блок установки коэффициента деления 8) является аналогом органа настройки  $i_x$  на траекторию (винтовую линию) в структурной схеме, представленной на рисунке 1. Поэтому коэффициент деления определяется по формуле, аналогичной формуле для определения передаточного отношения органа настройки  $i_x$ :

$$k_x = P / (i_0 P_{TB}),$$

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

При включении электродвигателя  $M_1$  ведущая координата – шпиндель 3 – получает движение  $V_1$  с круговой частотой, соответствующей скорости резания. Вращательное движение шпинделя непрерывно преобразуется в измерительном преобразователе 6 в высокочастотный импульсный сигнал, пропорциональный круговой частоте движения  $V_1$ . Этот сигнал поступает в счетчик 7 делителя частоты, где происходит его деление в соответствии с заданным на блоке 8 коэффициентом деления. Импульсный сигнал с выхода делителя частоты преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 9 в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, и с его выхода поступает на предварительный усилитель 10. С выхода этого усилителя задающий сигнал через усилитель мощности 11 поступает на управляемый электродвигатель  $M_2$ , который посредством тягового вала  $TB$  сообщает движение  $P_2$  ведомой координате – каретке 4, несущей резец. В результате такого прохождения сигнала от ведущей координаты к ведомой координате обеспечивается воспроизведение винтовой поверхности (резьбы) сложным двухэлементарным движением  $\Phi_v(B_1P_2)$ .

При использовании рассмотренной структурной схемы девиация механики ведомой координаты проецируются на воспроизводимую винтовую поверхность. Это явление, снижающее качественные показатели получаемой резьбы, можно устранить посредством модификации схемы синхронизации, обеспечивающей непрерывную коррекцию задающего сигнала ведомой координаты. Для решения данной задачи на тяговом валу устанавливается измерительный преобразователь 12, а предварительный усилитель 10 заменяется параллельным сумматором, у которого первый вход сложения соединяется с выходом импульсно-аналогового преобразователя 9, а выход – с усилителем мощности 11 [3]. В схему синхронизации вводятся знаковый 13 и фазовый 14 дискриминаторы, ключ 15, управляемый отрицательным потенциалом, ключ 16, управляемый положительным потенциалом, и импульсно-аналоговый преобразователь 17. Первые входы дискриминаторов 13 и 14 соединяют с выходом импульсно-аналогового преобразователя 9, а вторые входы этих дискриминаторов соединяют с выходом измерительного преобразователя 12. Выход знакового дискриминатора 13 соединяют с управляющим входом ключа 15, управляемого отрицательным потенциалом, и с управляющим входом ключа 16, управляемого положительным потенциалом. Выход фазового дискриминатора 14 соединяют с входом импульсно-аналогового преобразователя 17, а выход этого преобразователя – с аналоговыми входами ключей 15 и 16. Выходы ключей 15 и 16 соединяют соответственно со вторым входом сложения и входом вычитания параллельного сумматора 10.

Коррекция задающего сигнала, действующего на выходе параллельного сумматора 10, осуществляется следующим образом. На первых входах знакового 13 и фазового 14 дискриминаторов постоянно действует задающий импульсный сигнал с выхода счетчика 7 делителя частоты. На вторые входы обоих дискриминаторов непрерывно с импульсно-аналогового преобразователя 12 поступает импульсный сигнал – аналог скорости движения  $P_2$  каретки 4. В результате сравнения сигналов на выходе знакового дискриминатора образуется отрицательный потенциал при отставании ведомой координаты от заданного значения и положительный потенциал при его опережении. Этот потенциал поступает на управляющие входы ключей 15 и 16. Синхронно на выходе фазового дискриминатора 14 непрерывно образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 17 поступает на аналоговые входы ключей 15 и 16. Этот сигнал поступает на параллельный сумматор 10 через один из ключей в зависимости от знака управляющего воздействия. При отставании ведомой координаты сигнал абсолютной погрешности поступает через ключ 15, управляемый отрицательным потенциалом, на второй вход сложения параллельного сумматора 10, а при опережении этот сигнал поступает через ключ 16, управляемый положительным потенциалом, на вход вычитания этого сумматора. В итоге в параллельном сумматоре 10 происходит в зависимости от знака погрешности увеличение или уменьшение управляющего сигнала ведомой координаты, т.е. происходит его непрерывная двухсторонняя коррекция относительно номинального значения.

