

УДК 621.9.06 - 529

**КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ЗУБОФРЕЗЕРНОГО СТАНКА
С ГИБРИДНЫМИ ФОРМООБРАЗУЮЩИМИ ГРУППАМИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕС С НАКЛОННЫМИ ЗУБЬЯМИ****канд. техн. наук, проф. А.И. ГОЛЕМБИЕВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)**

Рассмотрены конструктивные особенности цилиндрических зубчатых колес с линией зубьев на делительном конусе. Такие зубчатые колеса при сборке обеспечивают минимальные боковые зазоры и циклические ошибки в пределах срока службы. Показано, что модернизация базовых моделей зубообрабатывающих станков на основе изменения их компоновки для обработки колес с наклонными зубьями снижает коэффициенты универсальности и мобильности этих станков. Предложен способ зубофрезерования цилиндрических колес с наклонными зубьями на основе кинематического воспроизведения траектории движения инструмента по делительному конусу. Разработана реализация данного способа в кинематической структуре зубофрезерного станка с гибридными, мехатронными формообразующими группами.

Ключевые слова: кинематическая структура, зубофрезерный станок, цилиндрические зубчатые колеса, формообразующие группы.

Введение. Конструктивная особенность цилиндрических зубчатых колес (ЦЗК) с наклонными по делительной окружности зубьями – использование делительного конуса вместо делительного цилиндра, характерного для традиционных зубчатых колес. При использовании делительного конуса толщина зуба вдоль его линии 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 ЦЗК как с прямыми, так и с винтовыми зубьями используются в передачах, от которых требуется высокая кинематическая точность и минимальные боковые зазоры.

Постановка задачи. Колеса с наклонными зубьями обрабатывают, как правило, зуборезными долбляками и червячными фрезами соответственно на зубодолбежных и зубофрезерных станках, модернизированных на основе их компоновки для нарезания рассматриваемого вида ЦЗК. Модернизация базовых моделей этих станков на этапе конструирования заключается посредством установки направляющих инструментального суппорта под углом к оси делительного стола, или посредством установки продольного стола, несущего делительный стол, под углом к траектории движения суппорта. Варианты модернизации на основе изменения компоновки снижают коэффициенты универсальности и мобильности базовых моделей зубообрабатывающих станков, так как их наладка на обработку традиционных ЦЗК или переналадка на иной угол наклона зубьев проблематична. Поэтому представляется целесообразным использование кинематического принципа воспроизведения траектории движения инструмента по делительному конусу при обработке ЦЗК с наклонными зубьями. Такое техническое решение усложняет кинематическую структуру станка с механическими связями из-за необходимости создания сложной формообразующей группы с соответствующим органом настройки на траекторию движения для воспроизведения линии зубьев на делительном конусе. Этот недостаток устраняется при замене сложных формообразующих групп с механическими связями сложными мехатронными формообразующими группами.

Разработка способа зубофрезерования ЦЗК с наклонными зубьями. На рисунке 1 приведена схема способа зубофрезерования червячной фрезой колес с наклонными зубьями [1]. Характеристический образ червячной фрезы – $\{M\}_K$, класс образования зубчатой поверхности – «обкат – касание» (H^k-P).

Согласно способу зубофрезерования червячной фрезой заготовку 1 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 движение P_3 продольной подачи – для зубофрезерования цилиндрических колес с линией зуба на цилиндре и дополнительное движение P_4 , согласованное с движением P_3 . Причем 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.

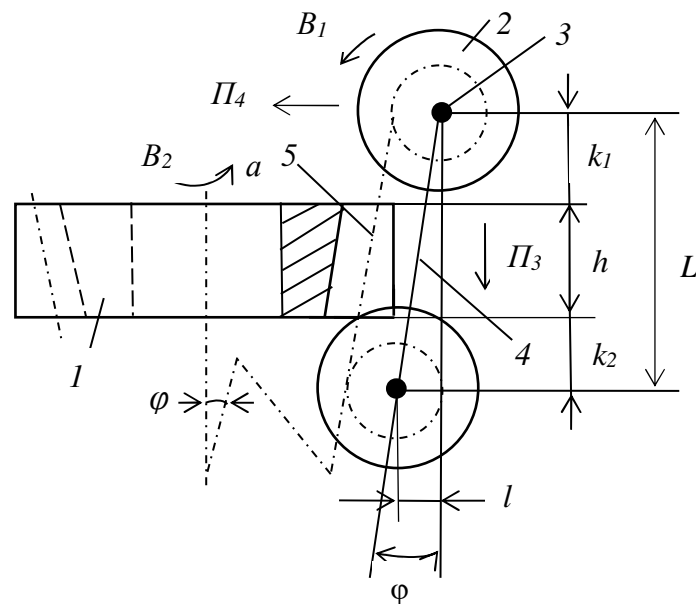


Рисунок 1. – Способ фрезерования цилиндрических зубчатых колес с наклонными зубьями

