

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.9.04:621.833.06

### ТИПОВАЯ КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ЗУБОФРЕЗЕРНОГО СТАНКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ВИНТОВЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС С НАКЛОННЫМИ ЗУБЬЯМИ

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

*Представлен способ обработки винтовых цилиндрических колес с наклонными зубьями червячными фрезами. В основу разработки положен кинематический принцип воспроизведения траектории винтового движения инструмента по делительному конусу, обеспечивающий переналадку соответствующих станков посредством органов настройки на траекторию сложного трехэлементарного движения. Разработана кинематическая структура зубофрезерного станка, реализующего предложенный способ обработки. Предлагаемый способ обработки цилиндрических зубчатых колес с винтовыми наклонными зубьями и соответствующая кинематическая структурная схема станка могут использоваться и при модернизации современных универсальных зубофрезерных станков с различным уровнем автоматизации для расширения их технических возможностей.*

**Введение.** Конструктивной особенностью цилиндрических зубчатых колес (ЦЗК) с наклонными зубьями является использование делительного конуса вместо делительного цилиндра, характерного для традиционных цилиндрических колес. Отсюда следует, что 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 колеса как с прямыми, так и винтовыми (косыми) зубьями используются в передачах, от которых требуется высокая кинематическая точность и минимальные боковые зазоры.

**Постановка задачи.** Колеса с наклонными зубьями обрабатывают, как правило, зуборезными долбками и червячными фрезами соответственно на зубодолбежных и зубофрезерных станках, модернизированных на основе изменения их компоновок для нарезания рассматриваемого вида ЦЗК. Модернизация базовой модели зубофрезерного станка на этапе конструирования заключается в установке направляющих суппорта фрезы под углом к оси делительного стола или посредством установки продольного стола, несущего делительный стол, под углом относительно траектории движения червячной фрезы. Данные варианты модернизации на основе принципа изменения компоновки снижают коэффициенты универсальности и мобильности базовых моделей зубофрезерных 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 как прямозубых, так и косозубых ЦЗК с наклонными зубьями.

**Разработка способа фрезерования винтовых (косозубых) цилиндрических зубчатых колес с наклонными зубьями.** В основу методики разработки положен принцип кинематического воспроизведения траектории движения червячной фрезы по линии винтового зуба ЦЗК при его обработке. Такой принцип предусматривает использование или в кинематической структуре станка, или в системе его управления органов настройки на траекторию формообразующего движения.

На рисунке 1 приведена схема взаимодействия заготовки нарезаемого колеса и червячной фрезы при обработке винтового (косозубого) ЦЗК с наклонными зубьями. Заготовка 1 устанавливается в исходное положение относительно червячной фрезы 2. Причем начальное и конечное положение фрезы в движении  $P_3$  устанавливается с учетом величины пути  $L$ , который складывается из высоты  $H$  зубчатого венца заготовки, верхнего  $K_1$  и нижнего  $K_2$  перебегов фрезы. Для воспроизведения винтовой линии зуба, являющейся направляющей при нарезании червячной фрезой, на делительном конусе 5 фрезе 2 необходимо сообщать два движения: традиционное для зубофрезерования цилиндрических колес с линией зуба на цилиндре движение  $P_3$  продольной подачи и дополнительное движение  $P_4$  радиальной подачи, согласованное с движением  $P_3$ . Причем путь дополнительного движения  $P_4$  определяется по формуле

$$l = L \cdot \operatorname{tg} \varphi.$$

Одновременно с движениями  $\Pi_3$  и  $\Pi_4$  заготовке  $1$  необходимо сообщать дополнительный поворот в движении  $B_5$ , согласованный с геометрической суммой движений  $\Pi_3$  и  $\Pi_4$ .

Путь  $A$  суммарного движения определяется по формуле:

$$A = \sqrt{L^2 + l^2} = \sqrt{L^2 + (Ltg\varphi)^2} = \sqrt{L^2 + (1+tg\varphi)^2} = L(1+tg\varphi),$$

где  $L$  – путь движения  $\Pi_3$ , мм;  $l$  – путь дополнительного движения  $\Pi_4$ , мм;  $\varphi$  – угол наклона зубьев обрабатываемого колеса, град.

