УДК 621.833

С. Н. Хатетовский, К. К. Гуляев

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ, НЕЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ К ПОГРЕШНОСТЯМ МОНТАЖА

UDC 621.833

S. N. Khatetovsky, K. K. Gulyaev

PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF GEARINGS THAT ARE INSENSITIVE TO ASSEMBLY ERRORS

Аннотация

В работе представлены основные типы зубчатых передач, которые нечувствительны к погрешностям монтажа. Очерчены основные области их применения. Рассмотрены способы формообразования рабочих поверхностей зубьев, обеспечивающих нечувствительность к погрешностям монтажа.

Ключевые слова:

зубчатая передача, погрешность монтажа, формообразование зубьев, уравнения поверхности.

Abstract

The article presents the basic types of gearings that are insensitive to assembly errors. The basic ranges of use are outlined. Methods of shaping of working faces of teeth providing the insensibility to assembly errors are considered.

Key words:

gearing, assembly error, tooth shaping, equations of surface.

Тенденции развития современного машиностроения предполагают сокращение использования механических передач в приводной технике. Это обусловлено прогрессом электрической и электронной части приводов. Но несмотря на это, современная техника пока не может полностью отказаться от использования механических передач. На наш взгляд, механические передачи не теряют своей привлекательности в качестве технических решений, когда необходимо передавать движение между валами, оси которых непараллельны, либо когда выходное звено привода или рабочий орган должны совершать сложное движение и в ряде других случаев. При этом использование традиционных механических передач, основанных на цилиндрических зубчатых передачах, действительно может быть сведено к минимуму. Но применение механических передач, основанных на зубчатых передачах с непараллельными осями колес, не теряет своей актуальности. Это червячные, конические, прецессионные и другие зубчатые передачи. Технология изготовления зубчатых колес этих передач доведена до совершенства, однако показатели качества работы не всегда отвечают современным требованиям, и это представляет собой определенную проблему. В частности, зубчатые передачи с непараллельными осями колес не в полной мере отвечают требованию технологичности сборки. Более того, при наличии погрешностей монтажа передаточное от-

© Хатетовский С. Н., Гуляев К. К., 2014

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

ношение большинства из этих передач перестает быть постоянным, что приводит к увеличению кинематической погрешности, вибрации и потере работоспособности, т. е. заклиниванию, преждевременному износу и другим негативным последствиям.

До середины XX в., судя по доступным техническим источникам литературы, была известна только одна зубчатая передача, обладающая свойством сохранения передаточного отношения при наличии погрешностей монтажа, – эвольвентная. Однако эта передача в основном используется как плоская, несмотря на возможность изготовления винтовых зубьев. При этом инвариантность передаточного отношения эвольвентной передачи поддерживается лишь для одного вида погрешности монтажа – погрешности межосевого расстояния.

Для зубчатых передач с непараллельным расположением осей колес в разное время были предложены решения по снижению зависимости передаточного отношения от отдельных видов погрешностей монтажа.

Так, была разработана цилиндроконическая передача, представленная на рис. 1 и 2. В СССР цилиндроконическую передачу одними из первых исследовали В. А. Гавриленко [1], В. И. Безруков, Я. С. Давыдов [2], Р. И. Зайнетдинов и др. В дальнем зарубежье известны работы Бакингема, Френсиса, Сильваджи, Дорнига, Масса и др. [3]. Цилиндроконическая передача также получила свое развитие в трудах некоторых российских и белорусских ученых, в частности Б. А. Лопатина [4], О. Н. Цуканова [5], П. Н. Громыко [6] и др.

В цилиндроконической передаче цилиндрическое колесо может быть выполнено эвольвентным, при этом сопряженное с ним коническое колесо может быть как эвольвентным, так и неэвольвентным. Оси колес могут быть параллельными, пересекающимися и скрещивающимися. Возможно как внутреннее, так и наружное зацепление. В такой зубчатой передаче без нарушения правильности зацепления, т. е. сохраняя передаточное отношение, коническое колесо можно передвигать вдоль оси цилиндрического колеса, регулируя при этом боковой зазор [3].