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

Движение B_1 скорости резания и движение P_3 продольной подачи являются нормируемыми характеристиками процесса зубофрезерования. Согласование движений B_2 и P_4 с движениями B_1 и P_3 соответственно осуществляется на основе следующих расчетных перемещений (РП): 1 оборот фрезы в движении $B_1 \rightarrow k/z$ оборота заготовки в движении B_2 ; L мм перемещения фрезы в движении $P_3 \rightarrow l$ мм перемещения фрезы в движении P_4 , где k – число заходов фрезы; z – число зубьев нарезаемого колеса.

При сообщении фрезе и заготовке сложных формообразующих движений $\Phi_o(B_1B_2)$ и $\Phi_H(P_3P_4)$ осуществляется нарезание цилиндрического колеса с наклонными зубьями. При этом движение $\Phi_v(B_1B_2)$ воспроизводит на заготовке профиль зубьев (образующую), а движение $\Phi_s(P_3P_4)$ перемещает ось 3 фрезы по результирующей траектории 4, эквидистантной делительному конусу 5 обрабатываемого колеса.

Модернизация типовой кинематической структуры зубофрезерного станка. На рисунке 2 приведена кинематическая структура зубофрезерного станка с электронными связями для обработки косозубых и прямозубых ЦЗК с наклонными зубьями. Для обработки косозубых колес схема содержит две сложные, гибридные, формообразующие группы $\Phi_v(B_1B_2)$ и $\Phi_s(B_3P_3P_4)$. Для обработки прямозубых колес трехэлементарная группа подачи преобразуется в двухэлементарную $\Phi_s(P_3P_4)$. Обе группы связаны общим задатчиком – эталонным генератором.

Группа $\Phi_v(B_1B_2)$ воспроизводит образующую – профиль зубьев. Ее внутренняя связь – гибридная (мехатронная) цепь, соединяющая шпиндель 1 червячной фрезы 2 со шпинделем (делительным столом) 3 обрабатываемой заготовки 4: $B_1 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow M_1 \rightarrow \text{электронный вал} \rightarrow M_2 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow B_2$.

Электронный вал (рисунок 3): усилитель мощности 9 → импульсно-аналоговый преобразователь 10 → делитель частоты 11 → разъем K_2 → разъем K_1 → делитель частоты 12 → импульсно-аналоговый преобразователь 13 → параллельный сумматор 14 → усилитель мощности 15.

Внешняя связь: импульсный генератор 16 → разъем $K_2 \rightarrow K_1$ (звено соединения связей).

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

Группа $\Phi_s(B_3P_3P_4)$ 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 (см. Рисунок 2) обеспечивает функциональную связь суппорта фрезы 2 с продольным столом, несущим делительный стол (шпиндель) 3 обрабатываемой заготовки 4. Ее структура: $P_3 \rightarrow TB_1 \rightarrow 9 \rightarrow 10 \rightarrow M_3 \rightarrow \text{электронный вал} \rightarrow M_4 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow TB_2 \rightarrow P_4$.

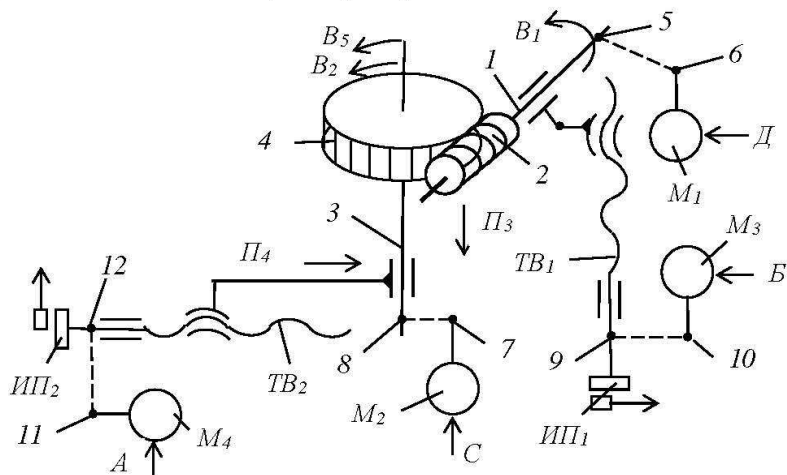


Рисунок 2. – Схема приводов зубофрезерного станка для обработки колес с наклонными зубьями