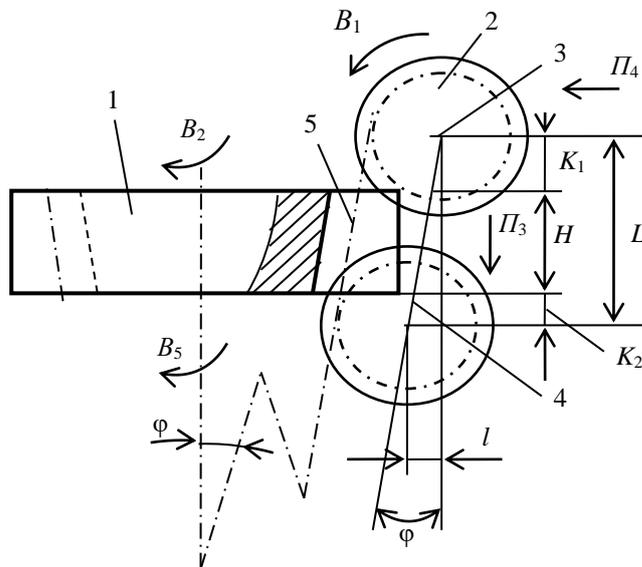


Рис. 1. Способ фрезерования винтового цилиндрического зубчатого колеса с наклонными зубьями

Параметр «путь» дополнительного поворота в движении  $B_5$  заготовки  $1$  определяется на основе следующих расчетных перемещений:

$T$  поворот заготовки, равный  $360^\circ \rightarrow T$  мм перемещения фрезы по направляющей;

$X$  поворота заготовки, град  $\rightarrow A$  мм перемещения фрезы по направляющей.

Откуда

$$X = \frac{A}{T} = \frac{L(1+tg\varphi) \cdot \sin\beta}{\pi m_n z}, \text{ град,}$$

где  $T = \frac{\pi m_n z}{\sin\beta}$  – шаг винтовой линии зуба нарезаемого колеса, мм;  $m_n$  – модуль нормальный, мм;  $z$  – число

ло зубьев нарезаемого колеса;  $\beta$  – угол подъема винтового зуба колеса.

Таким образом, при кинематическом воспроизведении винтовой линии зуба на делительном конусе в предлагаемом способе зубофрезерования винтовых ЦЗК с наклонными зубьями линия зуба должна воспроизводиться сложным трехэлементарным движением  $\Phi_s(\Pi_3 \Pi_4 B_5)$  подачи. При этом движение обката  $\Phi_v(B_1 B_2)$ , воспроизводящее профиль зубьев, остается таким же, как у классического способа зубофрезерования ЦЗК червячными фрезами.

При сообщении фрезе и заготовке сложных формообразующих движений  $\Phi_v(B_1 B_2)$  и  $\Phi_s(\Pi_3 \Pi_4 B_5)$  осуществляется нарезание винтового ЦЗК с наклонными зубьями. При этом движение  $\Phi_v(B_1 B_2)$  воспроизводит на заготовке профиль зубьев (образующую), а движение  $\Phi_s(\Pi_3 \Pi_4 B_5)$ , перемещающее ось фрезы по результирующей траектории  $4$ , эквидистантной делительному конусу  $5$ , воспроизводит винтовую линию зуба (направляющую) обрабатываемого колеса.

Данный способ по существу можно рассматривать как вариант модернизации известного способа зубофрезерования прямозубых ЦЗК с наклонными зубьями [1], от которого он отличается использованием сложной трехэлементарной формообразующей группы для воспроизведения направляющей – винтовой линии зуба на делительном конусе и соответствующей функциональной зависимостью между элементарными движениями этой группы.

**Модернизация базовой кинематической структуры зубофрезерного станка.** На рисунке 2 приведена структурная схема зубофрезерного станка, реализующего предложенный выше способ фрезерования червячной фрезой винтовых ЦЗК с наклонными зубьями. Кинематическая структура станка включает двухэлементарную группу скорости резания  $\Phi_v(B_1 B_2)$  и трехэлементарную группу подачи  $\Phi_s(\Pi_3 \Pi_4 B_5)$ , связанные между собой общим электродвигателем.