**Система синхронизации по схеме равнозначных координат.** В рассмотренной сложной гибридной формообразующей группе с системой синхронизации исполнительных органов по схеме задающая – ведомая координата (каретка 4) режущего инструмента 2 – «отслеживает» движение ведущей координаты – шпинделя 3 заготовки 1, а следовательно «отслеживает» девиацию механики этой координаты. Этот недостаток устраняется при использовании более сложной системы синхронизации [4], выполненной по схеме равнозначных координат. На рисунке 3 приведена соответствующая структурная схема винторезного станка, содержащего гибридную двухэлементарную формообразующую группу  $\Phi_v(B_1P_2)$ , которая выполняет такую же функцию, что и подобная группа в схеме по рисунку 2, т.е. воспроизведение направляющей винтовой линии резьбы на заготовке 1 резцом 2.

Внутренняя связь сложной гибридной группы  $\Phi_v(B_1P_2)$  в этом техническом решении:

$V_1 \rightarrow$  шпиндель 3  $\rightarrow M_1 \rightarrow$  система синхронизации приводов  $\rightarrow M_2 \rightarrow TB \rightarrow$  каретка 4  $\rightarrow P_2$ .

Внешняя связь:

*импульсный эталонный генератор 5  $\rightarrow$  шина 6 связи с системой синхронизации.*

На обеих координатах (исполнительных органах станка) установлены импульсные измерительные преобразователи 7 и 8. Привод исполнительных органов осуществляется управляемыми, например, синхронными электродвигателями.

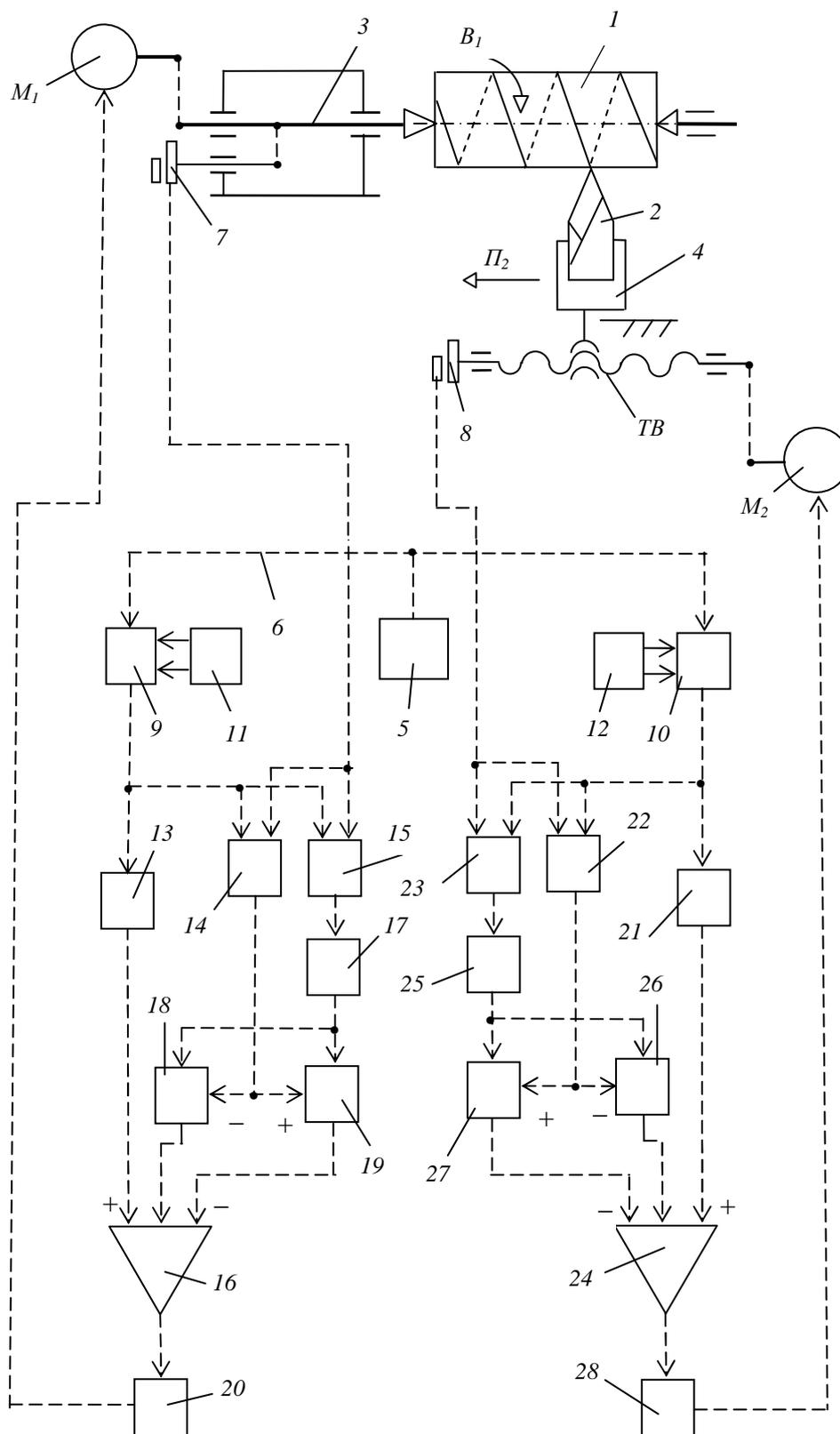


Рисунок 3. – Структура резонансного станка с системой синхронизации исполнительных органов по схеме равнозначных координат

Высокочастотный импульсный эталонный генератор 5 является общим задатчиком для электродвигателей  $M_1$  и  $M_2$ . Его выход соединен с входами счетчиков 9 и 10, образующими делители частоты

совместно с блоками соответственно 11 и 12 установки коэффициентов деления. Выход счетчика 9 соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя 13 и с первыми входами знакового 14 и фазового 15 дискриминаторов. Вторые входы этих дискриминаторов соединены с импульсным измерительным преобразователем 7. Выход импульсно-аналогового преобразователя 13 соединен с первым входом сложения параллельного сумматора 16. Выход фазового дискриминатора 15 через импульсно-аналоговый преобразователь 17 соединен с аналоговым входом ключа 18, управляемого отрицательным потенциалом, и с аналоговым входом ключа 19, управляемого положительным потенциалом. Управляющие входы ключей 18 и 19 соединены с выходом знакового дискриминатора 14. Выход ключа 18 соединен со вторым входом сложения параллельного сумматора 16, а выход ключа 19 – с входом вычитания этого сумматора. Выход параллельного сумматора 16 соединен через усилитель мощности 20 с управляемым электродвигателем  $M_1$  шпинделя 3 заготовки.

Выход счетчика 10 соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя 21 и с первыми входами знакового 22 и фазового 23 дискриминаторов. Вторые входы этих дискриминаторов соединены с импульсным измерительным преобразователем 8. Выход импульсно-аналогового преобразователя 21 соединен с первым входом сложения параллельного сумматора 24. Выход фазового дискриминатора 23 через импульсно-аналоговый преобразователь 25 соединен с аналоговым входом ключа 26, управляемого отрицательным потенциалом, и с аналоговым входом ключа 27, управляемого положительным потенциалом. Управляющие входы ключей 26 и 27 соединены с выходом знакового дискриминатора 22. Выход ключа 26 соединен со вторым входом сложения параллельного сумматора 24, а выход ключа 27 – с входом вычитания этого сумматора. Выход параллельного сумматора 24 соединен через усилитель мощности 28 с управляемым электродвигателем  $M_2$  каретки 4 режущего инструмента.

Нормируемым технологическим параметром при нарезании резьбы является скорость резания. При настройке станка по общеизвестной зависимости, связывающей скорость резания, диаметр заготовки и ее круговую частоту при обработке, определяют круговую частоту шпинделя 3 (параметр настройки скорости). Посредством блока 11 устанавливают коэффициент деления  $k_v$ , при котором на выходе счетчика 9 при функционировании схемы синхронизации образуется импульсный сигнал – аналог напряжения переменного тока, соответствующий круговой частоте шпинделя 3.

Для вывода коэффициента деления, устанавливаемого на делителе частоты (счетчик 10 – блок 12 установки коэффициента деления), воспользуемся известными расчетными перемещениями:

$$1 \text{ оборот заготовки } (B_1) \rightarrow P \text{ мм перемещения инструмента } (П_2),$$

где  $P$  – шаг нарезаемой резьбы.

Тогда уравнение кинематической цепи (УКЦ) для расчетной цепи, совпадающей с внутренней связью, имеет вид:

$$P = 1 \cdot i_{01} (n_{M1} / n_{M2}) P_{ТВ},$$

где  $i_{01}$  – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Круговые частоты электродвигателей  $M_1$  и  $M_2$  однозначно зависят от задающих сигналов на выходе счетчиков 9 и 10 соответственно. Поэтому в УКЦ круговые частоты электродвигателей можно заменить коэффициентами деления. Тогда

$$P = 1 \cdot i_{01} (k_v / k_x) P_{ТВ}.$$

Из полученного выражения выводится формула настройки параметра «траектория»:

$$k_x = c \cdot k_v / P,$$

где  $c \cdot P_{ТВ}$  – константа механики конкретного станка.