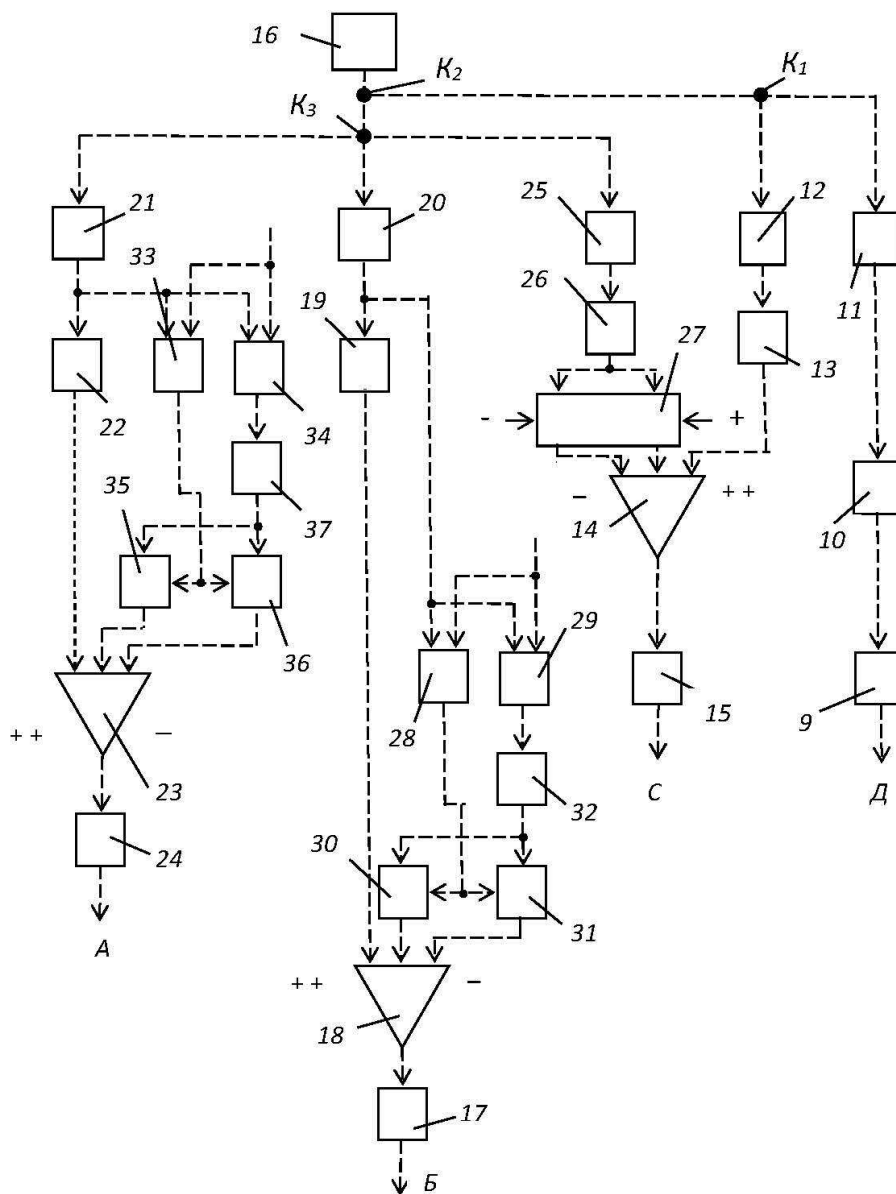


Рисунок 3. – Система синхронизации исполнительных органов станка по схеме равнозначных координат

Электронный вал (см. Рисунок 3): усилитель мощности 17 → параллельный сумматор 18 → импульсно-аналоговый преобразователь 19 → делитель частоты 20 → разъем K_3 → делитель частоты 21 → импульсно-аналоговый преобразователь 22 → параллельный сумматор 23 → усилитель мощности 24.

Вторая цепь (см. Рисунок 2) обеспечивает функциональную связь суппорта фрезы 2 со шпинделем (делительным столом) 3 обрабатываемой заготовки 4. Ее структура: $P_3 \rightarrow TB_1 \rightarrow 9 \rightarrow 10 \rightarrow M_3 \rightarrow$ электронный вал $\rightarrow M_2 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow V_5$.