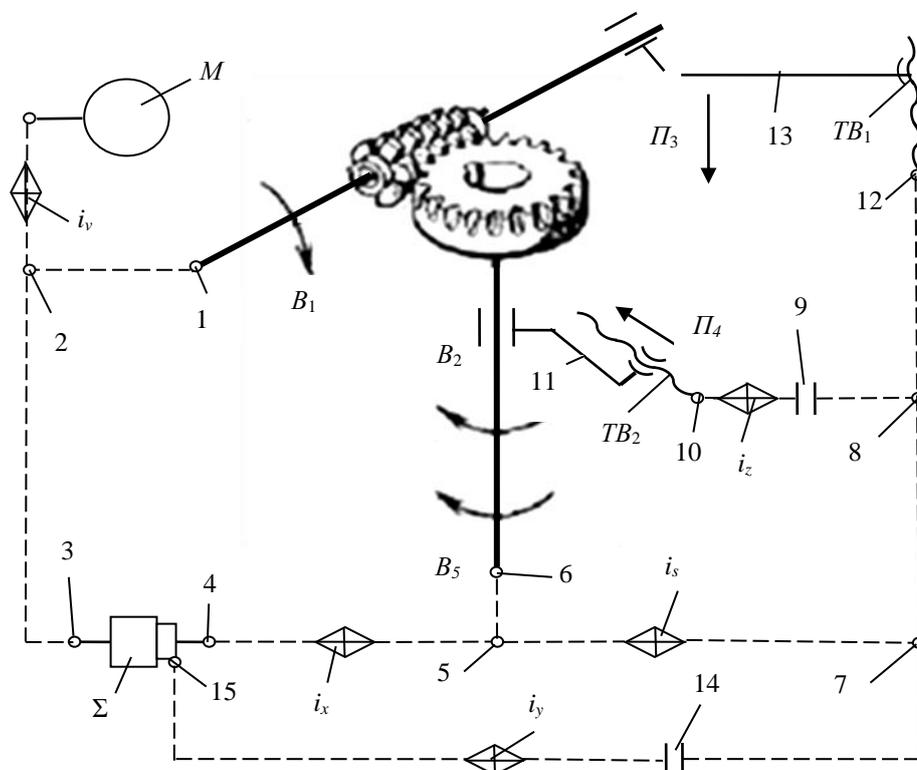


Рис. 2. Структурная схема зубофрезерного станка для обработки винтовых цилиндрических зубчатых колес с наклонными зубьями

Двухэлементарная группа  $\Phi_v(B_1 B_2)$  скорости резания воспроизводит образующую (профиль) зубьев. Ее внутренняя связь:

$$B_1 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow \Sigma \rightarrow 4 \rightarrow i_x \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow \text{делительный стол с заготовкой} \rightarrow B_2.$$

Внешняя связь:

$$M \rightarrow i_v \rightarrow 2 \text{ (звено соединения с внутренней связью)}.$$

Группа настраивается на траекторию и скорость (резания) органами настройки  $i_x$  и  $i_y$ , соответственно. Трехэлементарная группа  $\Phi_s(\Pi_3 \Pi_4 B_5)$  подачи воспроизводит направляющую (винтовую линию зуба на делительном конусе). Ее внутренняя связь содержит две ветви (кинематические цепи).

Первая ветвь:

$$\Pi_3 \rightarrow \text{суппорт 13 фрезы} \rightarrow TB_1 \rightarrow 12 \rightarrow 8 \rightarrow \text{муфта 9} \rightarrow i_z \rightarrow 10 \rightarrow TB_2 \rightarrow \text{продольный стол 11, несущий делительный стол с заготовкой,} \rightarrow \Pi_4.$$

Вторая ветвь:

$$\Pi_3 \rightarrow \text{суппорт 13 фрезы} \rightarrow TB_1 \rightarrow 12 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow \text{муфта 14} \rightarrow i_y \rightarrow 15 \rightarrow \Sigma \rightarrow 4 \rightarrow i_x \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow \text{делительный стол с заготовкой} \rightarrow \Pi_4.$$

Внешняя связь:

$$M \rightarrow i_v \rightarrow 3 \rightarrow \Sigma \rightarrow 4 \rightarrow i_x \rightarrow 5 \rightarrow i_s \rightarrow 7 \text{ (звено соединения связей для второй ветви)} \rightarrow 8 \text{ (звено соединения связей для первой ветви)}.$$

Группа настраивается на траекторию органами настройки  $i_y$  и  $i_z$ ; на скорость (подачи) – органом настройки  $i_s$ ; на путь и исходное положение по упорам системы управления.

