

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.9.06+372.8

ЭВОЛЮЦИЯ РАЗВИТИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ ДЛЯ ЗУБОТОЧЕНИЯ ОБКАТНЫМ РЕЗЦОМ ТИПА ДОЛБЯКА

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

Рассматривается целенаправленная эволюция развития металлорежущих станков для обработки цилиндрических зубчатых колес обкатным резцом типа зуборезного долбяка: металлорежущий станок для зуботочения как объединение кинематических групп различного функционального назначения. Показана определяющая роль групп формообразования в формировании кинематической структуры металлорежущих станков: простые и сложные формообразующие группы, сложные гибридные механико-гидравлические и мехатронные формообразующие группы. Рассмотрены механико-гидравлическая и мехатронная структурные схемы станка для зуботочения обкатным резцом типа долбяка цилиндрических зубчатых колес. Выполнен кинематический анализ особенностей настройки.

Ключевые слова: зуботочение обкатным резцом, металлорежущие станки для зуботочения цилиндрических колес, формообразующие группы, гибридные механико-гидравлические и мехатронные группы, кинематический анализ, настройка.

Введение. В работе [1] показано, что определяющую роль в формировании кинематической структуры металлорежущих станков играют группы формообразования, воспроизводящие образующую и направляющую реальных поверхностей. Многообразие формообразующих групп в современных металлорежущих станках разделено 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 кинематической парой исполнительного органа, воспроизводящего простое движение. По существу, кинематическая пара исполнительного органа – это внутренняя связь простой группы. *Второй вид* – сложные формообразующие группы, воспроизводящие станочное зацепление, имитирующее более сложный механизм, например передачу винт-гайка, зубчатую, червячную, зубчато-реечную. В таких группах траектория сложного формообразующего движения настраивается расположенным во внутренней связи группы соответствующим органом настройки, задающим жесткую функциональную связь между исполнительными органами группы. В сложных формообразующих группах, состоящих только из механических передач, в качестве органа настройки используются, как правило, гитары сменных зубчатых колес, передаточное отношение которых определяют с точностью до 5...7 знаков после запятой.

В работе [2] рассмотрен способ зуботочения цилиндрических зубчатых колес обкатным резцом типа зуборезного долбяка. Класс образования зубчатой поверхности обкат + след. При этом прямозубые колеса необходимо нарезать обязательно косозубым инструментом, так как только в этом случае угол скрещивания осей нарезаемого колеса и инструмента не будет равен нулю. Косозубые колеса можно нарезать как прямозубым, так и косозубым инструментом. При названных условиях скорость резания определяется относительным скольжением боковых поверхностей зубьев и зависит от суммы углов подъема зубьев инструмента, зубьев нарезаемого колеса и угла скрещивания осей инструмента и нарезаемой заготовки. По библиографическим источникам наивыгоднейшая сумма этих углов составляет 90 градусов. При этом угол скрещивания осей обычно принимают равным 60 градусам. Синергизм зуботочения – повышение производительности в 3...5 раз по сравнению с обкатным зубодолблением и зубофрезерованием червячными фрезами.

На рисунке 1 приведена типовая структурная схема станка, реализующая способ зуботочения цилиндрических зубчатых колес обкатным резцом типа зуборезного долбяка. Схема содержит две сложные формообразующие группы $\Phi_v(B_1B_2)$ и $\Phi_s(P_3B_4)$ с общим электродвигателем M_1 и группу B_c (P_5) для установочных перемещений суппорта при наладке станка. Кинематическая формообразующая группа $\Phi_v(B_1B_2)$ воспроизводит профиль (образующую) зубьев нарезаемого колеса, а группа $\Phi_s(P_3B_4)$, воспроизводящую линию зуба (направляющую) этого колеса.

Группа $\Phi_v(B_1B_2)$, воспроизводящая профиль (образующую) зубьев нарезаемого колеса, создает сложное, двухэлементарное, замкнутое движение обката (станочное зацепление). Ее внутренняя связь – кинематическая цепь, состоящая из механических передач, имеет вид:

$$B_1 \rightarrow \text{шпиндель } 1 \text{ с режущим инструментом } 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow i_x \rightarrow 5 \rightarrow \text{дифференциал} \rightarrow \\ \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow \text{шпиндель с заготовкой обрабатываемого колеса } 9 \rightarrow B_2.$$

Орган настройки i_y . Расчетная цепь совпадает с внутренней связью группы Φ_s . Следовательно, РП имитируют передачу винт-гайка:

T мм перемещения суппорта инструмента (Π_3) \rightarrow 1 оборот заготовки нарезаемого колеса (B_4).

УКЦ:

$$1 = T / t_{TB} \cdot i_y \cdot c_2 \cdot i_\Sigma,$$

где $T = \pi m z_u / \sin \beta$; T – шаг винтовой линии нарезаемого колеса и инструмента; β – угол подъема винтовой линии; c_2 – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи; i_Σ – передаточное отношение дифференциала при одном остановленном входе.

ФН:

$$i_y = t_{TB} / T c_2 \cdot i_\Sigma.$$

Орган настройки i_v . Скорость воспроизведения образующей задается посредством скорости резания. Поэтому расчетная цепь – это кинематическая связь:

электродвигатель $M_1 \rightarrow$ шпиндель 1 обкатного резца 2.

Следовательно, РП:

$$n_{M \text{ мин}}^{-1} \text{ электродвигателя } M_1 \rightarrow n_u \text{ мин}^{-1} \text{ обкатного резца 2 (} B_1 \text{)}.$$

УКЦ:

$$n_u = n_M \cdot c_3 \cdot i_v.$$

ФН:

$$i_v = n_u / c_3 \cdot n_M,$$

где c_3 – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Орган настройки i_s . При использовании общего электродвигателя в формообразующих группах скорость воспроизведения направляющей задается посредством оборотной подачи инструмента. Поэтому расчетная цепь – это кинематическая связь:

шпиндель заготовки 9 суппорт шпинделя обкатного резца 2.