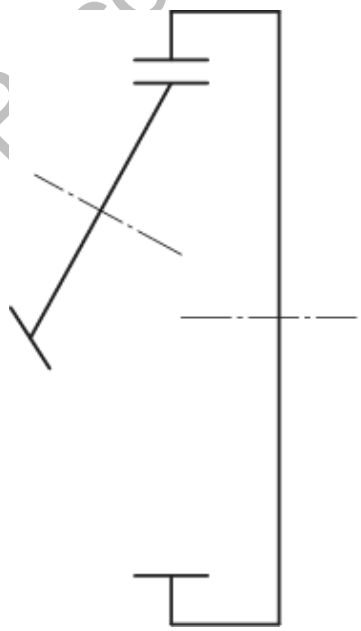

Рис. 1. Кинематическая схема цилиндроконической передачи с пересекающимися осями внутреннего зацепления

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

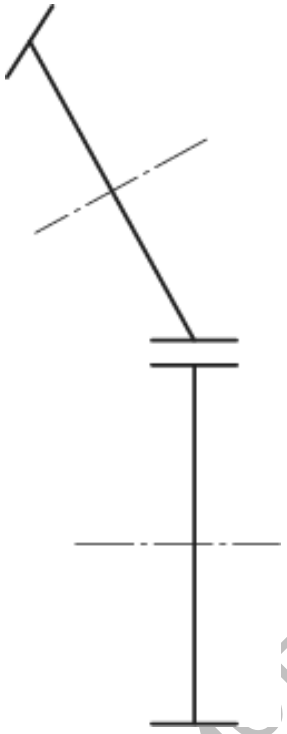

Рис. 2. Кинематическая схема цилиндроконической передачи с пересекающимися осями внешнего зацепления

Технология изготовления цилиндрического колеса цилиндроконической передачи не представляет собой проблему. Оно может быть получено методом обкатки универсальным режущим инструментом – червячной фрезой или долбяком. Коническое колесо этой передачи также может быть обработано червячной фрезой или долбяком, но при обработке ось заготовки располагают особым образом (рис. 2 и 3). При этом при обработке червячной фрезой получается эвольвентно-коническое колесо, а при обработке долбяком – коническое неэвольвентное колесо.

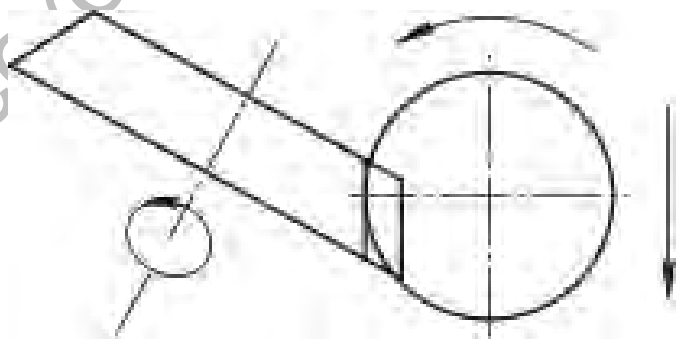

Рис. 3. Схема обработки эвольвентно-конического колеса цилиндроконической передачи

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

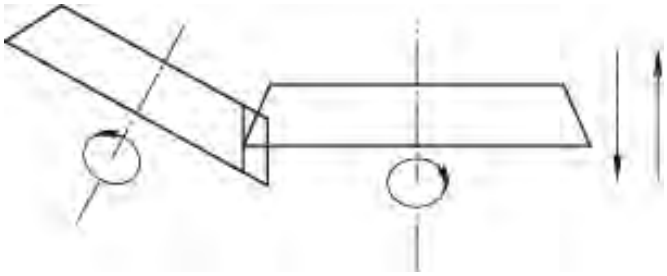

Рис. 4. Схема обработки неэвольвентного конического колеса цилиндроконической передачи

Еще одним примером зубчатой передачи, передаточное отношение которой не изменяется при наличии погрешностей монтажа, является передача с переменным углом между осями колес (рис. 5), предложенная Е. П. Солдаткиным [7]. Известен также вариант передачи с переменным углом пересечения осей (Л. В. Коростелев и Н. Н. Крылов [8]). Одно из колес может быть эвольвентным цилиндрическим.

