

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.9.04:621.833.06-529.001

СТАНОК С ГИБРИДНЫМИ ФОРМООБРАЗУЮЩИМИ ГРУППАМИ ДЛЯ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕС С НАКЛОННЫМИ ЗУБЬЯМИ

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

Рассмотрена структурная схема универсального зубофрезерного станка с гибридными формообразующими группами для обработки цилиндрических зубчатых колес с наклонными зубьями. Управляемые координаты (исполнительные органы станка) оснащены индивидуальными управляемыми электродвигателями. Предложена система синхронизации управляемых координат станка на базе типовых интегральных схем. Блок-схема системы синхронизации выполнена на основе принципа равнозначности управляемых координат в обеих формообразующих группах, воспроизводящих соответственно профиль зуба и линию зуба по длине обрабатываемого колеса. Рассмотрена автоматическая двухсторонняя коррекция управляющего сигнала на управляемых координатах, воспроизводящих линию зуба по длине.

Ключевые слова: *структурная схема зубофрезерного станка, станочное зацепление, гибридные формообразующие группы, синхронизация управляемых координат.*

Введение. Конструктивная особенность цилиндрических зубчатых колес с наклонными зубьями – использование делительного конуса вместо делительного цилиндра, характерного для традиционных зубчатых колес. При использовании делительного конуса толщина зуба вдоль линии зуба равномерно уменьшается от большего основания делительного конуса к его меньшему основанию. Эта конструктивная особенность позволяет регулировать боковой зазор в зубчатых передачах посредством осевого смещения колес. В итоге обеспечиваются в пределах срока службы передачи минимальные величины бокового зазора и циклической ошибки. Такие зубчатые колеса, как с прямыми, так и с винтовыми зубьями, используются в передачах, от которых требуются высокая кинематическая точность и минимальные боковые зазоры.

Постановка задачи. Колеса с наклонными зубьями при профилировании обкатом обрабатывают, как правило, на специализированных зубодолбежных и зубофрезерных станках. Для этого на этапе конструирования изменяют компоновку базовых моделей станков данного типа. В частности, изменение компоновки базовой модели зубофрезерного станка выполняется посредством установки вертикальных направляющих для движения суппорта фрезы под углом к оси делительного стола.

Специализация посредством изменения компоновки снижает коэффициенты универсальности и мобильности базовых моделей зубообрабатывающих станков, т.к. их переналадка на иной угол наклона зубьев или обработку традиционных цилиндрических зубчатых колес практически невозможна. Поэтому целесообразно на этапе конструирования использовать кинематического принципа воспроизведения траектории движения червячной по делительному конусу при обработке цилиндрических зубчатых колес с наклонными зубьями.

На рисунке 1 приведена схема способа зубофрезерования червячной фрезой цилиндрических колес с наклонными зубьями¹. По этому способу заготовку I устанавливают в исходное положение относительно червячной фрезы 2 . Причем начальное и конечное положения фрезы в движении P_3 устанавливаются с учетом величины пути L , который складывается из высоты H зубчатого венца заготовки, верхнего K_1 и нижнего K_2 перебегов фрезы. Для воспроизведения линии зуба, являющейся направляющей при нарезании червячной фрезой, на делительном конусе 5 фрезе 2 необходимо сообщать два движения: традиционное для зубофрезерования цилиндрических прямозубых колес с линией зуба на цилиндре движение P_3 продольной подачи и дополнительное радиальное движение P_4 , функционально связанное с движением P_3 . При этом путь дополнительного движения P_4 определяется по формуле

$$l = L \operatorname{tg} \varphi,$$

где l – путь дополнительного движения P_4 , мм;
 L – путь движения P_3 , мм;
 φ – угол наклона зубьев обрабатываемого колеса, град.

¹ Способ нарезания цилиндрических зубчатых колес и станок для его реализации : пат. 6134 Респ. Беларусь / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 29.12.2003.

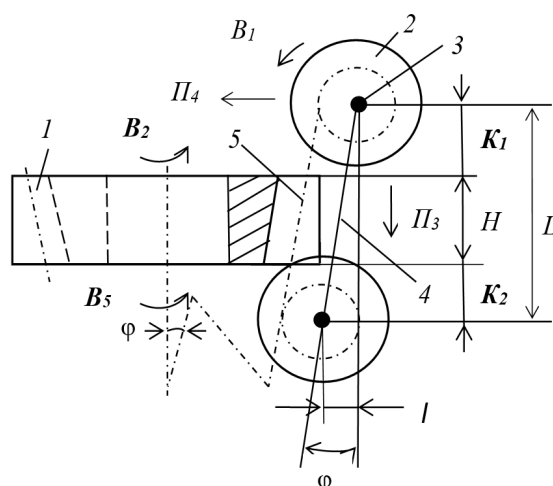


Рисунок 1. – Способ фрезерования цилиндрических зубчатых колес с наклонными зубьями

Таким образом, при кинематическом воспроизведении линии зуба на делительном конусе в рассматриваемом способе зубофрезерования линия зуба прямозубого колеса должна воспроизводиться сложным двухэлементарным движением $\Phi_s(P_3P_4)$ подачи. При этом движение обката $\Phi_v(B_1B_2)$, имитирующее зацепление червячной передачи, остается таким же, как в классическом способе зубофрезерования червячными фрезами.

При кинематическом воспроизведении линии зуба на делительном конусе винтового (косозубого) колеса сложное двухэлементарное движение подачи $\Phi_s(P_3P_4)$ преобразуется в сложное трехэлементарное движение $\Phi_s(B_5P_3P_4)$, где дополнительное движение B_5 заготовки в классическом способе обработки винтовых (косозубых) колес согласуется с движением P_3 фрезы.

Структурные схемы зубофрезерных станков с механическими связями, реализующие рассмотренный способ формообразующей обработки, предложены в работах² [1; 2]. Кинематические формообразующие группы этих станков по условиям компоновки содержат механические передачи, включая органы настройки параметров исполнительных движений. Основными органами настройки, обеспечивающими функциональную связь между исполнительными органами при заданных передаточных отношениях червячная фреза–заготовка, являются гитары сменных зубчатых колес, расположенные во внутренних связях. Например, кинематическая структура зубофрезерного станка для обработки винтовых (косозубых) колес с наклонными зубьями содержит во внутренней связи двухэлементарной группы воспроизведения профиля зубьев колеса одну гитару сменных зубчатых колес, а во внутренней связи трехэлементарной группы воспроизведения линии зуба по длине – две гитары сменных зубчатых колес. Механические передачи этих связей являются основными источниками погрешностей обрабатываемых зубчатых поверхностей. Поэтому на зубофрезерных станках с механическими связями обработка зубчатых колес, более точная, чем 6-й квалитет точности, весьма проблематична. Это обстоятельство является причиной замены механических связей системами синхронизации на основе управляемых электроприводов и типовых интегральных схем.

Разработки структурной схемы с гибридными формообразующими группами. На рисунке 2 приведена обобщенная механическая составляющая обеих частных кинематических структур зубофрезерного станка, на рисунке 3 – обобщенная схема синхронизации управляемых приводов (объединение электронных валов формообразующих групп) для обеих частных структур станка. Данная схема является модификацией известной схемы³.

Общая компоновка базовых элементов выполнена аналогично компоновке универсальных зубофрезерных станков. Управляемые электродвигатели M_1, M_2, M_3, M_4 кинематически связаны соответственно со шпинделем 1 червячной фрезы 2, шпинделем 3 делительного стола, несущего заготовку 4 обрабатываемого зубчатого колеса, тяговыми валами TB_1 и TB_2 типа передач винт–гайка. Гайка TB_1 жесткой связью соединена с суппортом 5, несущим шпиндель 1 червячной фрезы 2, а гайка TB_2 – с продольным столом 6, несущим шпиндель 3 делительного стола с заготовкой 4. Шпиндель червячной фрезы 1, шпиндель 3 делительного стола, суппорт 5 и продольный стол 6 являются исполнительными органами (управляемыми координатами) станка. Для обеспечения связи механики станка с системой синхронизации на винтах тяговых валов TB_1 и TB_2 установлены импульсные измерительные преобразователи соответственно $ИП_1$ и $ИП_2$.

² Способ нарезания цилиндрических зубчатых колес и станок для его реализации : пат. 6134 Респ. Беларусь / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 29.12.2003.

³ Устройство для синхронизации приводов исполнительных органов шлицефрезерного станка : пат. 16976 Респ. Беларусь / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 26.12.2012.

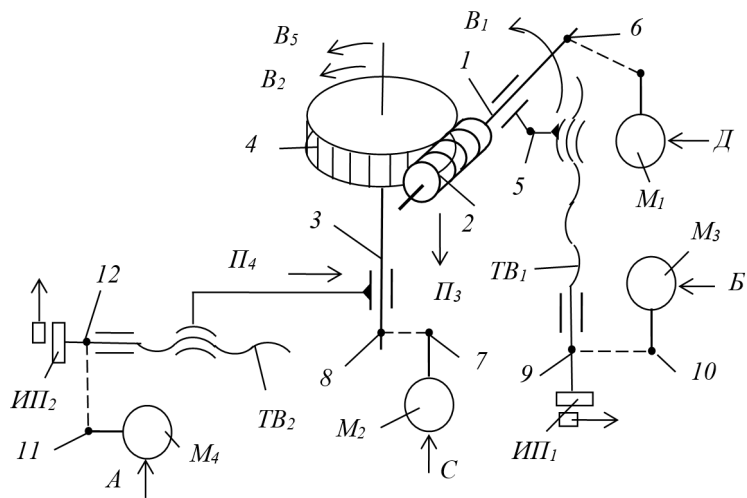


Рисунок 2. – Схема приводов зубофрезерного станка для обработки колес с наклонными зубьями

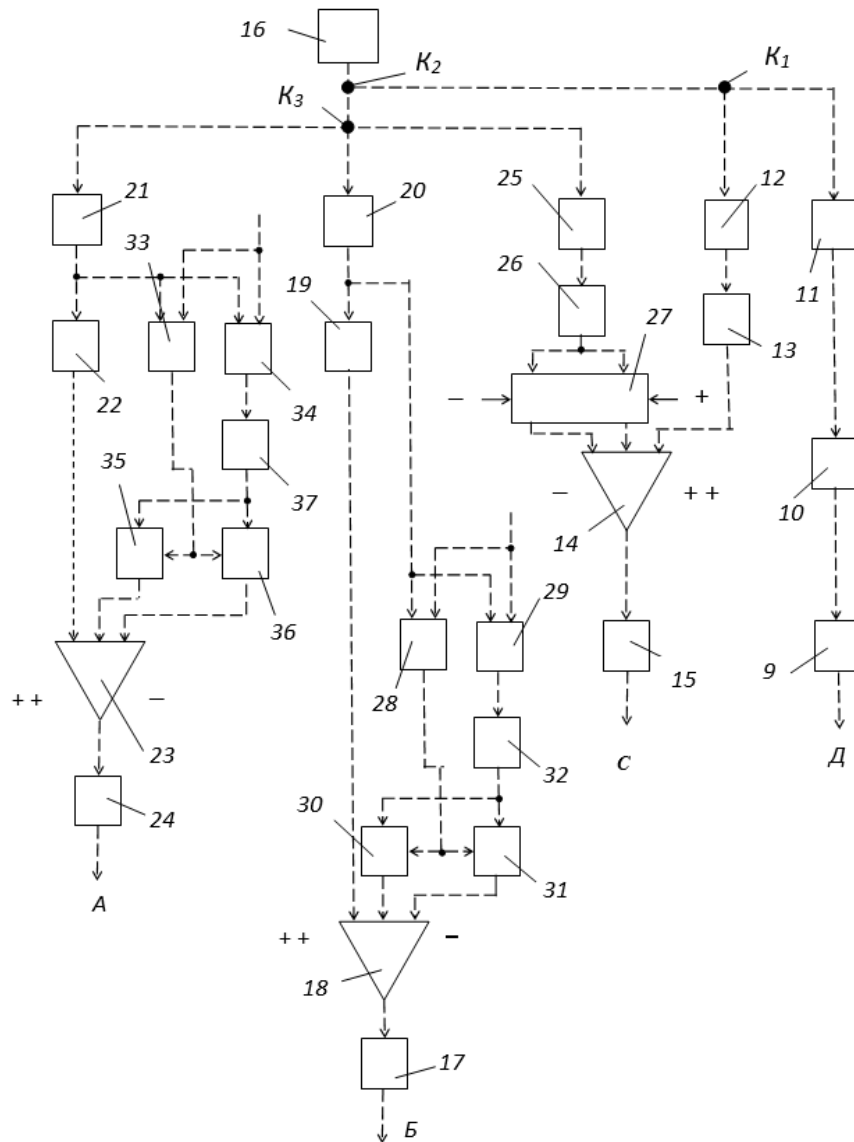


Рисунок 3. – Система синхронизации исполнительных органов станка по схеме равнозначных координат

Частная кинематическая структура станка для обработки цилиндрических винтовых (косозубых) колес включает две сложные гибридные группы: $\Phi_v(B_1B_2)$ и $\Phi_s(B_5П_3П_4)$, связанные общим задатчиком – эталонным импульсным генератором.

Двухэлементарная группа $\Phi_v(B_1B_2)$ скорости резания воспроизводит профиль зубьев винтовой зубчатой поверхности. Ее внутренняя связь – гибридная (мехатронная) цепь, соединяющая шпиндель 1 червячной фрезы 2 со шпинделем (делительным столом) 3 обрабатываемой заготовки 4 (см. рисунок 2):

$$B_1 \leftarrow 2 \leftarrow 1 \leftarrow 6 \leftarrow M_1 \leftarrow \text{электронный вал} \rightarrow M_2 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow B_2.$$

Электронный вал (см. рисунок 3):

$$\begin{aligned} & \text{усилитель мощности } 9 \leftarrow \text{импульсно-аналоговый преобразователь } 10 \leftarrow \text{делитель частоты } 11 \leftarrow \\ & \leftarrow \text{разъем } K_1 \rightarrow \text{делитель частоты } 12 \rightarrow \text{импульсно-аналоговый преобразователь } 13 \rightarrow \\ & \rightarrow \text{параллельный сумматор } 14 \rightarrow \text{усилитель мощности } 15. \end{aligned}$$

Внешняя связь:

$$\text{импульсный генератор } 16 \rightarrow \text{разъем } K_2 \rightarrow K_1 \text{ (звено соединения связей)}.$$

Движение $\Phi_v(B_1B_2)$ имеет замкнутую траекторию. Поэтому группа настраивается на два параметра: на траекторию – делителем частоты 12; на скорость воспроизведения профиля зубьев (скорость резания) – делителем частоты 11.

Трехэлементарная группа $\Phi_s(B_5П_3П_4)$ подачи воспроизводит направляющую – винтовую линию зубьев на делительном конусе. Эта группа во внутренней связи содержит две гибридные цепи. Первая цепь создает потенциальную возможность воспроизведения прямой линии зубьев на делительном конусе, вторая – потенциальную возможность преобразования прямой линии в винтовую.

Первая цепь обеспечивает функциональную связь суппорта фрезы 2 с продольным столом, несущим делительный стол (шпиндель) 3 обрабатываемой заготовки 4. Ее внутренняя связь (см. рисунок 2):

$$П_3 \leftarrow ТВ_1 \leftarrow 9 \leftarrow 10 \leftarrow M_3 \leftarrow \text{электронный вал} \rightarrow M_4 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow ТВ_2 \rightarrow П_4.$$

Электронный вал (см. рисунок 3):

$$\begin{aligned} & \text{усилитель мощности } 17 \leftarrow \text{параллельный сумматор } 18 \leftarrow \text{импульсно-аналоговый преобразователь } 19 \leftarrow \\ & \leftarrow \text{делитель частоты } 20 \leftarrow \text{разъем } K_3 \rightarrow \text{делитель частоты } 21 \rightarrow \\ & \rightarrow \text{импульсно-аналоговый преобразователь } 22 \rightarrow \text{параллельный сумматор } 23 \rightarrow \text{усилитель мощности } 24. \end{aligned}$$

Вторая цепь обеспечивает функциональную связь суппорта фрезы 2 со шпинделем (делительным столом) 3 обрабатываемой заготовки 4. Ее структура (см. рисунок 2):

$$П_3 \leftarrow ТВ_1 \leftarrow 9 \leftarrow 10 \leftarrow M_3 \leftarrow \text{электронный вал} \rightarrow M_2 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow B_5.$$

Электронный вал (см. рисунок 3):

$$\begin{aligned} & \text{усилитель мощности } 17 \leftarrow \text{параллельный сумматор } 8 \leftarrow \text{импульсно-аналоговый преобразователь } 19 \leftarrow \\ & \leftarrow \text{делитель частоты } 20 \leftarrow \text{разъем } K_3 \rightarrow \text{делитель частоты } 25 \rightarrow \\ & \rightarrow \text{импульсно-аналоговый преобразователь } 26 \rightarrow \text{ключ (логический элемент } 2И) \text{ } 27 \rightarrow \\ & \rightarrow \text{параллельный сумматор } 14 \rightarrow \text{усилитель мощности } 15. \end{aligned}$$

Внешняя связь:

$$\text{импульсный генератор } 16 \rightarrow \text{разъем } K_3 \text{ (звено соединения связей)}.$$

Движение $\Phi_s(B_5П_3П_4)$ имеет незамкнутую траекторию. Поэтому группа настраивается на четыре параметра: на траекторию – делителями частоты 21 и 25; на скорость воспроизведения линии зуба (скорость подачи) – делителем частоты 20; на исходную точку и путь – программно.

Внутренняя связь группы $\Phi_v(B_1B_2)$ и вторая цепь внутренней связи группы $\Phi_s(B_5П_3П_4)$ имеют общий участок параллельный сумматор 14 → усилитель мощности 15. Это обеспечивает физическое сложение движений B_2 и B_5 на шпинделе делительного стола при обработке косозубых колес. При этом параллельный сумматор 14 выполняет такую же функцию, что и механический дифференциал в станках с механическими связями.

В сложных, гибридных формообразующих группах основным источником погрешностей, снижающих качественные показатели обрабатываемой поверхности, является девиация механики исполнительных органов этих групп. В мехатронных формообразующих группах явление девиации можно устранить посредством модификации внутренних связей, обеспечивающей непрерывную, двухстороннюю коррекцию задающих сигналов управления электродвигателями исполнительных органов. В рассматриваемом станке основными источниками девиации являются приводы исполнительных движений $П_3$ и $П_4$. Для устранения девиации механики этих приводов в обе цепи внутренней связи группы $\Phi_s(B_5П_3П_4)$ приводов подач включены модули адаптивной, двухсторонней коррекции управляющего сигнала.

Модуль коррекции управляющего сигнала движения $П_3$ содержит знаковый 28 и фазовый 29 дискриминаторы. Выход знакового дискриминатора соединен с управляющим входом ключа 30, управляемого отрицательным потенциалом, и управляющим входом ключа 31, управляемого положительным потенциалом. Выход фазового дискриминатора соединен через импульсно-аналоговый преобразователь 32 с аналоговыми входами ключей 30 и 31. Выход ключа 30 соединен со вторым входом сложения параллельного сумматора 18, а выход ключа 31 – со входом вычитания этого сумматора. Первые входы обоих дискриминаторов соединены с делителем частоты 20, вторые – с импульсным измерительным преобразователем $ИП_1$, установленном на тяговом валу $ТВ_1$ (см. рисунок 2).

Аналогично выполнен модуль коррекции управляющего сигнала движения $П_4$. Этот модуль содержит знаковый 33 и фазовый 34 дискриминаторы. Выход знакового дискриминатора соединен с управляющим входом ключа 35, управляемого отрицательным потенциалом, и управляющим входом ключа 36, управляемого положительным потенциалом. Выход фазового дискриминатора соединен через импульсно-аналоговый преобразователь 37 с аналоговыми входами ключей 35 и 36. Выход ключа 35 соединен со вторым входом сложения параллельного сумматора 23, а выход ключа 36 – с входом вычитания этого сумматора. Первые входы обоих дискриминаторов соединены с делителем частоты 21, вторые – с импульсным измерительным преобразователем $ИП_2$, установленном на тяговом валу $ТВ_2$ (см. рисунок 2).

При настройке станка выводят коэффициенты деления k_v, k_x, k_s, k_y, k_z , устанавливаемые при наладке на делителях частоты соответственно 11, 12, 20, 27, 25.

Согласно нормативам резания при зубофрезеровании червячными фрезами скорость резания принимается по круговой частоте фрезы (движение B_1), а подача – по ее перемещению параллельно оси заготовки (движение $П_3$). Это является основанием для задания коэффициентов деления k_v и k_s на делителях частоты соответственно 11 и 20. Коэффициент деления k_v задают из условия, при котором на выходе делителя частоты 11 действует задающий сигнал – аналог круговой частоты шпинделя фрезы, соответствующий заданной скорости резания. Аналогично задают коэффициент деления k_s , при котором на выходе делителя частоты 20 действует сигнал – аналог, соответствующий продольной подаче фрезы.

Внутренняя связь и расчетная цепь группы движения обката $\Phi_1(B_1B_2)$ совпадают. Поэтому РП для исполнительных органов станочного зацепления, воспроизводящего движение обката, имеет вид:

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

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

Тогда УКЦ станочного зацепления

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

где c_1 – произведение передаточных отношений постоянных механических передач расчетной цепи;
 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

$$\kappa/z = I \cdot c_1 \cdot k_v / k_x.$$

Из этого выражения следует:

$$k_x = (c_1 z / \kappa) \cdot k_v,$$

где k_v – коэффициент деления, соответствующий заданной круговой частоте электродвигателя M_1 ;
 k_x – коэффициент деления, устанавливаемый на делителе частоты 12 для обеспечения функциональной связи шпинделя фрезы и шпинделя заготовки.

Первая цепь внутренней связи группы $\Phi_3(B_5П_3П_4)$ и расчетная цепь для определения коэффициента деления k_4 совпадают. Следовательно, РП для исполнительных органов этой цепи можно записать в следующем виде:

$$L \text{ мм путь фрезы в движении } П_3 \rightarrow l \text{ мм путь фрезы в движении } П_4,$$

где путь l устанавливается по выражению, полученному при анализе способа зубофрезерования ЦЗК с наклонным зубом (см. рисунок 1).

Тогда УКЦ станочного зацепления:

$$L = L \cdot (c_2 = i_0 \cdot t_{ТВ1} / t_{ТВ2}) n_3 / n_4,$$

где i_0 – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи;
 $t_{ТВ1}$ и $t_{ТВ2}$ – шаги тяговых валов.

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

$$l = L \cdot (c_2 = i_0 \cdot t_{TB1} / t_{TB2}) k_s / k_y.$$

Из этого выражения после соответствующих преобразований следует:

$$k_y = c_2 \cdot k_s / \operatorname{tg} \varphi,$$

где k_s – коэффициент деления, соответствующий заданной круговой частоте электродвигателя M_3 ;
 k_y – коэффициент деления, устанавливаемый на делителе частоты 21 для обеспечения функциональной связи движений $П_3$ и $П_4$;
 c_2 – константа.

Вторая цепь внутренней связи группы $\Phi_s(B_5П_3П_4)$ и расчетная цепь для определения коэффициента деления k_z совпадают. Следовательно, РП для исполнительных органов этой цепи можно записать как

$$T \text{ мм перемещения фрезы } (П_3) \rightarrow 1 \text{ об. заготовки } (B_5).$$

Тогда УКЦ:

$$l = (T / t_{TB1} \cdot (n_3 / n_5) \cdot c_2,$$

где T – шаг винтовой линии обрабатываемых зубьев;
 c_2 – произведение постоянных передаточных отношений механических передач расчетной цепи;
 n_3 – круговая частота электродвигателя M_3 , соответствующая заданной подаче;
 n_5 – круговая частота электродвигателя M_2 , необходимая для обеспечения функциональной связи в винтовом движении.

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

$$l = (T / t_{TB1}) \cdot (k_s / k_z) \cdot c_2.$$

По этому выражению определяется коэффициент деления, устанавливаемый на делителе частоты 25:

$$k_z = k_s \cdot c_2 \cdot (T / t_{TB1}).$$

Шпиндель заготовки является исполнительным органом обоих станочных зацеплений. При работе устройства результирующая круговая частота этого шпинделя представляет собой математическую сумму $B_2 \pm B_5$ двух движений B_2 и B_5 , образующих совместно соответственно с движениями B_1 и $П_3$ движение обката $\Phi_s(B_1B_2)$ и винтовое движение подачи $\Phi_s(B_5П_3П_4)$. Суммирование движений B_2 и B_4 осуществляется параллельным сумматором 14. При этом выбор знака в математической сумме движений зависит от направления винтовых линий зубьев обрабатываемого колеса и червячной фрезы. Знак «+» соответствует условию, когда винтовые линии одноименны, например, обе левые; знак «-» соответствует условию, когда винтовые линии разноименные, например, одна правая, а другая левая. Необходимый знак устанавливается при наладке станка подачей управляющего сигнала на соответствующий, потенциальный вход ключа 27.

Функционирование сложных гибридных формообразующих групп станка осуществляется следующим образом. Эталонный генератор 16 вырабатывает импульсный, высокочастотный сигнал. Этот сигнал поступает на делители частоты 11, 12, 20, 21, 25, в которых происходит его деление в соответствии с коэффициентами деления k_v , k_x , k_s , k_y , k_z .

Сигнал с выхода делителя частоты 11 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 10 в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, и с его выхода через усилитель мощности 9 поступает на управляемый электродвигатель M_1 , сообщающий шпинделю 1 червячной фрезы движение B_1 , соответствующее скорости резания. Синхронно импульсный сигнал с выхода делителя частоты 12 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 13 в напряжение, пропорциональное частоте на его входе. С выхода этого преобразователя через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 14 и усилитель мощности 15 сигнал поступает на управляемый электродвигатель M_2 , который сообщает движение B_2 шпинделю 3 заготовки 4 обрабатываемого колеса. В итоге такого прохождения задающего сигнала осуществляется воспроизведение профиля зубчатого колеса формообразующим движением $\Phi_s(B_1B_2)$.

Параллельно сигнал с выхода делителя частоты 20 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 19 в напряжение, пропорциональное частоте входного сигнала, и с его выхода через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 18 и усилитель мощности 17 – поступает на управляемый электродвигатель M_3 . Этот электродвигатель посредством TB_1 сообщает суппорту фрезы движение $П_3$, соответствующее продольной подаче инструмента. Синхронно импульсный сигнал с выхода делителя частоты 21 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 22 в напряжение, пропорциональное частоте на его входе. С выхода этого преобразователя через первый вход сложения – выход параллельного сумматора 23, и усилитель мощно-

сти 24 сигнал поступает на управляемый электродвигатель M_4 . Этот электродвигатель посредством TB_2 сообщает продольному столу, несущему делительный стол с заготовкой, движение P_4 , соответствующее подаче. Синхронно импульсный сигнал с выхода делителя частоты 25 преобразуется в импульсно-аналоговом преобразователе 26 в напряжение, пропорциональное частоте на его входе. С выхода этого преобразователя сигнал поступает через ключ 27 (логический элемент 2И) на второй вход сложения или на вход вычитания параллельного сумматора 14. В итоге шпинделю заготовки сообщается дополнительное движение B_5 , математически суммирующееся с движением B_2 . В результате такого прохождения задающего сигнала осуществляется воспроизведение винтовой линии зубьев на делительном конусе зубчатого колеса формообразующим движением $\Phi_s(B_5P_3P_4)$.

В процессе функционирования формообразующих групп осуществляется двухсторонняя коррекция действующих сигналов на выходах параллельных сумматоров 18 и 23. В системах управления станочным оборудованием такую двухстороннюю коррекцию функционирования исполнительных органов принято называть адаптивным управлением.

Коррекция задающего сигнала, действующего на выходе параллельного сумматора 18, осуществляется следующим образом. На первых входах знакового 28 и фазового 29 дискриминаторов постоянно действует задающий импульсный сигнал с выхода делителя частоты 20. На вторые входы обоих дискриминаторов непрерывно с $ИП_1$ (см. рисунок 2) поступает импульсный сигнал – аналог скорости движения P_3 суппорта фрезы. В результате непрерывного сравнения сигналов на выходе знакового дискриминатора образуется отрицательный потенциал при отставании суппорта от заданного значения и положительный потенциал при его опережении. Этот потенциал поступает на управляющие входы ключей 30 и 31. Синхронно на выходе фазового дискриминатора 29 непрерывно образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 32 поступает на аналоговые входы ключей 30 и 31. Этот сигнал поступает на параллельный сумматор 18 через один из ключей в зависимости от знака управляющего воздействия. При отставании суппорта от заданного значения сигнал абсолютной погрешности поступает через ключ 30, управляемый отрицательным потенциалом, на второй вход сложения параллельного сумматора 18, а при опережении этот сигнал поступает через ключ 31, управляемый положительным потенциалом, на вход вычитания этого сумматора. В итоге в параллельном сумматоре 18 происходит в зависимости от знака погрешности увеличение или уменьшение управляющего сигнала, т.е. происходит непрерывная, двухсторонняя коррекция движения подачи P_3 исполнительного органа – суппорта фрезы относительно номинального значения.

Аналогично осуществляется коррекция задающего сигнала на выходе параллельного сумматора 23. На первых входах знакового 33 и фазового 34 дискриминаторов постоянно действует задающий импульсный сигнал с выхода делителя частоты 21. На вторые входы обоих дискриминаторов непрерывно с $ИП_2$ (см. рисунок 2) поступает импульсный сигнал – аналог скорости движения P_4 продольного стола, несущего делительный стол (шпиндель 3). В результате непрерывного сравнения сигналов на выходе знакового дискриминатора образуется отрицательный потенциал при отставании продольного стола от заданного значения и положительный потенциал при его опережении. Этот потенциал поступает на управляющие входы ключей 35 и 36. Синхронно на выходе фазового дискриминатора 34 непрерывно образуется сигнал абсолютной погрешности, который после преобразования в аналоговую форму в импульсно-аналоговом преобразователе 37 поступает на аналоговые входы ключей 35 и 36. Этот сигнал поступает на параллельный сумматор 23 через один из ключей в зависимости от знака управляющего воздействия. При отставании продольного стола от заданного значения сигнал абсолютной погрешности поступает через ключ 35, управляемый отрицательным потенциалом, на второй вход сложения параллельного сумматора 23, а при опережении этот сигнал поступает через ключ 36, управляемый положительным потенциалом, на вход вычитания этого сумматора. В итоге в параллельном сумматоре 23 происходит в зависимости от знака погрешности увеличение или уменьшение управляющего сигнала, т.е. происходит непрерывная, двухсторонняя коррекция движения подачи P_4 исполнительного органа – продольного стола относительно номинального значения.

Рассмотренная структурная схема обеспечивает также при соответствующей переналадке обработку прямозубых цилиндрических колес с линией зубьев на делительном конусе и обработку классических косозубых и прямозубых цилиндрических колес с линией зубьев на делительном цилиндре.