В зубофрезерных станках с механическими связями и общим электродвигателем для формообразующих групп органы настройки  $i_x$ ,  $i_y$ ,  $i_z$  на траекторию обоих формообразующих движений и органы настройки на скорости резания и подачи, как правило, выполняют в виде гитар сменных зубчатых колес. Формулы настройки для  $i_x$ ,  $i_y$ ,  $i_z$  на траектории обоих формообразующих движений выводятся на основе следующих расчетных перемещений:

$$1 \text{ оборот фрезы в движении } V_1 \rightarrow k/z \text{ оборота заготовки в движении } V_2;$$

$$L \text{ мм перемещения фрезы в движении } P_3 \rightarrow l \text{ мм перемещения фрезы в движении } P_4;$$

$$T \text{ мм перемещения фрезы } (P_3) \rightarrow 1 \text{ обороту заготовки } (B_5),$$

где  $k$  – число заходов фрезы;  $z$  – число зубьев обрабатываемого колеса;  $T$  – шаг винтовой линии зуба колеса.

Движение  $V_1$  скорости резания и движение  $P_3$  продольной подачи являются нормируемыми характеристиками процесса зубофрезерования. Формулы настройки для органов настройки на скорость резания и подачу выводятся на основе правил, принятых для зубофрезерных станков.

Станок работает следующим образом. По циклу обработки после установки заготовки на делительном столе включается электродвигатель  $M$ . Движение от электродвигателя по внешней связи группы скорости резания через звено соединения связей 2 сообщается во внутреннюю связь этой группы. В итоге шпиндель фрезы получает вращательное движение  $V_1$  скорости резания. Одновременно делительный стол, несущий заготовку, получает вращательное движение  $B_2$ , согласованное с движением  $V_1$ . Согласованные движения  $V_1$  и  $B_2$  воспроизводят профиль зубчатого венца. Затем после включения муфт 9 и 14 движение от электродвигателя  $M$  по внешней связи трехэлементарной группы подачи через звенья соединения связей 7 и 8 сообщается в обе внутренние ветви этой группы. В итоге суппорт 13 фрезы получает движение продольной подачи  $P_3$ , согласованное с движением радиальной подачи  $P_4$  продольного стола 11 и с дополнительным поворотом  $B_5$  делительного стола, несущего заготовку обрабатываемого колеса. В результате профиль каждого зуба будет воспроизводиться по винтовой линии зуба, представляющей собой результирующую траекторию движений  $P_3$ ,  $P_4$   $B_5$ , т.е. по делительному конусу.

В рассматриваемом станке два элементарных движения  $B_2$  и  $B_5$  на делительном столе физически суммируются с помощью дифференциала  $\Sigma$ . Кинематическая структура рассматриваемого станка может быть выполнена также по бездифференциальной схеме. Для этого из структуры станка необходимо исключить дифференциал  $\Sigma$ , орган настройки  $i_y$  и муфту 14. Тогда при соблюдении условий, что слагаемые движения имеют одинаковую скоростную характеристику, их продолжительность одинакова и создаются они общим электродвигателем, эти движения будут суммироваться математически. В этом случае запись формообразующих исполнительных движений будет иной:  $\Phi_v(B_1 B_2 \pm B_5)$  и  $\Phi_s(P_3 P_4)$ . При этом между кинематическими группами обязательно должна быть кинематическая связь. Трехэлементарная группа  $\Phi_s$  преобразуется в двухэлементарную и изменяется на основе представленных ниже выводов.

При нарезании прямых зубьев за один оборот заготовки (движение  $B_2$ ) фреза делает  $\frac{z}{k}$  оборотов (движение  $V_1$ ) и перемещается по образующей на величину  $s$  мм. Для получения винтовых зубьев при перемещении фрезы на величину  $s$  заготовка должна дополнительно повернуться на  $\frac{s}{T}$  оборота (движение  $B_4$ ), что соответствует дополнительному повороту фрезы на  $\pm \left(\frac{z}{k}\right) \cdot \left(\frac{s}{T}\right)$ .