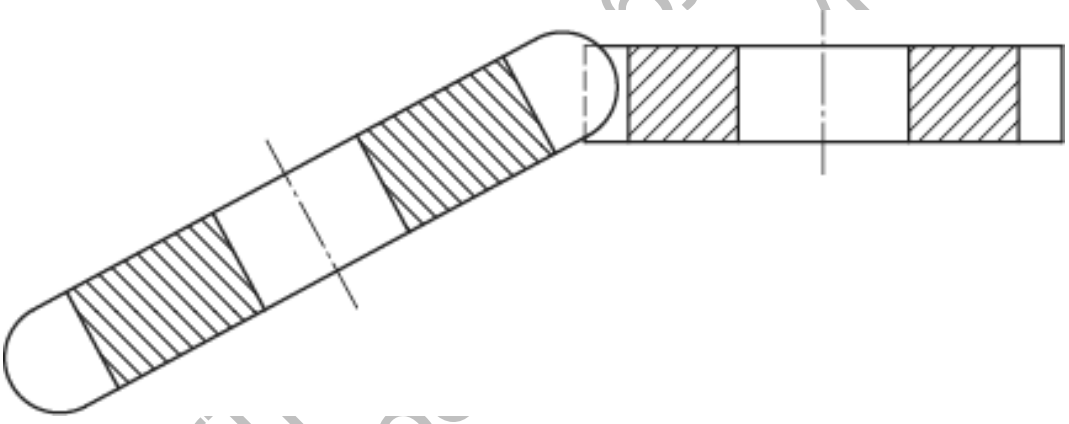

Рис. 5. Схема зубчатой передачи с переменным углом между осями колес

Для обработки зубчатого колеса, сопряженного с эвольвентным цилиндрическим колесом, Е. П. Солдаткин предложил особый способ, суть которого заключается в изменении угла наклона заготовки при ее обработке. Для этой обработки требуется специальное станочное приспособление. В качестве режущего инструмента используется долбяк.

Описанные зубчатые передачи не сохраняют передаточное отношение при наличии погрешностей монтажа в общем случае. Одним из первых, кто поставил вопрос общего случая, был Л. В. Коростелев. В [9] он обосновывает свой интерес к зубчатым передачам с переменным расположением осей колес требованиями промышленности того времени. Он, в частности, указывает на возможность использования таких зубчатых передач там, где требуется изменять положение валов механизма.

Сохранение передаточного отношения зубчатой передачи при наличии погрешностей монтажа Л. В. Коростелев и его последователи называли нечувствительностью к погрешностям

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

монтажа. Синтез зубчатых передач, нечувствительных к погрешностям монтажа, был осуществлен В. В. Ясько [10, 11]. Им были получены уравнения, описывающие рабочую поверхность зуба колес, составляющих указанную передачу:

$$z = f\left(x, y\right) = \pm A \cdot \operatorname{arctg}\frac{y}{x} + \frac{1}{C} \cdot \sqrt{\left(x^2 + y^2\right) \cdot \left(A^2 - C^2\right) - A^2 \cdot C^2} - A \cdot \operatorname{arctg}\frac{\sqrt{\left(x^2 + y^2\right) \cdot \left(A^2 - C^2\right) - A^2 \cdot C^2}}{A \cdot C} + B, \quad (1)$$

где

$$C = \frac{x \cdot \frac{\partial z}{\partial y} - y \cdot \frac{\partial z}{\partial x}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial z}{\partial A} = 0; \quad (3)$$

$$B = \omega(A). \quad (4)$$

Последняя функция произвольная и должна быть непрерывной.