Электронный вал (см. Рисунок 3): усилитель мощности 17 → параллельный сумматор 18 → импульсно-аналоговый преобразователь 19 → делитель частоты 20 → разъем K_3 → делитель частоты 25 → импульсно-аналоговый преобразователь 26 → ключ (логический элемент 2И) 27 → параллельный сумматор 14 → усилитель мощности 15.

Внешняя связь: импульсный генератор 16 → разъем K_3 (звено соединения связей).

Движение $\Phi_s(B_3P_3P_4)$ имеет незамкнутую траекторию. Поэтому группа настраивается на четыре параметра: 1) траекторию – делителями частоты 21 и 25; 2) скорость подачи – делителем частоты 20; 3) исходную точку и 4) путь – программно.

Внутренняя связь группы $\Phi_v(B_1B_2)$ и вторая цепь внутренней связи группы $\Phi_s(B_3P_3P_4)$ 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 P_3 и P_4 . Для устранения девиации механики этих приводов в обе цепи внутренней связи группы приводов подач $\Phi_s(B_3P_3P_4)$ включены модули адаптивной двухсторонней коррекции управляющего сигнала.

Модуль коррекции управляющего сигнала движения P_3 содержит знаковый 28 и фазовый 29 дискриминаторы. Выход знакового дискриминатора соединен с управляющим входом ключа 30, управляемого отрицательным потенциалом, и с 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 – с входом вычитания этого сумматора. Первые входы обоих дискриминаторов соединены с делителем частоты 20, вторые – с импульсным измерительным преобразователем $ИП_1$, установленным на тяговом валу TB_1 (см. Рисунок 3).

Аналогично выполнен модуль коррекции управляющего сигнала движения P_4 . Этот модуль содержит знаковый 33 и фазовый 34 дискриминаторы. Выход знакового дискриминатора соединен с управляющим входом ключа 35, управляемого отрицательным потенциалом, и с 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, а вторые входы – с импульсным измерительным преобразователем $ИП_2$, установленным на тяговом валу TB_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. Для вывода коэффициентов деления можно использовать методику, рассмотренную в работах [2; 3].

Согласно нормативам резания при зубофрезеровании червячными фрезами скорость резания принимается по круговой частоте фрезы (движение V_1), а подача по ее перемещению – параллельно оси заготовки (движение P_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 $\Phi_v(B_1B_2)$ совпадают. Поэтому РП для исполнительных органов станочного зацепления, воспроизводящего движение обката: 1 об. шпинделя 1 фрезы (B_1) → k/z об. шпинделя 3 заготовки (B_2), где k – число заходов червячной фрезы; z – число нарезаемых зубьев.

Уравнение кинематической цепи (УКЦ) станочного зацепления:

$$k/z = i_{c1} n_1 / n_2,$$

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.

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

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

Следовательно

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

где: k_v – коэффициент деления, соответствующий заданной круговой частоте электродвигателя M_1 ; k_x – коэффициент деления, устанавливаемый на делителе частоты $I2$ для обеспечения функциональной связи шпинделя фрезы и шпинделя заготовки.

Первая цепь внутренней связи группы $\Phi_s(B_5\Pi_3\Pi_4)$ и расчетная цепь для определения коэффициента деления k_4 совпадают. Следовательно, РП для исполнительных органов этой цепи можно записать в виде: L мм путь фрезы в движении $\Pi_3 \rightarrow l$ мм путь фрезы в движении Π_4 , где: $l = L \operatorname{tg} \varphi = (h + k_1 + k_2) \operatorname{tg} \varphi$; h – высота зубчатого венца обрабатываемого ЦЗК; k_1 – верхний перебеги фрезы; k_2 – нижний перебеги фрезы; φ – угол наклона линии зубьев обрабатываемого колеса.

Тогда УКЦ имеет вид:

$$l = L(c_2 = i_0 t_{TB1} / t_{TB2}) n_3 / n_4,$$

где: i_0 – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи; t_{TB1} и t_{TB2} – шаги тяговых валов.

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

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

Из этого выражения, после соответствующих преобразований, следует:

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

где: k_s – коэффициент деления, соответствующий заданной круговой частоте электродвигателя M_3 ; k_y – коэффициент деления, устанавливаемый на делителе частоты $2I$ для обеспечения функциональной связи движений Π_3 и Π_4 .