Функционирование станка с описанной системой синхронизации исполнительных органов осуществляется следующим образом. Генератор 5 вырабатывает эталонный высокочастотный сигнал. Этот сигнал поступает на счетчики 9 и 10 делителей частоты, в которых происходит деление этого сигнала в соответствии с коэффициентами деления, установленными на блоках 11 и 12. Сигнал с выхода счетчика 9 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 13 в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, и с его выхода через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 16 – и усилитель мощности 20 поступает на управляемый электродвигатель  $M_1$ , сообщающий шпинделю 3, несущему заготовку, движение  $B_1$ . Синхронно импульсный сигнал с выхода счетчика 10 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 21 в напряжение, пропорциональное частоте на его входе, и через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 24 и усилитель мощности 28 поступает на управляемый электродвигателя  $M_2$ , который сообщает движение  $П_2$  каретке 5, несущей инструмент. В итоге такого прохождения задающего сигнала от общего задатчика (генератора 5) к обоим координа-

там (исполнительным органам винторезной группы) осуществляется воспроизведение винтовой линии сложным формообразующим движением  $\Phi_v(B_1P_2)$ .

Одновременно посредством дополнительных блоков устраняется девиация механических систем обоих исполнительных органов посредством коррекции управляющих сигналов на выходах параллельных сумматоров. На первых входах знакового 14 и фазового 15 дискриминаторов постоянно действует эталонный импульсный сигнал с выхода счетчика 9. На вторые входы этих дискриминаторов поступает сигнал с импульсного измерительного преобразователя 7, соответствующий значению действительной круговой подачи шпинделя 3. В дискриминаторах оба сигнала непрерывно сравниваются. В результате на выходе знакового дискриминатора 14 появляется отрицательный или положительный потенциал соответственно при отставании или при опережении шпинделем номинального значения круговой частоты. Этот сигнал поступает на управляющие входы ключей 18 и 19. Параллельно на аналоговые входы этих ключей поступает сигнал абсолютной погрешности с фазового дискриминатора 15 через импульсно-аналоговый преобразователь 17. Сигнал абсолютной погрешности поступает на второй вход сложения параллельного сумматора 16 через ключ 18 при отставании шпинделя или на вход вычитания этого сумматора через ключ 19 при опережении шпинделем номинального значения. В итоге в параллельном сумматоре происходит коррекция задающего сигнала, действующего на его первом входе сложения, т.е. происходит предельная двухсторонняя адаптация задающего сигнала по параметру девиации механики исполнительного органа – шпинделя 3.

Аналогично в знаковом 22 и фазовом 23 дискриминаторах сравнивается эталонный задающий импульсный сигнал с выхода счетчика 10 с сигналом – аналогом действительной скорости каретки 4, поступающим с импульсного измерительного преобразователя 8. Сигнал абсолютной погрешности преобразуется в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 25 и поступает через ключи 26 или 27 в параллельный сумматор 24 для коррекции задающего сигнала, действующего на его первом входе сложения. В итоге осуществляется предельная двухсторонняя адаптация задающего сигнала по параметру девиации механики исполнительного органа – каретки 4.

**Заключение.** С позиций современной парадигмы познания станочного оборудования рассмотрены две базовые схемы сложных гибридных формообразующих групп, содержащих в структурных схемах электронную систему синхронизации на базе типовых интегральных схем. Различные модификации этих групп используются в металлорежущих станках с ЧПУ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Голембиевский, А.И. Эволюция познания и методики преподавания дисциплины металлорежущие станки / А.И. Голембиевский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 11. – С. 2–11.
2. Федотенок, А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А.А. Федотенок. – Изд. второе. – М. : Машиностроение, 1970.
3. Зубодолбежный станок с ЧПУ : а. с. SU 1366360 / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 1988.
4. Устройство для синхронизации приводов шпинделя и делительного стола зубодолбежного станка : пат. BY 8621 / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 30.10. 2006.

Поступила 07.08.2017

#### THE EVOLUTION OF THE COMPLEX FORMING GROUPS OF METAL-CUTTING MACHINES

**A. GOLEMBIEWSKI**

*Kinematic structure of machine tools is considered as a unification of kinematic groups, each of which plays a definite movement. The simple and complex forming groups, and the evolution of complex forming groups are analysed. Machine tool gearing, reproducible complex forming groups that mimic certain power transmission: worm screw, rack and pinion etc. is represented. A complex hybrid of forming groups of mechatronic machine-tool systems containing the block diagram of typical electronic integrated circuits; the system of synchronization of movement of Executive bodies of complex hybrid forming groups are considered. The features of the setting, "the trajectory of complex Executive movements" reproduced forming hybrid groups are shown.*

**Keywords:** kinematic structure in machine tools, machine coupling, forming the group, the evolution of the complex forming groups.