В результате исследований авторов [12], а также на основе обобщения теоремы Виллиса на случай пространственных зацеплений [13] была получена другая форма уравнений, описывающих рабочую поверхность зуба колес передачи, нечувствительной к погрешностям монтажа:

$$\frac{dY_0}{dt} = P_0 \cdot \frac{dX_0}{dt} + Q_0 \cdot \frac{dZ_0}{dt}; \quad (5)$$

$$X_0 + Y_0 \cdot P_0 + M \cdot \sqrt{1 + P_0^2 + Q_0^2} = 0; \quad (6)$$

$$C_1 = \operatorname{arctg} P_0; \quad (7)$$

$$C_2 = Q_0 \cdot \cos C_1; \quad (8)$$

$$C_4 = \frac{Y_0}{\cos C_1} + \frac{M}{\sqrt{1 + C_2^2}} \times \left(\left(1 + C_2^2\right) \cdot \operatorname{tg} C_1 - C_1\right); \quad (9)$$

$$p = \operatorname{tg}\left(s + C_1\right); \quad (10)$$

$$q = \frac{C_2}{\cos\left(s + C_1\right)}; \quad (11)$$

$$z = -\frac{M \cdot C_2}{\sqrt{1 + C_2^2}} \cdot \left(s + C_1\right); \quad (12)$$

$$y = -\frac{M}{\sqrt{1 + C_2^2}} \cdot \left(\left(1 + C_2^2\right) \times \sin\left(s + C_1\right) - \left(s + C_1\right) \times \cos\left(s + C_1\right)\right) + C_4 \cdot \cos\left(s + C_1\right); \quad (13)$$

$$x = \frac{M}{\sqrt{1 + C_2^2}} \cdot \left(\left(1 + C_2^2\right) \times \cos\left(s + C_1\right) + \left(s + C_1\right) \times \sin\left(s + C_1\right)\right) - C_4 \cdot \sin\left(s + C_1\right), \quad (14)$$

$$X_0 = X_0(t); \quad (15)$$

$$Y_0 = Y_0(t); \quad (16)$$

$$Z_0 = 0; \quad (17)$$

где M – произвольная постоянная; s и t – независимые параметры.

Теоретические основы технологии изготовления зубьев колес передачи, нечувствительной к погрешностям монтажа, были разработаны Л. В. Коростелевым и В. В. Ясько [14–16]. Следует отметить, что такая технология трудно реализуема и обеспечивает низкопроизводительную обработку, и это, по мнению авторов, явилось одной из причин сдерживания широкого распространения рассматриваемых зубчатых передач. Одна из наиболее простых схем обработки колес данных передач описана в [16] и представлена на рис. 6.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

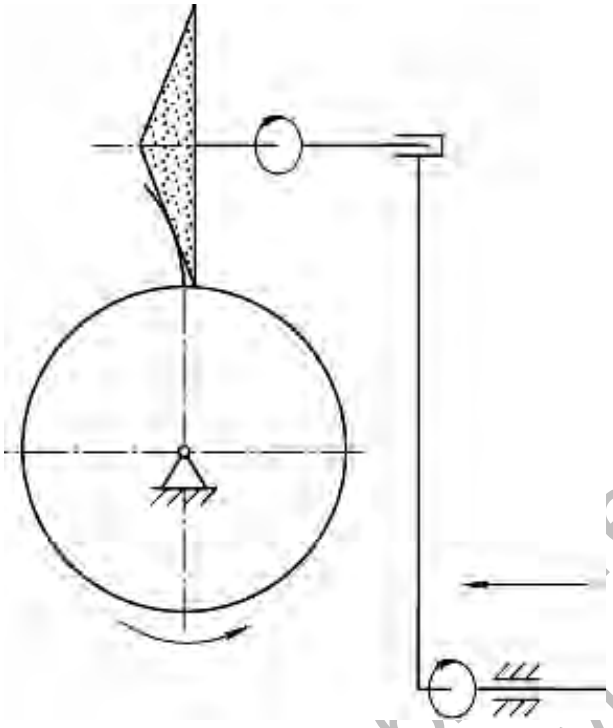

Рис. 6. Схема обработки колеса передачи, нечувствительной к погрешностям монтажа

Впоследствии идеи Л. В. Коростелева были продолжены и развиты П. Д. Балакиным [17].