Следовательно, РП:

$$1 \text{ оборот заготовки 9 обрабатываемого колеса } \rightarrow s \text{ мм / об обкатного резца 2 (} \Pi_3 \text{)}.$$

УКЦ:

$$s = 1 \cdot c_4 \cdot i_s.$$

ФН:

$$i_s = s / c_4,$$

где c_4 – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Рассмотренная структурная схема использована в качестве базовой в станках для зуботочения обкатным резцом цилиндрических зубчатых колес моделей ЕЗ 13, ЕЗ-24, ЕЗ-165 и др., различающихся размерами нарезаемых колес. В этих станках внутренние связи сложных формообразующих групп состоят из механических передач и отдельных механизмов (дифференциалов, гитар сменных зубчатых колес), обеспечивающих статическую возможность задания точных передаточных отношений между исполнительными органами группы и не требуют дополнительных настроек в процессе работы. Наряду с этим внутренние механические связи при большой их протяженности, характерной для станков названных моделей, не всегда обеспечивают необходимую кинематическую точность работы формообразующих групп. На кинематическую точность внутренней связи сложной формообразующей группы влияют геометрическая неточность ее элементов и неточность их взаимного расположения, обусловленная погрешностями обработки и сборки. Существенное влияние на кинематическую точность внутренней связи оказывают температурные деформации и крутильная жесткость, определяемая взаимным углом поворота валов конечных звеньев исполнительных органов.

При сложном пространственном расположении исполнительных органов станка, большом числе промежуточных подвижных звеньев жесткие внутренние механические связи становятся громоздкими, что приводит к усложнению конструкции станка и снижению его кинематической точности. Это особенно важно для зубообрабатывающих станков, имеющих сложные разветвленные, многозвенные, механические, переналаживаемые цепи значительной протяженности, где необходимо обеспечивать жесткую связь для создания сложных формообразующих движений.

Как показывает анализ литературных и патентных источников, поиск технических решений, обеспечивающих устранение указанных недостатков, привел к созданию сложных гибридных формообразующих групп. На современном этапе эволюционного развития станочного оборудования сложились

два направления при конструировании сложных гибридных формообразующих групп, принципиально различающихся элементной базой:

- металлорежущие станки, содержащие сложные гибридные формообразующие группы, структура которых представляет объединение механических и гидравлических связей на основе современных генераторов гидравлических импульсов (ГГИ), гидравлических шаговых двигателей (ГШД) и типовых блочно-модульных гидравлических элементов (механико-гидравлические технические системы);

- металлорежущие станки, содержащие сложные гибридные формообразующие группы, структура которых представляет объединение механических и электронных связей на основе типовых интегральных схем (мехатронные технические системы).

Механико-гидравлические технические системы. На рисунке 2 приведена типовая структурная схема станка с внутренними гидравлическими связями в сложных формообразующих группах для зуботочения цилиндрических зубчатых колес обкатным резцом типа зуборезного долбяка [3; 4]. В первоисточниках описание структурной схемы выполнено на языке парадигмы, принятой в научно-технической экспертизе изобретений, а методика настройки вообще не рассматривается.

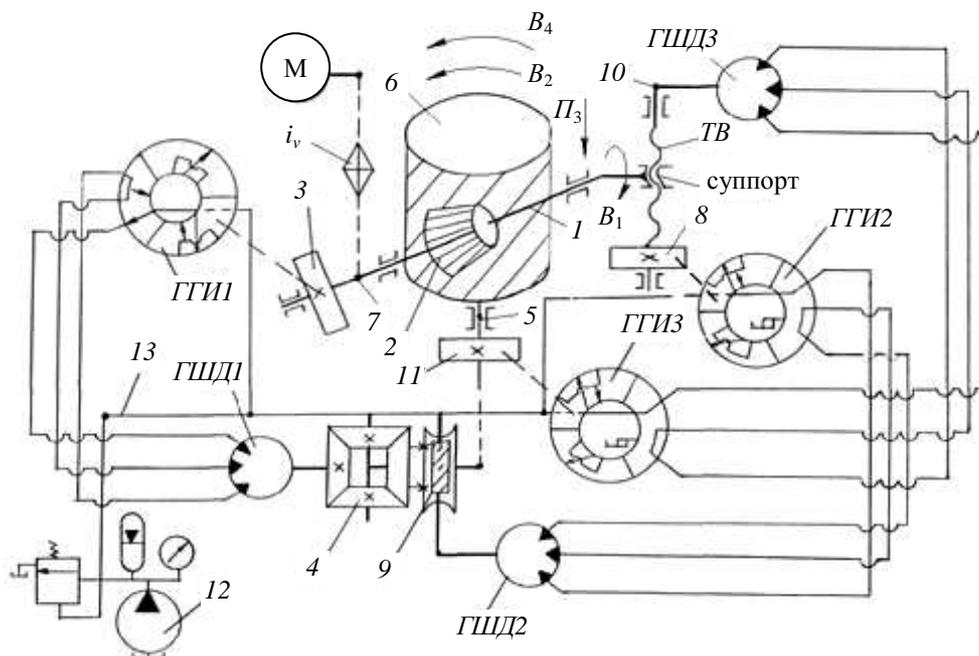


Рисунок 2. – Дифференциальная кинематическая структура станка для зуботочения с гидравлическими связями в сложных формообразующих группах

В соответствии с современной парадигмой [1] кинематическая структура станка включает две сложные гибридные формообразующие группы: $\Phi_v(B_1B_2)$, воспроизводящую профиль (образующую) зубьев нарезаемого колеса, и $\Phi_s(\Pi_3B_4)$, воспроизводящую линию зуба (направляющую) этого колеса.

Группа $\Phi_v(B_1B_2)$ создает сложное, двухэлементарное, замкнутое движение обката. Ее внутренняя связь – кинематическая цепь, состоящая из механических передач и гидравлических блоков:

$$B_1 \rightarrow \text{шпиндель } 1 \text{ с режущим инструментом } 2 \rightarrow 3 \rightarrow \text{ГГИ1} \rightarrow \text{ГШД1} \rightarrow \\ \rightarrow \text{дифференциал } 4 \rightarrow \text{шпиндель } 5 \text{ с заготовкой } 6 \rightarrow B_2.$$

Внешняя связь – кинематическая цепь:

$$M \rightarrow i_v \rightarrow \text{звено соединения связей } 7.$$

Группа настраивается по двум параметрам: на траекторию органом настройки i_x , функцию которого выполняет ГГИ 1, на скорость резания (скорость воспроизведения профиля зубьев колеса) органом настройки i_v .

$\Phi_s(\Pi_3B_4)$ создает сложное, двухэлементарное, незамкнутое винтовое движение. Ее внутренняя связь – кинематическая цепь, также состоящая из механических передач и гидравлических блоков:

$$\Pi_3 \rightarrow \text{суппорт} \rightarrow \text{ТВ} \rightarrow 8 \rightarrow \text{ГГИ2} \rightarrow \text{ГШД2} \rightarrow 9 \rightarrow \text{дифференциал } 4 \rightarrow \text{шпиндель } 5 \rightarrow B_4.$$

Внешняя связь – кинематическая цепь:

$$\text{ГШД3} \rightarrow 10 \rightarrow \text{звено соединения связей } \text{ТВ}.$$

Особенность рассматриваемой группы – использование ГШДЗ в качестве источника энергии движения исполнительного органа – суппорта инструмента. Привод вращательного движения ротора ГШДЗ обеспечивается ГГИЗ, кинематически связанным посредством шестерни 11 со шпинделем 5 заготовки.

Группа настраивается по четырем параметрам: на траекторию органом настройки i_y , функцию которого выполняет ГГИ2; на подачу (скорость воспроизведения линии зуба) органом настройки i_s ; на исходную точку; путь по упорам системы управления.

Рабочая жидкость к генераторам гидравлических импульсов подается от насосной установки 12 по трубопроводу 13.

Обе формообразующие группы выполнены в виде отслеживающей синхронизации по схеме «задающая – ведомая координаты» [5]. В группе $\Phi_v(B_1B_2)$ задающая координата – шпиндель 1 фрезы 2, ведомая координата – шпиндель 5 нарезаемого колеса 6. В группе $\Phi_s(P_3B_4)$ задающая координата – шпиндель 5 нарезаемого колеса 6, ведомая координата – суппорт инструмента. Принципиальной особенностью обеих схем отслеживающей синхронизации является размещение источников энергии ведомых координат во внутренних связях формообразующих групп. Функцию задатчиков, делителей частоты и блоков задания коэффициентов деления k_x и k_y в обеих группах соответственно выполняют струйные элементы ГГИ1 и ГГИ2, преобразующие один оборот соответствующей задающей координаты в последовательность гидравлических импульсов. Конструктивно каждый ГГИ выполнен в виде набора кодирующих дисков, закрепленных на общей оси, получающей вращательное движение. Количество кодирующих дисков определяет общее число передаточных отношений расчетных цепей, совпадающих с внутренними связями обеих гибридных формообразующих групп. Один из вариантов ГГИ подробно рассмотрен в работе [3].

Коэффициенты деления k_x и k_y определяются по формулам, аналогичным формулам для определения передаточных отношений органов настройки соответственно i_x и i_y в механических расчетных цепях по известным в станковедении расчетным перемещениям. Для вывода коэффициента деления k_x РП имеют вид:

$$1 \text{ об. обкатного резца } (B_1) \rightarrow z_u / z \text{ об. заготовки нарезаемого колеса } (B_2),$$

где z_u – число зубьев обкатного резца; z – число зубьев нарезаемого колеса.

Тогда УКЦ:

$$z_u / z = 1 \cdot c_1 \cdot i_\Sigma \cdot k_x,$$

где c_1 – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи; i_Σ – передаточное отношение дифференциала при одном остановленном входе.

Коэффициент деления (аналог формулы настройки):

$$k_x = z_u / c_1 \cdot i_\Sigma \cdot z.$$

Расчетные перемещения для вывода коэффициента деления k_y имеют вид:

$$T \text{ мм перемещения суппорта инструмента } (P_3) \rightarrow 1 \text{ оборот заготовки нарезаемого колеса } (B_4).$$

УКЦ:

$$1 = T / t_{TB} \cdot k_y \cdot (c_2 \cdot i_\Sigma),$$

где c_2 – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи; i_Σ – передаточное отношение дифференциала при одном остановленном входе.

Коэффициент деления (аналог формулы настройки):

$$k_y = t_{TB} / T c_2 \cdot i_\Sigma.$$

В качестве органа настройки i_v в станках для зуботочения, как правило, используется двухколесная гитара сменных зубчатых колес. Функцию органа настройки i_s выполняет ГГИЗ. Вывод соответствующих формул настройки осуществляется по общепринятой методике для расчетных цепей скорости резания и скорости подачи по РП соответственно:

$$n \text{ мин}^{-1} \text{ электродвигателя } M \rightarrow n_u \text{ обкатного резца } 2 (B_1);$$

$$n \text{ мин}^{-1} \text{ ГШДЗ} \rightarrow s \text{ мм/мин подачи обкатного резца } 2 (P_3).$$

Уместно отметить, что в рассматриваемой схеме целесообразно ГШДЗ заменить электродвигателем с соответствующим органом настройки. В этом случае из структурной схемы исключается ГГИЗ и шестерня 11, а в качестве органов настройки i_v и i_s в соответствии с современной тенденцией можно использовать частотные преобразователи для бесступенчатого регулирования круговых частот электродвигателей.