При обработке прямозубых цилиндрических колес с линией зубьев на делительном конусе отключается делитель частоты 25. При этом трехэлементарная формообразующая группа $\Phi_s(B_5P_3P_4)$ преобразуется в двухэлементарную группу $\Phi_s(P_3P_4)$.

При обработке косозубых зубчатых колес с линией зубьев на делительном цилиндре отключается делитель частоты 21. При этом трехэлементарная формообразующая группа $\Phi_s(B_5P_3P_4)$ преобразуется в двухэлементарную группу $\Phi_s(B_5P_3)$.

При обработке прямозубых зубчатых колес с линией зубьев на делительном цилиндре отключаются делители частоты 21 и 25. При этом трехэлементарная формообразующая группа $\Phi_s(B_5P_3P_4)$ преобразуется в составную элементарную группу $\Phi_s(P_3^*B_1)$.

Заключение.

1. Целенаправленное расширение универсальности зубофрезерных станков с механическими связями за счет обработки цилиндрически колес с линией зуба на делительном конусе усложняет его кинематическую структуру. В частности, простая формообразующая кинематическая группа подачи при обработке прямозубого цилиндрического колеса с наклонными зубьями преобразуется в сложную двухэлементарную, а при обработке винтового (косозубого) цилиндрического колеса с наклонными зубьями – в сложную трехэлементарную группу соответственно с одним и двумя органами настройки (гитары сменных зубчатых колес) на траекторию движения подачи.

2. Увеличение механических органов настройки в кинематической структуре традиционных зубофрезерных станков при прочих равных условиях приводит к снижению точности обработки и повышению уровня шума станка при работе. Увеличивается также время наладки станков, что нежелательно при обработке небольших партий зубчатых колес.

3. Замена механических связей, включающих органы настройки параметров исполнительных движений, между исполнительными органами зубофрезерного станка для обработки цилиндрических зубчатых колес как с линией зуба на делительном конусе, так и с линией зуба на делительном цилиндре системой синхронизации на основе типовых интегральных схем между их управляемыми электродвигателями создает предпосылки для повышения точности обработки, оптимизации режимов резания, снижения трудоемкости переналадки станка и уровня шума при работе.

4. Представленная структурная схема зубофрезерного станка с гибридными (мехатронными) формообразующими группами по существу отображает эволюцию обкатного зубофрезерования цилиндрических зубчатых колес от первого патента (1862 г., Германия) до патента⁴, представленного в библиографии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голембиевский, А.И. Обработка цилиндрических зубчатых колес с наклонными по делительной окружности зубьями / А.И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2008. – № 8. – С. 102–109.
2. Голембиевский, А.И. Типовая кинематическая структура зубофрезерного станка для обработки винтовых цилиндрических зубчатых колес с наклонными зубьями / А.И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2013. – № 3. – С. 4–8.

REFERENCES

1. Golembiyevskiy, A.I. (2008). Obrabotka tsilindricheskikh zubchatykh koles s naklonnymi po delitel'noy okruzhnosti zub'yami [Treatment of cylindrical gears with teeth inclined along the dividing circle]. *Vestnik Polotsogo gosudarstvennogo universitetata. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnyye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Sciences], (8), 102–109. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Golembiyevskiy, A.I. (2013). Tipovaya kinematicheskaya struktura zubofrezernogo stanaka dlya obrabotki vintovykh tsilindricheskikh zubchatykh koles s naklonnymi zub'yami [Typical kinematic structure of a gear hobbing machine for processing helical spur gears with oblique teeth]. *Vestnik Polotsogo gosudarstvennogo universitetata. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnyye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Sciences], (3), 4–8. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 24.05.2022

**MACHINE WITH HYBRID SHAPERS
FOR GEAR MILLING OF CYLINDRICAL WHEELS WITH INCLINED TEETH**

A. GOLEMBIEVSKY

The block diagram of a universal gear hobbing machine with hybrid shaping groups for processing cylindrical gears with inclined teeth is considered. Managed coordinates (executive bodies of the machine) are equipped with individual controlled electric motors. A system for synchronization of machine controlled coordinates based on typical integrated circuits is proposed. The block diagram of the synchronization system is made on the basis of the principle of equivalence of controlled coordinates in both shaping groups, reproducing, respectively, the tooth profile and the tooth line along the length of the machined wheel. An automatic two-sided correction of the control signal on controlled coordinates, reproducing the tooth line along the length, is considered.

Keywords: block diagram of a gear hobbing machine, machine gearing, hybrid shaping groups, synchronization of controlled coordinates.

⁴ Способ нарезания цилиндрических зубчатых колес и станок для его реализации : пат. 6134 Респ. Беларусь / А.И. Голембиевский. – Оpubл. 29.12.2003.