Как было отмечено, зубчатые передачи, нечувствительные к погрешностям монтажа, применительно к традиционным способам зубообработки не являются технологичными. На наш взгляд, решением вопроса изготовления колес этих передач может стать использование современных станков с ЧПУ, на которых возможна производительная обработка по четырем–пяти степеням свободы. Другим решением проблемы может стать бурно развивающаяся в настоящее время технология 3D-печати. Использование 3D-принтеров позволяет получать детали как из пластмассы, так и из металла.

Одной из областей применения зубчатых передач, нечувствительных к погрешностям монтажа, является совокупность технических объектов, рабочий орган которых совершает сложное движение, например, некоторые машины пищевых производств: миксеры, тестомесильные машины и др. (рис. 7).

При производстве пищеконцентратов одной из основных задач является равномерность перемешивания смеси. Как правило, пищеконцентраты – это многокомпонентные продукты, имеющие разную насыпную плотность, различный гранулометрический состав, обладающие разной способностью к агрегации. При неоднородном перемешивании смеси потребитель может недополучить декларируемое на этикетке количество полезных пищевых веществ и энергии. Кроме этого, органолептические показатели готового блюда, полученного из пищеконцентрата, не будут соответствовать предъявляемым к нему требованиям. Поэтому равномерность, продолжительность и интенсивность перемешивания компонентов, геометрические параметры перемешивающих устройств являются важными параметрами, которые следует учитывать при производстве пищеконцентратов.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

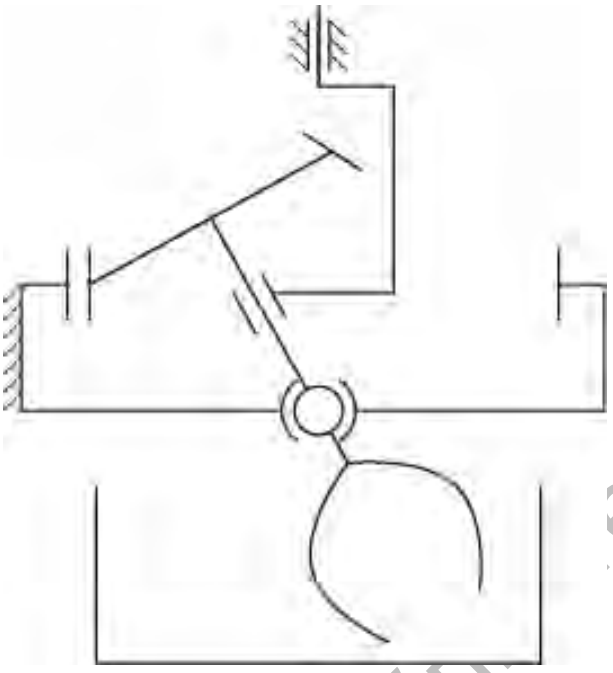

Рис. 7. Пример компоновки машины пищевого производства

При добавлении к устройству, представленному на рис. 7, механизма изменения межосевого угла можно получить механизм с дополнительными возможностями, отвечающий требованиям, предъявляемым к производству пищеконцентратов.

Заключение

Наиболее подходящими областями применения зубчатых передач, нечувствительных к погрешностям монтажа, являются механизмы, в которых рабочий орган совершает сложное движение.

Обработка зубьев колес передач, нечувствительных к погрешностям монтажа, традиционными методами сложна и непроизводительна. Решение этой проблемы заключается в использовании оборудования с ЧПУ с 4–5 управляемыми координатами. Перспективным методом также является 3D-печать.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гавриленко, В. А.** Основы теории эвольвентной зубчатой передачи / В. А. Гавриленко. – М. : Машиностроение, 1969. – 531 с.