Авторы данного направления в станковедении [6] кинематическую связь в металлорежущих станках на основе гидравлического шагового привода называют «гидравлический вал». Такой вал используется в ряде структурных схем резьбо- и зубообрабатывающих станков [7; 8], признанных изобретениями. Фундаментальные положения данного направления изложены авторами в монографии [9].

В кинематической структуре рассмотренного станка на одном исполнительном органе – шпинделе 5 заготовки – физически суммируются с помощью дифференциала 4 два элементарных движения B_1 и B_4 , выполняемые формообразующими группами соответственно Φ_v и Φ_s . Эти движения имеют одинаковую скоростную характеристику, продолжительность их одинакова, но создаются они разными источниками движения (ГШД1 и ГШД2). Следовательно, чтобы перейти к математическому (бездифференциальному) сложению, необходимо модернизировать структурную схему так, чтобы указанные движения осуществлялись одним источником движения. При этом между кинематическими группами обязательно должна быть кинематическая связь. Этим условиям удовлетворяет структурная схема, приведенная на рисунке 3.

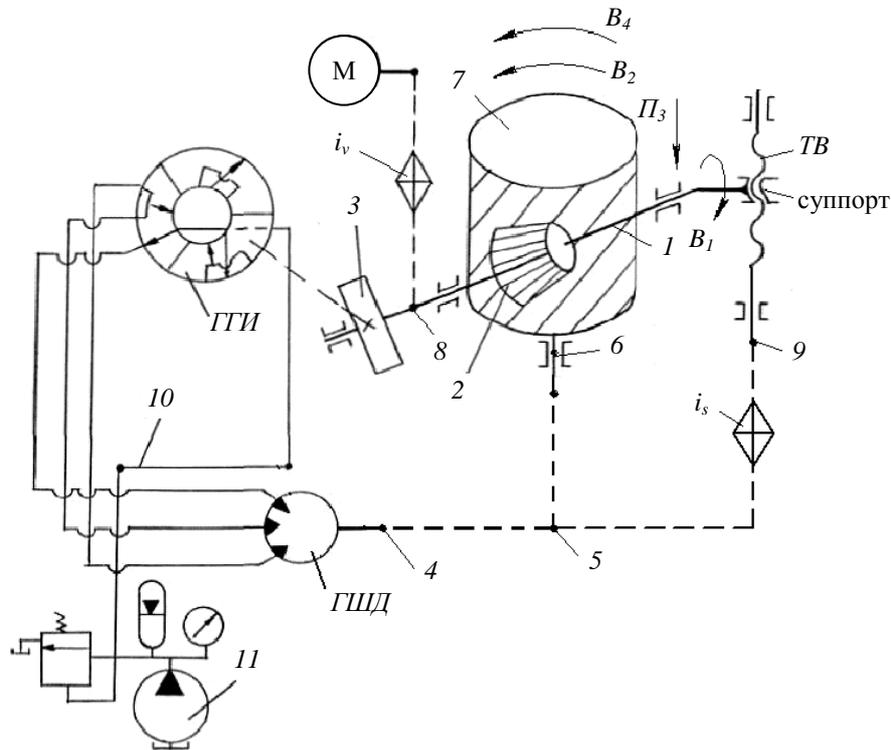


Рисунок 3. – Бездифференциальная кинематическая структура станка для зуботочения с гидравлическим валом в сложной формообразующей группе

При математическом сложении формообразующие группы $\Phi_v(B_1B_2)$ и $\Phi_s(P_3B_4)$ преобразуются к виду $\Phi_v(B_1B_2+B_4)$ и $\Phi_s(P_3)$. Таким образом, замена физического сложения математическим упрощает кинематическую структуру станка и повышает кинематическую точность внутренней связи сложной формообразующей группы.

Группа $\Phi_v(B_1B_2+B_4)$ создает сложное замкнутое движение обката. Ее внутренняя связь – кинематическая цепь, состоящая из механических передач и гидравлических блоков, имеет вид:

$$B_1 \rightarrow \text{шпиндель } 1 \text{ с режущим инструментом } 2 \rightarrow 3 \rightarrow \text{ГГИ} \rightarrow \\ \rightarrow \text{ГШД} \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow \text{шпиндель } 6 \text{ с заготовкой } 7 \rightarrow B_2+B_4.$$

Внешняя связь – кинематическая цепь:

$$M \rightarrow i_v \rightarrow \text{звено соединения связей } 8.$$

Группа настраивается по двум параметрам: на траекторию органом настройки i_x , на скорость резания (скорость воспроизведения профиля зубьев колеса) органом настройки i_v .

Группа $\Phi_s(P_3)$ создает простое незамкнутое движение подачи. Ее внутренняя связь – поступательная пара:

$$\text{суппорт обкатного резца } 2 (P_3) \rightarrow \text{вертикальные направляющие станины}.$$

Внешняя связь – кинематическая цепь:

$$M \rightarrow i_v \rightarrow 8 \rightarrow 3 \rightarrow \text{ГГИ} \rightarrow \text{ГШД} \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow i_s \rightarrow 9 \rightarrow \text{звено соединения связей } TB.$$

Группа настраивается по трем параметрам: на подачу (скорость воспроизведения линии зуба) органом настройки i_s , на исходную точку и путь по упорам системы управления.

Рабочая жидкость к генератору гидравлических импульсов подается по трубопроводу 10 от насосной установки 11.

При тчении прямозубого колеса за один оборот заготовки (движение B_2) обкатной резец совершает z/z_u оборотов (движение B_1) и перемещается на величину s мм (движение P_3). Для получения винтовой линии косозубого колеса при перемещении резца на величину s заготовка должна дополнительно повернуться на s/T оборота (движение B_4), что соответствует дополнительному повороту резца на величину $+(z/z_u) \cdot (s/T)$. Следовательно, РП для расчетной цепи, совпадающей с внутренней связью группы обката $\Phi_v(B_1B_2+B_4)$, преобразуются к виду:

1 оборот шпинделя заготовки (B_2+B_4) $\rightarrow z/z_u (1+s/T)$ оборота чашечного резца (B_1).

УКЦ:

$$z/z_u (1+s/T) = 1 \cdot c_1 \cdot k_x.$$

Коэффициент деления (аналог формулы настройки):

$$k_x = [z/z_u (1+s/T)] / c_1,$$

где c_1 – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Вывод формул настройки для органов настройки i_v и i_s выполняется по правилам, принятым для серийных станков этого класса с механическими связями.

Мехатронные технические системы. Известные станки с механическими связями для зуботочения обкатным резцом и для фрезерования червячными фрезами оснащают путевыми, электромеханическими, релейными системами управления циклом зубонарезания. В этих системах управление параметрами – исходное положение и путь исполнительных движений – обеспечивается упорами (кулачками), контактирующими с конечными переключателями, выполняющими функцию датчиков исполнения соответствующих движений.

Современная тенденция – замена электромеханических систем управления числовыми системами, в которых названные параметры программируются в алфавитно-цифровом коде, например *ISO-7 bit*. По библиографическим источникам известны два варианта использования систем числового программного управления в станках, содержащих сложные формообразующие группы. Первый вариант – кинематическая структура внутренних связей сложных формообразующих групп – состоит только из механических передач и традиционных механизмов (например, гитар сменных зубчатых колес, дифференциалов, реверсов). Такая кинематическая структура использована в зубошлицефрезерных полуавтоматах модели 5Б352ПФ2 и ВС-51ПФ2. Второй вариант – использование сложных, гибридных, формообразующих групп в структуре станка.

На рисунке 4 приведена структурная схема станка для зуботочения цилиндрических зубчатых колес обкатным резцом, содержащая две сложные гибридные формообразующие группы, внутренние связи которых это объединение исполнительных органов станка и электронных блоков. Обе группы выполнены по схеме равнозначных координат [5] с общим задатчиком – эталонным генератором импульсного сигнала, частота которого превышает частоту импульсных сигналов – аналогов частот вращения шпинделей инструмента, нарезаемого колеса и тягового вала суппорта. Группа $\Phi_v(B_1B_2)$ воспроизводит профиль зубьев нарезаемого колеса (образующую). Ее внутренняя связь имеет вид:

$B_1 \rightarrow$ шпиндель 1 резца 2 $\rightarrow M_1 \rightarrow$ усилитель мощности 3 \rightarrow параллельный сумматор 4 \rightarrow
 \rightarrow импульсно-аналоговый преобразователь 5 \rightarrow делитель частоты 6 \rightarrow делитель частоты 7 \rightarrow
 \rightarrow импульсно-аналоговый преобразователь 8 \rightarrow сумматор 9 \rightarrow параллельный сумматор 10 \rightarrow
 \rightarrow усилитель мощности 11 $\rightarrow M_2 \rightarrow$ шпиндель 12 заготовки 13 $\rightarrow B_2$.

Внешняя связь:

высокочастотный импульсный генератор 14 \rightarrow разъем 15 \rightarrow
 \rightarrow звено соединения связей разъем 16.

Группа настраивается по двум параметрам: на траекторию делителями частоты 6 и 7, на скорость резания (скорость воспроизведения профиля зубьев колеса) делителем частоты 6.

Группа $\Phi_s(P_3B_4)$ воспроизводит линию зубьев по длине (направляющую) нарезаемого колеса, ее внутренняя связь имеет вид:

$P_3 \rightarrow$ суппорт 17 $\rightarrow ТВ \rightarrow M_3 \rightarrow$ усилитель мощности 18 \rightarrow параллельный сумматор 19 \rightarrow
 \rightarrow импульсно-аналоговый преобразователь 20 \rightarrow делитель частоты 21 \rightarrow
 \rightarrow делитель частоты 22 \rightarrow импульсно-аналоговый преобразователь 23 \rightarrow сумматор 9 \rightarrow
 \rightarrow параллельный сумматор 10 \rightarrow усилитель мощности 11 $\rightarrow M_2 \rightarrow$ шпиндель 12 $\rightarrow B_4$.

Внешняя связь:

высокочастотный импульсный генератор 14 \rightarrow разъем 15 \rightarrow звено соединения связей \rightarrow разъем 24.

Группа настраивается по четырем параметрам: на траекторию делителями частоты 21 и 22; на подачу (скорость воспроизведения линии зуба) делителем частоты 21; на исходную точку и путь программно посредством задания размера в коде системы числового программного управления.

В качестве M_1, M_2, M_3 можно использовать синхронные электродвигатели переменного тока или высокомоментные электродвигатели постоянного тока. Делители частоты 6, 7, 21, 22 включают счетчик импульсов и блок задания коэффициента деления.

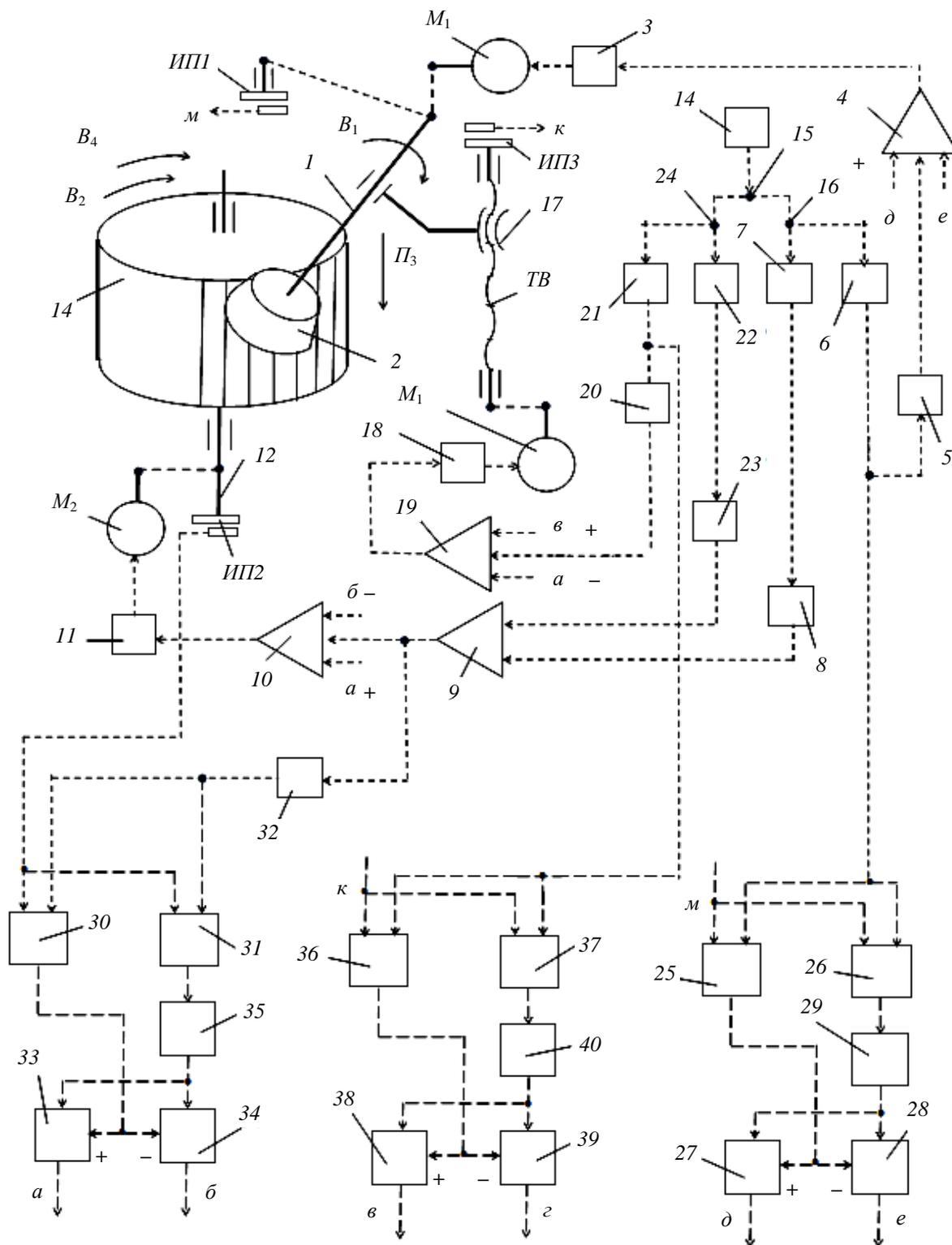


Рисунок 4. – Кинематическая структура станка для зуботочения с электронными связями в сложных формообразующих группах

Методика настройки параметров траектория и скорость обеих формообразующих групп состоит в следующем. Нормируемыми технологическими параметрами при зуботочении являются скорость резания и подача, задаваемые соответственно по круговой частоте обкатного резца и по его продольному перемещению. На делителе частоты 6 устанавливают коэффициент деления k_v , при котором на выходе счетчика этого делителя при функционировании схемы образуется импульсный сигнал – аналог напряжения переменного тока, соответствующий круговой частоте шпинделя 1 обкатного резца 2. Вывод коэффициента деления k_x , устанавливаемого на делителе частоты 7, осуществляется по известным РП:

$$1 \text{ об. обкатного резца } (B_1) \rightarrow z_u/z \text{ об. заготовки нарезаемого колеса } (B_2).$$

Тогда УКЦ для расчетной цепи, совпадающей с внутренней связью группы $\Phi_v(B_1B_2)$, имеет вид

$$z_u/z = 1 \cdot c_1 \cdot (n_{M1} / n_{M2}),$$

где c_1 – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Круговые частоты электродвигателей M_1 и M_2 однозначно зависят от задающих сигналов на выходе делителей частоты 6 и 7 соответственно. Поэтому в УКЦ круговые частоты электродвигателей можно заменить коэффициентами деления. Тогда

$$z_u/z = 1 \cdot c_1 \cdot (k_v / k_x).$$

Из полученного выражения выводится коэффициент деления, устанавливаемый на делителе частоты 7:

$$k_x = c_1 \cdot k_v \cdot (z / z_u).$$

Аналогично выводятся коэффициенты деления k_y и k_s для делителей частоты 21 и 22. На делителе частоты 21 устанавливают коэффициент деления k_s , при котором на выходе счетчика этого делителя образуется импульсный сигнал – аналог напряжения переменного тока, соответствующий круговой частоте TB . Вывод коэффициента деления k_y , устанавливаемого на делителе частоты 22, осуществляется по известным РП:

$$T \text{ мм перемещения суппорта инструмента } (П_3) \rightarrow 1 \text{ об. заготовки нарезаемого колеса } (B_4).$$