Вторая цепь внутренней связи группы $\Phi_s(B_5\Pi_3\Pi_4)$ и расчетная цепь для определения коэффициента деления k_2 совпадают. Следовательно, РП для исполнительных органов этой цепи можно записать в виде: T мм перемещения фрезы (Π_3) $\rightarrow 1$ об. заготовки (B_5).

Тогда УКЦ имеет вид:

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

где: T – шаг винтовой линии обрабатываемых зубьев; c_2 – произведения 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.

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

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

Исходя из данного выражения определяется коэффициент деления, устанавливаемый на делителе частоты 25 :

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

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 Π_3 движение обката $\Phi_v(B_1 B_2)$ и винтовое движение подачи $\Phi_v(B_3 \Pi_3 \Pi_4)$. 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. 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 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 инструмента движение B_1 , соответ-

ствующее 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 электродвигателя 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 $\Phi_v(B_1B_2)$.

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 Π_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 мощности 24 – сигнал поступает на управляемый электродвигатель M_4 . Электродвигатель, посредством TB_2 , сообщает продольному столу, несущему делительный стол с заготовкой, движение Π_4 , соответствующее подаче заготовки. 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 $\Phi_s(B_5\Pi_3\Pi_4)$.

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 Π_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, то есть происходит непрерывная двухсторонняя коррекция движения подачи Π_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 Π_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 – через ключ 36, управляемый положительным потенциалом, на вход вычитания сумматора. В итоге в параллельном сумматоре 23 происходит, в зависимости от знака погрешности, увеличение или уменьшение управляющего сигнала, то есть непре-

рывная двухсторонняя коррекция движения подачи P_4 исполнительного органа – продольного стола – относительно номинального значения.

Рассмотренная структурная схемы также обеспечивает, при соответствующей переналадке, обработку прямозубых ЦЗК с линией зубьев на делительном конусе и на обработку классических косозубых и прямозубых ЦЗК с линией зубьев на делительном цилиндре.

При обработке прямозубых ЦЗК 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 ЦЗК 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 ЦЗК 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 элементарную группу $\Phi_s(P_3)$.

Заключение. Преобразование элементарной формообразующей группы воспроизведения линии зубьев традиционных ЦЗК в пионерном способе зубофрезерования червячными фрезами в сложную формообразующую группу обеспечивает возможность обработки зубчатых колес с линией зубьев на делительном конусе. Замена сложных формообразующих групп с механическими связями гибридными мехатронными формообразующими группами существенно упрощает механику формообразующих групп зубофрезерного станков и обеспечивает повышение точности их функционирования. Предложена и описана на языке современной парадигмы познания станочного оборудования [4] кинематическая структура зубофрезерного станка с электронными связями в сложных гибридных формообразующих группах для обработки ЦЗК с наклонными зубьями. Замена в предложенной мехатронной структурной схеме станка механических органов настройки параметров исполнительных движений электронными аналогами обеспечивает повышение качества обработки ЦЗК и снижает трудоемкость переналадки станка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ нарезания цилиндрических зубчатых колес и станок для его реализации: пат. 6134 (BY) В 23F5/12 / А.И. Голембиевский: заявитель Полоц. гос. ун-т – опубл. 29.12.2003 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр. інтэлектуал. уласнасці. – 2012.
2. 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.
3. Голембиевский, А.И. Эволюция развития кинематической структуры металлорежущих станков для зуботочения обкатным резцом типа долбяка / А.И. Голембиевский // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. 2018. – № 3. – С. 2–12.
4. Голембиевский, А. Эволюция парадигмы познания металлорежущих станков / А. Голембиевский. – Саарбрюкен: Akademik Publishing LAP LAMBERT, 2019 – 152 с.

Поступила 04.09.2019

KINEMATIC STRUCTURE OF THE DRUG CUTTING MACHINE WITH HYBRID FORMING GROUPS FOR TREATING CYLINDRICAL WHEELS WITH INCLINED TEETH

A. GOLEMBIEVSKI

The design features of cylindrical gears with a line of teeth on a pitch cone are considered. Such gears during assembly provide minimal lateral clearances and cyclical errors within the service life. It is shown that the modernization of basic models of gear-processing machines based on changes in their layout for machining wheels with inclined teeth reduces the universality and mobility coefficients of these machines. A method for gear milling of cylindrical wheels with inclined teeth is proposed based on the kinematic reproduction of the tool movement trajectory along a separation cone. The implementation of this method in the kinematic structure of a gear milling machine with hybrid, mechatronic forming groups has been developed.

Keywords: kinematic structure, gear milling machine, cylindrical gears, forming groups.