Следовательно, расчетные перемещения при нарезании винтовых зубьев на делительном конусе имеют вид:

$$1 \text{ оборот заготовки } (B_2 \pm B_4) \rightarrow \left(\frac{z}{k}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{T}\right) \text{ оборот фрезы } (V_1),$$

где знаки «+» или «-» используют в зависимости от сочетания направлений винтовых линий на обрабатываемом колесе и фрезе.

В итоге кинематическая структура рассматриваемого станка для обработки винтовых ЦЗК с наклонными зубьями преобразуется в структуру станка для обработки прямозубых ЦЗК с наклонными зубьями [1; 2]. Использование бездифференциальной кинематической структуры целесообразно при проектировании специализированного станка для обработки прямозубых и винтовых (косозубых) ЦЗК с наклонными зубьями.

Дифференциальная кинематическая структура рассматриваемого станка может быть выполнена также по схеме с отдельными электродвигателями в формообразующих группах. Для этого достато-

но орган настройки  $i_s$  отсоединить от кинематического звена 5, а его вход соединить с отдельным электродвигателем группы подач. Такая модификация кинематической структуры обеспечивает возможность оснащения станка простейшей системой ЧПУ с использованием программируемого контроллера. В этом случае из схемы исключаются органы настройки на скорость резания  $i_y$  и подачу  $i_s$ , и в обеих группах устанавливаются регулируемые электродвигатели. При этом настройка на траекторию обоих формообразующих движений, как и в схеме с механическими связями, будет осуществляться органами настройки  $i_x$ ,  $i_y$ ,  $i_z$ . Такой вариант станка рационален в серийном производстве с установившейся номенклатурой ЦЗК с наклонными зубьями. При уменьшении серийности при одновременном увеличении номенклатуры обрабатываемых колес возрастают трудозатраты на переналадку органов настройки на траекторию, что ведет к снижению коэффициента мобильности станка. Поэтому для достижения высокого коэффициента мобильности в единичном и мелкосерийном производстве с неустановившейся номенклатурой необходима более сложная система ЧПУ, при которой механические органы настройки на траекторию в обеих формообразующих группах заменяются электронными связями между исполнительными органами. Обязательным условием при этом является использование на каждом исполнительном органе отдельного регулируемого электродвигателя.

**Выводы.** Преобразование двухэлементарной формообразующей группы воспроизведения линии зуба прямого ЦЗК с наклонными зубьями в способе обработки таких колес червячными фрезами, известном по патентному первоисточнику, в трехэлементарную группу обеспечивает возможность обработки винтовых (косозубых) ЦЗК с наклонными зубьями. При проектировании специализированного зубофрезерного станка с общим электродвигателем для формообразующих групп целесообразно использование бездифференциальной кинематической структуры станка для нарезания ЦЗК с наклонными зубьями. В этом случае обработка ЦЗК с прямой и винтовой линией зубьев будет различаться только на уровне настройки формообразующих групп, обеспечивающих воспроизведение профиля зубьев и линии зубьев, на траекторию. Предлагаемый способ обработки ЦЗК с винтовыми наклонными зубьями и соответствующая кинематическая структурная схема станка могут использоваться также при модернизации современных универсальных зубофрезерных станков с различным уровнем автоматизации для расширения их технических возможностей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Способ нарезания цилиндрических зубчатых колес и станок для его реализации: пат. 6134 Респ. Беларусь, В 23F 5/12 / А.И. Голембиевский: заявитель Полоц. гос. ун-т. – опубл. 29.12.2003 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003.
2. Голембиевский А.И. Обработка цилиндрических зубчатых колес с наклонными по делительной окружности зубьями / А.И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2008. – № 8. – С.102 – 109.

Поступила 15.11.2012

#### TYPICAL KINEMATIC STRUCTURE OF MILLING MACHINES FOR WORKING SCREW SPUR GEARS WITH INCLINED TEETH

A. GOLEMBIEVSKY

*We propose a method for processing of screw cylindrical gears with inclined teeth with worm mills. The principle of kinematic trajectory helical motion playback tool for pitch cone, providing appropriate machines through readjustment of the settings on the trajectory of the complex  $t$  three-element movement is assumed as a basis. Kinematic structure of the designed gear hobbing machine, which implements the proposed method of treatment can also be used in modernization of up-to-date universal milling machines with different levels of automation for expanding of their technical potential.*