УКЦ:

$$1 = c_2 (n_{M2} / n_{M3}) (T / t_{TB}) = c_2 (k_y / k_s) (T / t_{TB}),$$

где c_2 – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Коэффициент деления, устанавливаемый на делителе частоты 22:

$$k_y = k_s (t_{TB} / c_2 T).$$

Функционирование сложных гибридных формообразующих групп станка осуществляется следующим образом. Эталонный генератор 14 вырабатывает высокочастотный сигнал. Этот сигнал поступает на делители частоты 6, 7, 21, 22, в которых происходит деление этого сигнала в соответствии с коэффициентами деления k_x , k_y , k_v , k_s . Сигнал с выхода делителя частоты 6 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 5 в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, и с его выхода через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 4 и усилитель мощности 3 – поступает на управляемый электродвигатель M_1 , сообщающий шпинделю 1 инструмента движение B_1 , соответствующее скорости резания. Синхронно импульсный сигнал с выхода делителя частоты 7 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 8 в напряжение, пропорциональное частоте на его входе. С выхода этого преобразователя через первый вход сложения – выход сумматора 9, первый вход сложения – выход параллельного сумматора 10 – и усилитель мощности 11 сигнал поступает на управляемый электродвигатель M_2 , который сообщает движение B_2 шпинделю 12 заготовки 13 обрабатываемого колеса. В итоге такого прохождения задающего сигнала осуществляется воспроизведение профиля зубчатого колеса формообразующим движением $\Phi_v(B_1P_2)$.

Параллельно сигнал с выхода делителя частоты 21 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 20 в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, и с его выхода через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 19 – и усилитель мощности 18 поступает на управляемый электродвигатель M_3 . Этот электродвигатель посредством TB сообщает суппорту 17 инструмента движение P_3 , соответствующее продольной подаче инструмента. Синхронно импульсный сигнал с выхода делителя частоты 22 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 23 в напряжение, пропорциональное частоте на его входе. С выхода этого преобразователя через второй вход сложения – выход сумматора 9, первый вход сложения – выход параллельного сумматора 10 – и усилитель мощности 11 сигнал поступает на управляемый электродвигатель M_2 , который сообщает дополнительное движение B_4 шпинделю 12 обрабатываемой заготовки 13. В итоге такого прохождения задающего сигнала осуществляется воспроизведение линии зубьев колеса формообразующим движением $\Phi_s(P_3 B_4)$.

В сложных гибридных формообразующих группах основным источником погрешностей, снижающих качественные показатели обрабатываемой поверхности, является девиация механики исполнительных органов этих групп. Технических решений для устранения этого явления в гибридных механико-гидравлических формообразующих группах в профильной литературе нет.

В мехатронных формообразующих группах явление девиации можно устранить посредством модификации внутренних связей, обеспечивающей непрерывную, двухстороннюю коррекцию задающих сигналов управления электродвигателями исполнительных органов. Для этого (см. рисунок 4) на шпиндель I инструмента, шпиндель 12 нарезаемой заготовки и TB устанавливаются измерительные преобразователи $ИП1$, $ИП2$, $ИП3$ соответственно [10]. Во внутренние связи обеих формообразующих групп включают три (по числу регулируемых исполнительных электродвигателей) модуля.

Модуль коррекции круговой частоты шпинделя I (движение B_1) инструмента содержит знаковый 25 и фазовый 26 дискриминаторы. Первые входы этих дискриминаторов соединены с выходом делителя частоты 6 , а вторые входы – с $ИП1$. Выход знакового дискриминатора 25 соединен с управляющим входом ключа 27 , управляемого положительным потенциалом, и с управляющим входом ключа 28 , управляемого отрицательным потенциалом. Выход фазового дискриминатора 26 соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя 29 , а выход этого преобразователя – с аналоговыми входами ключей 27 и 28 . Выходы ключей 27 и 28 соединены соответственно со вторым входом сложения и входом вычитания параллельного сумматора 4 .

Модуль коррекции круговой частоты шпинделя 12 (движение B_2+B_4) нарезаемой заготовки содержит знаковый 30 и фазовый 31 дискриминаторы. Первые входы этих дискриминаторов соединены с выходом аналого-импульсного преобразователя 32 , вход которого соединен с выходом сумматора 9 . Вторые входы дискриминаторов соединены с $ИП2$, установленном на шпинделе 12 . Выход знакового дискриминатора 30 соединен с управляющим входом ключа 33 , управляемого положительным потенциалом, и с управляющим входом ключа 34 , управляемого отрицательным потенциалом. Выход фазового дискриминатора 31 соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя 35 , а выход этого преобразователя – с аналоговыми входами ключей 33 и 34 . Выходы ключей 33 и 34 соединены соответственно со вторым входом сложения и входом вычитания параллельного сумматора 10 .

Модуль коррекции продольной подачи (движение $П_4$) суппорта 17 содержит знаковый 36 и фазовый 37 дискриминаторы. Первые входы этих дискриминаторов соединены с выходом делителя частоты 21 , а вторые входы – с $ИП3$. Выход знакового дискриминатора 36 соединен с управляющим входом ключа 38 , управляемого положительным потенциалом, и с управляющим входом ключа 39 , управляемого отрицательным потенциалом. Выход фазового дискриминатора 37 соединен с входом импульсно-аналогового преобразователя 40 , а выход этого преобразователя – с аналоговыми входами ключей 38 и 39 . Выходы ключей 38 и 39 соединены соответственно со вторым входом сложения и входом вычитания параллельного сумматора 19 .

Коррекция задающего сигнала, действующего на выходе параллельного сумматора 4 , осуществляется следующим образом. На первых входах знакового 25 и фазового 26 дискриминаторов постоянно действует задающий импульсный сигнал с выхода делителя частоты 6 . На вторые входы обоих дискриминаторов непрерывно с $ИП1$ поступает импульсный сигнал – аналог скорости движения B_1 шпинделя I инструмента. В результате непрерывного сравнения сигналов на выходе знакового дискриминатора образуется отрицательный потенциал при отставании шпинделя I от заданного значения и положительный потенциал при его опережении. Этот потенциал поступает на управляющие входы ключей 27 и 28 . Синхронно на выходе фазового дискриминатора 26 непрерывно образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 29 поступает на аналоговые входы ключей 27 и 28 . Этот сигнал поступает на параллельный сумматор 4 через один из ключей в зависимости от знака управляющего воздействия. При отставании шпинделя инструмента от заданного значения сигнал абсолютной погрешности поступает через ключ 28 , управляемый отрицательным потенциалом, на второй вход сложения параллельного сумматора 4 , а при опережении этот сигнал поступает через ключ 27 , управляемый положительным потенциалом, на вход вычитания этого сумматора. В итоге в параллельном сумматоре 4 происходит в зависимости от знака погрешности увеличение или уменьшение управляющего сигнала, т.е. происходит непрерывная, двухсторонняя коррекция круговой частоты шпинделя инструмента относительно номинального значения. В системах управления станочным оборудованием такую коррекцию функционирования исполнительного органа принято называть адаптивным управлением.

Аналогично осуществляется коррекция круговой частоты шпинделя 12 нарезаемого колеса (движение B_2+B_4) и продольной подачи (движение $П_4$) суппорта 17 соответствующими модулями.

Заключение. С позиций современной парадигмы познания металлорежущих станков, основанной на теории воспроизведения реальных поверхностей в машиностроении и двух законов механики: разветвление энергии движения в кинематических цепях и принцип возможных перемещений, рассмотрена эво-

люция развития металлорежущих станков, реализующих способ зуботочения обкатным резцом типа зуборезного долбяка. На основе анализа типовой кинематической структуры станка с механическими связями для зуботочения *установлены* причины создания сложных гибридных формообразующих групп, воспроизводящих траекторию сложного исполнительного движения. *Выявлены* по патентным и литературным источникам *два вида сложных гибридных формообразующих групп*, принципиально различающихся элементной базой. *Первый вид* – сложные гибридные формообразующие группы, структура которых представляет объединение механических и гидравлических связей на основе современных генераторов гидравлических импульсов, гидравлических шаговых двигателей и типовых блочно-модульных гидравлических элементов. *Второй вид* – сложные гибридные формообразующие группы, структура которых представляет объединение механических и электронных связей на основе типовых интегральных схем. *Рассмотрена* методика анализа и настройки обоих видов сложных гибридных формообразующих групп на примерах механико-гидравлического и мехатронного станков для зуботочения обкатным резцом типа долбяка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голембиевский, А.И. Эволюция познания и методики преподавания металлорежущих станков / А.И. Голембиевский // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 11. – С. 2–11.
2. Голембиевский, А.И. Частная методика создания способов формообразующей обработки в машиностроении / А.И. Голембиевский // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2017. – № 3. – С. 2–8.
3. Станок с гидравлическими связями для нарезания цилиндрических зубчатых колес методом зуботочения : заявка RU 95111229/02 / В.Ф. Ванин. – Оpubл. 1997.
4. Блочно-модульная структура формообразующих цепей металлорежущих станков на основе шагового гидропривода / В.А. Ванин [и др.] // Вестн. МГТУ «Станкин». – 2009. – № 1 (5). – С. 13–22.
5. Голембиевский, А.И. Эволюция развития сложных формообразующих групп металлорежущих станков / А.И. Голембиевский // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2017. – № 11. – С. 2–8.
6. Трифонов, О.А. «Гидравлический вал» в приводе металлорежущих станков / О.А. Трифонов, В.А. Ванин // Гидравлические системы металлорежущих станков : межвуз. сб. науч. тр. ; под ред. О.Н. Трифонова. – М. : Станкин, 1977. – Вып. 2. – С. 98–104.
7. Кинематическая структура зубо- и резьбообрабатывающих станков с гидравлическими связями в формообразующих цепях / В.А. Ванин [и др.] // Вестн. Тамбов. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 220–229.
8. Ванин, В.А. Построение внутренних (формообразующих) цепей металлорежущих станков на основе шагового привода / В.А. Ванин, А.Н. Колодин, И.В. Облицов // Вестн. Тамбов. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 3. – С. 13–22.
9. Ванин, В.А. Кинематическая связь в металлорежущих станках на основе гидравлического шагового привода / В.А. Ванин, С.В. Мищенко, О.А. Трифонов. – М. : Машиностроение, 2005. – 328 с.
10. Устройство для синхронизации приводов исполнительных органов шлицефрезерного станка : пат. ВУ 16976 / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 26.12.2012.

Поступила 04.01.2018

EVOLUTION OF THE DEVELOPMENT OF THE KINEMATIC STRUCTURE OF METAL-STOCKING MACHINES FOR PROCESSING BY THE TURNING CUTTING TYPE WITH A CUTTER-TYPE CHISEL CUTTER

A. GOLEMBIEVSKI

A purposeful evolution of the development of metal-cutting machines for processing cylindrical gears with a cutter-type chisel cutter is considered. Metal-cutting machine for the pricking as a union of kinematic groups of various functional purposes. The determining role of forming groups in the formation of the kinematic structure of metal-cutting machines. Simple and complex form-building groups. Complex hybrid mechanical-hydraulic and mechatronic form-building groups. Mechanic-hydraulic and mechatronic structural diagrams of machine tools for gearing with a cutter-type cutter of cylindrical gears. Kinematic analysis and tuning features.

Keywords: *chiseling, metal-cutting machines for gearing cylindrical wheels, forming groups, hybrid mechanical-hydraulic and mechatronic groups, kinematic analysis, adjustment.*