2. **Давыдов, Я. С.** Неэвольвентное зацепление / Я. С. Давыдов. – М. : Машгиз, 1950. – 180 с.

3. **Литвин, Ф. Л.** Теория зубчатых зацеплений / Ф. Л. Литвин. – М.: Наука, 1968. – 584 с.

4. **Лопатин, Б. А.** Цилиндро-конические зубчатые передачи : монография / Б. А. Лопатин, О. Н. Цуканов. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 200 с.

5. **Цуканов, О. Н.** Основы синтеза неэвольвентных зубчатых зацеплений в обобщающих параметрах : монография / О. Н. Цуканов. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2011. – 140 с.

6. Компьютерное моделирование планетарных прецессионных передач : монография / П. Н. Громыко [и др.] ; под общ. ред. П. Н. Громыко. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2007. – 271 с. : ил.

7. **Солдаткин, Е. П.** Зубчатая передача с переменным углом между осями колес / Е. П. Солдаткин // Вестн. машиностроения. – 1962. – № 7. – С. 24–26.

8. Зубчатая передача с переменным углом пересечения осей : а. с. 194498 СССР, МПК F 06 h / Л. В. Коростелев, Н. Н. Крылов (СССР). – № 1027770/25-28 ; заявл. 13.09.65 ; опубл. 30.03.67, Бюл. № 8. – 2 с. : ил.

9. **Коростелев, Л. В.** Образование зубчатых передач с переменным расположением осей колес / Л. В. Коростелев // Машиноведение. – 1972. – № 4. – С. 46–49.

10. **Ясько, В. В.** Синтез зубчатых зацеплений, нечувствительных к погрешностям монтажа / В. В. Ясько // Изв. высш. учеб. заведений. – 1968. – № 8. – С. 21–24.

11. Зубчатая передача с изменяющимся взаимным расположением осей колес : а. с. 229905 СССР, МПК F 06 h / Л. В. Коростелев, В. В. Ясько (СССР). – № 1161592/25-8 ; заявл. 01.06.67 ; опубл. 23.10.68, Бюл. № 33. – 3 с. : ил.

12. **Хатетовский, С. Н.** Обеспечение нечувствительности зацепления поверхностей к изменению их относительного положения / С. Н. Хатетовский // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 2. – С. 122–131.

13. **Коростелев, Л. В.** Мгновенное передаточное отношение в пространственных зацеплениях / Л. В. Коростелев // Теория передач в машинах : сб. ст. – М., 1970. – С. 39–40.

14. Способ изготовления зубчатых колес : а. с. 225669 СССР, МПК B 23 f / Л. В. Коростелев, В. В. Ясько (СССР). – № 1161094/25-8 ; заявл. 01.06.67 ; опубл. 29.08.68, Бюл. № 27. – 2 с. : ил.

15. Способ обработки зубчатых колес : а. с. 229190 СССР, МПК B 23 f / Л. В. Коростелев, В. В. Ясько (СССР). – № 1161593/25-8 ; заявл. 01.06.67 ; опубл. 17.10.68, Бюл. № 32. – 2 с. : ил.

16. **Коростелев, Л. В.** Изготовление зубчатых передач, нечувствительных к погрешностям монтажа / Л. В. Коростелев, В. В. Ясько // Машиноведение. – 1968. – № 5. – С. 50–53.

17. **Балакин, П. Д.** Синтез механических передач с адаптивными свойствами : автореф. дис. … д-ра техн. наук : 20.04.94 / П. Д. Балакин. – Новосибирск, 1994. – 27 с.

Статья сдана в редакцию 23 апреля 2014 года

Станислав Николаевич Хатетовский, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: mechlab@yandex.ru.
Кирилл Константинович Гуляев, старший преподаватель, Могилевский государственный университет продовольствия. E-mail: gkk2004@inbox.ru.

Stanislav Nikolayevich Khatetovsky, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: mechlab@yandex.ru.
Kirill Konstantinovich Gulyaev, senior lecturer, Mogilev State University of Food Technologies. E-mail: gkk2004@inbox.ru.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета